

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Механіко – технологічний факультет

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**Завідувач кафедри
Тракторів і автомобілів**

(назва кафедри)

Калінін Є.І.

(підпис)

(ПІБ)

«_____» _____ 2026 р.

ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ БАКАЛАВРА

**на тему «Покращення екологічних показників гусеничного трактора
зменшенням його впливу на ґрунт»**

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

Братішко В.В.

(ПІБ)

(підпис)

Керівник дипломного проєкту бакалавра

к.т.н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

Орищенко С.В.

(ПІБ)

(підпис)

Виконав

Сахацький Роман Ігорович

(ПІБ)

(підпис)

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

тракторів і автомобілів та

д.т.н., проф. _____ **Калінін Є.І.**
(наук. ступ., вч. звання) (підпис) (ПІБ)

«_____» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту

Сахацький Роман Ігорович

Спеціальність _____
(прізвище, ім'я, по батькові) 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

Тема дипломного проєкту бакалавра на тему «Покращення екологічних показників гусеничного трактора зменшенням його впливу на ґрунт»
затверджена наказом ректора НУБіП України від «16» лютого 2026р. №510 «С»

Термін подання завершеної роботи (проєкту) на кафедру: _____ 01.05.2026
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до дипломного проєкту бакалавра: характеристики та конструктивні особливості ходових систем, що використовуються на гусеничних тракторах сільськогосподарського та трелювального призначення

Перелік питань які потрібно розробити _____

Вступ _____

1. Стан питання та задачі дослідження _____
2. Теоретичні дослідження процесів роботи трелювального трактора та його впливу на лісовий ґрунт _____
3. Деякі особливості взаємодії з ґрунтом гусеничного рушія з індивідуальною підвіскою опорних котків _____
4. Теоретична оцінка впливу гусеничного рушія на ґрунт _____
5. Ефективність зниження ущільнюючого впливу на ґрунт трактора при вирощуванні зернових культур (на прикладі трактора ХТЗ-150-05-09) _____

Висновки _____

Перелік графічного матеріалу: Вступ. Стан питання та аналіз існуючих досліджень. Теоретичні дослідження. Запропоноване технічне рішення. Висновки

Дата видачі завдання «23» лютого 2026 р.

Керівник дипломного проєкту бакалавра _____
(підпис)

Орищенко С.В.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис)

Сахацький Р.І.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Основна частина дипломного проекту викладена на 62 сторінках пояснювальної записки і 10 слайдів презентації, ілюстрована 14 рисунками.

Пояснювальна записка складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури.

Тема дипломного проекту: «Покращення екологічних показників гусеничного трактора зменшенням його впливу на ґрунт».

Отримана теоретична залежність для визначення величини і характеру розподілу нормальних тисків по ланці і всій опорній ділянці гусениці рушія з індивідуальними підресореними опорними котками включає в себе як основні конструктивні параметри ходової системи, так і експлуатаційні показники трактора.

Розрахунки для трактора ТТ-4М з шістьма котками показали, що зі збільшенням швидкості трактора напруження під його ходовою системою зменшується за величиною. Також було відзначено, що зі збільшенням глибини шару ґрунту напруження в ньому під гусеничними рушіями затухає. Експлуатація даного трактора з індивідуальною шестикатковою підвіскою опорних котків дозволяє на 60...66% знизити стискальні напруження у ґрунті залежно від швидкості руху агрегату. Під дією стискальних напружень ґрунт деформується, утворюючи слід різної глибини. Дані щодо зміни глибини сліду, рис. 4.10, під різними ходовими системами трактора ТТ-4М при роботі свідчать про те, що найбільша глибина сліду спостерігається під ходовою системою серійного трактора.

Ключові слова: гусеничний рушій; ходова система трактора; трактор ТТ-4М; опорні котки; індивідуальна підвіска; нормальні тиски; стискальні напруження ґрунту; деформація ґрунту; глибина сліду; експлуатаційні показники трактора.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ГЛАВА 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1 Загальні відомості про первинний транспорт лісу	7
1.2 Технологія роботи трелювальних тракторів з пачковим захватом.....	10
1.3 Техніко-експлуатаційна оцінка трелювальних тракторів	12
1.4 Екологічна оцінка лісових машин і технологій	19
1.5 Взаємодія трелювальних систем з лісовими ґрунтами	23
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ ТРЕЛЮВАЛЬНОГО ТРАКТОРА ТА ЙОГО ВПЛИВУ НА ЛІСОВИЙ ҐРУНТ ..	29
2.1 Теоретичні дослідження ущільнення ґрунту трелювальним трактором.....	29
2.2 Опис процесу роботи трелювального трактора	36
РОЗДІЛ 3 ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ З ҐРУНТОМ ГУСЕНИЧНОГО РУШІЯ З ІНДИВІДУАЛЬНОЮ ПІДВІСКОЮ ОПОРНИХ КОТКІВ.....	38
3.1 Обґрунтування застосовуваної конструкції підвіски на тракторі.....	38
3.2 Визначення величини і характеру розподілу питомого тиску по лінії опорної поверхні гусеничного рушія.....	40
РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ГУСЕНИЧНОГО РУШІЯ НА ҐРУНТ	44
4.1 Розподіл питомого тиску по довжині опорної поверхні рушія трактора ТТ-4М	48
РОЗДІЛ 5 ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗНИЖЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОГО ВПЛИВУ НА ҐРУНТ ТРАКТОРА ПРИ ВИРОЩУВАННІ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР (НА ПРИКЛАДІ ТРАКТОРА ХТЗ-150-05-09)	54
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59
ДОДАТКИ.....	61

ВСТУП

Лісопромисловий комплекс України є важливою складовою аграрного сектору держави, оскільки забезпечує потреби сільського господарства у деревинних матеріалах, паливі та технічній сировині, а також сприяє раціональному використанню природних ресурсів. Виконання лісозаготівельних робіт потребує застосування сучасних трелювальних тракторів і спеціалізованої техніки, експлуатація та вдосконалення яких належать до сфери агроінженерії.

Лісопромисловий комплекс України включає в себе лісозаготівельну, деревообробну та целюлозно-паперову промисловості. Усі галузі лісового сектору технологічно пов'язані між собою на основі заготівлі деревинної сировини та її подальшої переробки.

Діяльність лісової промисловості базується на використанні відновлюваного природного ресурсу – деревини. Ліси України – це один із найважливіших природних ресурсів країни. Їх особливість полягає в тому, що вони, на відміну від багатьох інших природних ресурсів, є відновлюваними, що при грамотному використанні дозволяє організувати їх невиснажливе використання.

Основний обсяг деревини в Україні заготовляється при проведенні суцільних рубок у лісах третьої групи, де основним способом відновлення вирубок є природне поновлення, ефективність якого значною мірою залежить від застосовуваної системи машин і технології проведення лісосічних робіт.

Хлистова технологія заготівлі деревини становить 70% від усього обсягу світових лісозаготівельних робіт. Аналіз тенденцій розвитку техніки і технології лісосічних робіт, а також особливостей існуючих природно-виробничих умов основних лісопромислових регіонів показує, що в найближчому майбутньому домінуючою в нашій країні залишатиметься хлистова технологія із застосуванням бензомоторних пил та валочних машин.

Найбільш продуктивними машинами, які використовуються на валці деревини, вважаються валочно-пакувальні машини. У комплексі з ними працюють трелювальні трактори з маніпулятором та з пачковим захватом. Однак

трелювальні трактори з пачковим захватом більш ефективні на операції трелювання за рахунок переваг технологічного обладнання.

Щільність ґрунту є основною характеристикою його фізико-механічних властивостей і належить до найважливіших факторів, що визначають його родючість та інтенсивність фізико-хімічних і біологічних процесів, які відбуваються в ньому та впливають на лісовідновлення.

Тому комплексна механізація лісозаготівель повинна передбачати застосування таких систем машин і технологій, які б задовольняли лісівничо-екологічним вимогам проведення лісозаготівельних робіт у конкретних природно-виробничих умовах того чи іншого лісопромислового регіону України.

Окрім цього, трелювальні трактори можуть використовуватись у сільському господарстві під час проведення робіт із розчищення територій від деревно-чагарникової рослинності, підготовки земель до сільськогосподарського використання, створення полезахисних лісосмуг, а також під час догляду за лісовими насадженнями аграрних підприємств. Крім того, така техніка застосовується для транспортування деревини, пнів та інших великогабаритних матеріалів у господарствах, що поєднують сільськогосподарську та лісогосподарську діяльність.

У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на підвищення продуктивності трелювальних тракторів з пачковим захватом з урахуванням вимог до технології проведення лісозаготівельних робіт, зокрема зниження впливу рушія трактора на лісовий ґрунт, є актуальними.

ГЛАВА 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальні відомості про первинний транспорт лісу

Однією з основних операцій технологічного процесу лісосічних робіт є трелювання деревини – первинна складова транспорту лісу, тобто процес переміщення дерев, хлестів, напівхлестів або сортиментів від місця валки деревини до місця навантаження на лісовозний транспорт [4].

Трелювання дозволяє зібрати ліс з площі в одне місце, а також зменшити протяжність вусів лісовозних доріг і знизити обсяг підготовчих та допоміжних робіт, пов'язаних із транспортним освоєнням лісосировинної бази. Процес трелювання – найтрудомісткіший і найенергоємніший процес, оскільки виконується у виключно важких умовах, пов'язаних із подоланням численних перешкод у вигляді пнів, хмизу, валунів та ін.

Основним обладнанням, що застосовується нині на трелюванні деревини, є трелювальні трактори, які можуть мати як гусеничний, так і колісний рушій.

Аж до 1948 року трелювальні трактори були малопристосовані для роботи в лісі тракторами загального призначення. Вони здійснювали трелювання пачок деревини волоком, яка переміщувалася при повному контакті з поверхнею руху, оскільки в той час у тракторів, що використовувалися на трелюванні деревини, було відсутнє спеціальне технологічне обладнання для формування пачок та їх трелювання у напівзануреному положенні [4]. У 1946 році були розпочаті роботи зі створення спеціального лісопромислового трактора. Основним призначенням машини мало стати трелювання дерев або хлестів у напівзануреному положенні.

У квітні 1948 року трелювальний трактор КТ-12 після проведення широкомасштабних лабораторних і виробничих випробувань у ряді лісгоспів був рекомендований до серійного випуску, який був розпочатий у січні 1949 року.

Ці трактори оснащувалися лебідкою для формування пачки та щитом для навантаження деревини на коник трактора. Слід відзначити нововведення, які були закладені в цю машину. Це ходова система з котками великого діаметра та балансирною підвіскою, що дозволяло значно збільшити дорожній просвіт, а

також були збільшені, порівняно із сільськогосподарськими тракторами та тракторами загального призначення, передній і задній кути нахилу гілок гусениць, що дозволяло забезпечити хороше подолання різних перешкод на лісосіці [1].

Розвиток і вдосконалення трелювального трактора відбувалося в умовах суперечливих пропозицій і вимог. Однак вдала компоновка трактора, яка дає можливість розміщувати на ньому технологічне обладнання та вантаж, зробила його базовою лісовою машиною, що зайняла важливе місце в типажі тракторів нашої країни [1, 6].

Нині в серійно випускаються трелювальні трактори, що застосовуються на рівнинній місцевості та на схилах до 22° влітку і 14° взимку.

Переміщення пачок дерев або хлестів може здійснюватися кількома способами.

Нині тракторне трелювання дерев, хлестів і напівхлестів здійснюється у напівзануреному та напівпідвішеному положенні (вершинами або комлями вперед). При трелюванні у напівзануреному стані один кінець трельованої пачки завантажений на трелювальну машину, а інший волочиться по землі, що здійснюється тракторами ТДТ-55А та ТТ-4М, які мають канатно-чокерне обладнання, а також створеними на їх базі тракторами для безчокерного трелювання деревини ТБ-1М і ЛП-18Г, обладнаними гідроманіпулятором із кліщовим захватом і кониковим затискним пристроєм.

При трелюванні у напівпідвішеному положенні одна частина пачки підвішена на рамі технологічного обладнання, а інша волочиться по землі. Такий спосіб трелювання попередньо сформованих пачок або пакетів дерев передбачений на тракторах ЛТ-154 і ЛТ-89, які мають гусеничний рушій, а також К-703 і ЛТ-157, що мають колісний рушій.

При трелюванні у завантаженому положенні пачка повністю завантажена на трактор. Такий спосіб трелювання використовують різного роду форвардери при сортиментній технології заготівлі деревини.

Доцільність застосування колісних або гусеничних трелювальних тракторів у кожному конкретному випадку регламентується ґрунтово-ґрунтовими умовами, лісівничими та технологічними вимогами.

Трелювання лісу тракторами здійснюється як по спеціально підготовлених волоках, так і по цілині. Продуктивність трелювальних машин значною мірою залежить від якості та стану поверхні руху. Тому спеціально підготовлені волоки повинні прокладатися з дотриманням як лісівничих, так і технологічних вимог і підтримуватися у належному стані, на що витрачається значна частина обсягу підготовчих і допоміжних робіт [5].

Лісосічні роботи належать до числа добувних виробництв, вони значною мірою залежать від природно-виробничих умов, які відрізняються виключно великою різноманітністю таксаційних характеристик лісосировинної бази, кліматичних умов, рельєфу місцевості [2].

Вибір тієї чи іншої системи машин для лісозаготівель також залежить і від типу технологічного процесу, який передбачає вивезення з лісосіки дерев, хлестів або сортиментів.

Як зазначалося вище, раніше всі роботи в лісі виконувалися без будь-якої механізації. Зараз же дослідники намагаються повністю виключити ручну працю у технологічному процесі заготівлі деревини. Для цього вже виготовлені та серійно випускаються валочно-трелювальні машини, здатні працювати у режимі як валка-трелювання, так і валка-пакування, а також валочно-пакувальні машини, що працюють у режимі валка-пакування. З точки зору продуктивності в системі з цими машинами найбільш доцільним є використання тракторів із пачковим захватом, які здійснюють трелювання у напівпідвішеному стані попередньо сформованих пачок деревини та забезпечують найбільшу продуктивність і значне скорочення частки ручної праці на операції трелювання лісу.

Крім підбору і трелювання пачок дерев ці трактори можуть виконувати ряд інших технологічних операцій: вирівнювати комлі пачок деревини на верхньому

складі або навантажувальному пункті, окучувати стрельовані пачки у щільні штабелі [7].

1.2 Технологія роботи трелювальних тракторів з пачковим захватом

Перший гусеничний трелювальний трактор з пачковим захватом ЛТ-89 на базі ТДТ-55 був розроблений і виготовлений у період з 1974-1975 рр., його технологічне обладнання включало в себе опорну раму, дугоподібну стрілу, кліщовий захват, гідрообладнання, лебідку та органи керування. Для надійного утримання дерев або хлестів у захваті було передбачено використання тросової петлі. На закордонних тракторах надійне утримання дерев або хлестів забезпечується конструктивними особливостями захвату [1]. У 1977 році була розроблена подібна машина на базі трелювального трактора ТТ-4. У 1978 році під маркою ЛТ-154 вона надійшла у серійне виробництво [1].

Виробничо-технічний досвід показав доцільність застосування гусеничних трелювальних тракторів з пачковим захватом при роботі в одній технологічній схемі з валочно-пакувальною машиною ЛП-19. Порівняно з колісними тракторами з пачковим захватом, гусеничні, хоча і працюють на менших швидкостях, мають високу прохідність в умовах слабких ґрунтів і при глибокому сніговому покриві. За даними виробничої експлуатації, гусеничні машини ЛТ-154 досягають продуктивності до 200 м³ за зміну і більше [1, 4, 9].

Час, необхідний на захват пачки у трактора ЛТ-154, становить 2 хвилини, а її скидання на навантажувальному майданчику – 10 секунд. Час на проходження трактором відстані трелювання у вантажному та порожньому стані такий самий, як і у трактора ТТ-4 з канатно-чокерним обладнанням.

Аналіз роботи використовуваних машин показав, що трактор ЛТ-154 працює більш ефективно, ніж трактор для безчокерного трелювання ЛП-18А, в основному за рахунок переваг кліщового захвату (порівняно з гідроманіпулятором). У зв'язку з тим, що трактор ЛТ-154 захоплює одразу весь пакет, підготовлений машиною ЛП-19, тоді як ЛП-18А набирає пачку по одному дереву або захоплює декілька тонкомірних дерев [4].

Крім того, продуктивність трактора з пачковим захватом може бути підвищена за рахунок більш повного завантаження трелювальної машини шляхом формування двох пачок повалених дерев в одну. Виробничо-технічний досвід показує [4], що при такій технології роботи годинна продуктивність машини може бути підвищена на 30...40%.

Виробничий досвід [13] показує, що для досягнення високої продуктивності трактора з пачковим захватом необхідно, щоб об'єм пачок, сформованих валочно-пакетувальною машиною, дорівнював 6...8 м³. Таким чином, продуктивність трактора значною мірою залежить від об'єму пакета дерев.

За кордоном трелювальним тракторам з пачковим захватом також дають високу оцінку. Компанія «Тімберджек» випускає широкий асортимент таких тракторів, доцільність їх застосування підтверджена виробничо-технічним досвідом закордонних лісозаготівельників. Так у Південній Африці проводилося випробування колісного трелювального трактора з поворотним пачковим захватом «Тімберджек-460», який працює в одній системі з валочно-пакетувальною машиною. Це випробування ще раз довело ефективність застосування таких тракторів [7, 8, 9].

Однак компанія «Тімберджек» випускає трелювальні трактори з пачковим захватом, які мають тільки колісний рушій.

З проблемою експлуатації таких тракторів на ділянках з погіршеними ґрунтово-ґрунтовими умовами зіткнулася компанія «Такер Тімбер Харвестинг» м. Карієр (штат Міссісіпі). Виходом із цієї ситуації було будівництво лежневих доріг, по яких безпосередньо здійснювалося трелювання деревини, що призвело до збільшення обсягу підготовчих робіт і втрат деревини [7, 9].

Випробування колісного трактора з пачковим захватом ТЛК4-01, показали його хорошу прохідність при трелюванні взимку як по волоках, так і по сніговій цілині. Однак на заболочених ділянках і в період надмірного зволоження ґрунту спостерігалося швидке руйнування ґрунтового покриття, що призводило до різкого зниження працездатності волока і утруднення руху трактора [4].

У період бездоріжжя на деяких підприємствах трелювальний трактор ЛТ-154 тимчасово переобладнують для тросово-чокерного трелювання і переходять на технологію трелювання хлестів за вершину, що значно покращує прохідність трактора [5].

У процесі переобладнання на стрілі трактора від'єднують гнучкі шланги гідроприводу гідроциліндра захвату, а на місцях з'єднання шлангів з гідроприводом встановлюються заглушки. На підвісці захвату від'єднують тяги захвату, після чого на звільнену вісь навішується блок від навантажувального щита трактора ТТ-4. Через блок пропускається збиральний трос з чокерами.

Зачокеровані за вершини хлести підтягуються лебідкою до трактора і підіймаються за допомогою стріли. При трелюванні пачка також знаходиться у напівпідвішеному стані. У випадку буксування трактора вона може бути скинута, що дозволить трактору вийти на твердий ґрунт і знову підтягнути її до себе за допомогою лебідки.

Досвід експлуатації переобладнаних тракторів ЛТ-154 свідчить про те, що їх стріла має необхідну міцність для роботи у новому режимі. Переобладнані трактори працездатні та забезпечують на слабких ґрунтах трелювання пачок хлестів об'ємом до 8 м³ [2, 8].

Подвійний набір і скидання пачки, а також незначне збільшення відстані за рахунок трелювання компенсується збільшенням навантаження на рейс і швидкостей руху. Тому різкого зниження продуктивності тракторів на трелюванні не спостерігається. При розробці лісосіки з двома магістральними волоками із безчокерних тракторів для даної технології, особливо з точки зору вимог збереження підросту, найбільш прийнятними є трактори ЛТ-154 [5].

1.3 Техніко-експлуатаційна оцінка трелювальних тракторів

Успішне виконання технологічного процесу лісосічних робіт напряму залежить від технічного рівня лісозаготівельних машин, на роботу яких впливає енергонасиченість, рейсове навантаження, а також поєднання енергонасиченості та властивостей волока, які в комплексі значною мірою визначають їх

експлуатаційну ефективність. Дослідження експлуатаційної ефективності трелювальних тракторів детально висвітлені у роботах [3, 4, 6, 12]

Під експлуатаційними властивостями розуміють конкретні прояви властивостей трелювального трактора при взаємодії з властивостями волока. Експлуатаційні властивості забезпечують виконання робочих функцій трактора і визначають його експлуатаційну ефективність. До показників, що характеризують експлуатаційні властивості трелювального трактора, належать швидкість руху, дотична сила тяги, втрати на самопересування, втрати від буксування та паливна економічність. Експлуатаційні властивості залежать від відповідності характеристик, які відображають потенційні властивості трелювального трактора, умовам експлуатації [3].

У зв'язку з тим, що трелювальні трактори експлуатуються у вкрай важких умовах бездоріжжя, властивості волока мають великий вплив на експлуатаційну ефективність і надійність трелювального трактора.

Оснащення трелювальних тракторів новим технологічним обладнанням для валки та формування пачок лісу призводить до значного збільшення маси машини, середнього тиску на ґрунт і сил опору руху. На перезволожених ґрунтах з низькою несучою здатністю та при великій глибині снігового покриву у валочно-пакувальних машин і трелювальних тракторів часто спостерігається погіршення маневреності та прохідності внаслідок збільшення сил опору руху і невисоких зчіпних властивостей.

Із цього випливає, що до експлуатаційних властивостей можна віднести ще один фактор – прохідність, яка характеризує здатність машини здійснювати рух з певною силою тяги в конкретних природно-виробничих умовах. Ця властивість машини впливає на енергоємність процесу трелювання [8, 14, 15].

Для порівняльної оцінки прохідності були проведені випробування закордонних колісних тракторів «Катерпіллер-518» (К-518), обладнаного кліщовим захватом для трелювання у напівпідвішеному положенні, «Джон Дір-540А» (ДД-540А), оснащеного канатно-чокерним обладнанням для трелювання

у напівпідвішеному положенні, та гусеничного безчокерного трелювального трактора «ТБ-1М».

Утворення колії у трактора ТБ-1 стабілізувалося після 11 проходу. У колісних тракторів спостерігалось її помітне збільшення від 6 до 9 проходу, після чого відбувалася деяка стабілізація цього процесу, а потім знову різке збільшення. У колісного трактора «К-518» буксування від загальних витрат часу становило 3%, а у трактора «ТБ-1» буксування не було відзначено. При першому пробуксовуванні коліс оператор «ДД-540А» скидав пачку, переїжджав на нове місце і підтягував її лебідкою, на що витрачалося майже 8% загальних витрат часу. Об'єм пачки в середньому за період випробувань у «ДД-540А» і «К-518» відповідно становив 5,3 і 2,3 м³, хоча потужність двигуна трактора «ДД-540А» на 37% менша, ніж у «К-518». Оператор трелювального трактора ТБ-1 міг регулювати об'єм пачки виходячи з конкретних умов прохідності, у середньому вона становила 3,2 м³.

Проведені дослідження показали, що найбільша продуктивність була досягнута машиною «ДД-540А». Що стосується продуктивності трактора ТБ-1, то вона близько наближається до машини «ДД-540А». Однак слід зазначити, що трелювальний трактор «ДД-540А», оснащений канатно-чокерним обладнанням, трелював попередньо зачокеровані пачки, що, ймовірно, сильно завищило його продуктивність порівняно з реальними умовами експлуатації [3, 6].

Особливий вплив на ефективність роботи трелювального трактора має його енергонасиченість – відношення експлуатаційної потужності двигуна до експлуатаційної маси трактора. Існує певна класифікація тракторів за енергонасиченістю, яка представлена у табл. 1.1 [6, 10].

В сучасному тракторобудуванні існують тенденції підвищення енергонасиченості шляхом збільшення як крутного моменту, так і частоти обертання колінчастого валу двигуна, що дозволяє в деяких умовах експлуатації підвищити ефективність роботи трелювального трактора.

Таблиця 1.1 Клас і рівень енергонасиченості трелювальних тракторів

Клас енергонасиченості	Рівень енергонасиченості	Показник енергонасиченості, кВт/т
Перший	Особливо великий	Більше 10
Другий	Великий	Від 8,1 до 10
Третій	Середній	Від 6,1 до 8
Четвертий	Малий	Менше 6

Показники енергонасиченості лісозаготівельних машин і трелювальних тракторів представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Показники енергонасиченості лісозаготівельних машин і трелювальних тракторів

Призначення машини	Марка машини	Питома енергонасиченість, кВт/т	Відносний показник маси технологічного обладнання	Питомий тиск на ґрунт, кПа
Валочна	ВМ-4	5,1	0,36	52
Валочно-пакетувальна машина	ЛП-2	4,5	0,70	65
	Л П-19	3,9	—	76
Валочно-трелювальна машина	ЛП-17	4,8	0,58	59
	ЛП-49	4,4	0,68	68
	ВМ-4А	4,6	0,45	55
Гусеничні трелювальні трактори з маніпулятором	ТБ-1	5,8	0,35	51
	ЛП-18	5,0	0,45	58

Гусеничі трелювальні трактори з кліщовим захватом	ЛТ-89	5,9	0,33	50
	ЛТ-154	5,5	0,32	53
	ЛТ-187	5,9	—	42
	МЛ-137	5,8	—	44
Колісні трелювальні трактори з кліщовим захватом	ЛТ-157	10,6	0,33	180
	ЛТ-40	9,0	0,33	220
	TJ-560C	8,7	—	—
Гусеничні трелювальні трактори з канатно- чокерним обладнанням	ТДТ-55А	6,6	0,20	45
	ТТ-4	6,1	0,21	46
	ТТ4М	6,6	—	38
Форвардери	ШЛК6-04	6,2	—	—
	TJ 1110	8,9		85,5

Однак проведені дослідження показали, що недостатня або завищена енергонасиченість призводить до зниження експлуатаційної ефективності роботи трактора [5, 8, 9].

Автори роботи [2] стверджують, що збільшення енергонасиченості трелювальних тракторів доцільно проводити із заміною механічної трансмісії на гідравлічну, оскільки потужність двигуна трелювального трактора з механічною трансмісією реалізується лише на 60...80%, тоді як застосування гідравлічної трансмісії підвищує коефіцієнт використання потужності силової установки на 15...20%.

Отримати високу експлуатаційну ефективність трелювальних тракторів одного рівня енергонасиченості в різних природно-виробничих умовах важко без певних технологічних рішень.

Енергонасиченість трелювального трактора впливає на продуктивність. Із збільшенням енергонасиченості в однакових умовах експлуатації продуктивність зростає за характеристикою, близькою до лінійної.

З більшою ефективністю проявляється вплив енергонасиченості на продуктивність при трелюванні великих пачок на важких за коефіцієнтом опору волоках.

Оцінка впливу рейсового навантаження, умов експлуатації та енергонасиченості на продуктивність трактора показали, що підвищення технологічної продуктивності спостерігається зі збільшенням рейсового навантаження до певної межі.

Встановлено, що для кожного поєднання енергонасиченості та властивостей волока існує оптимальне рейсове навантаження, при якому досягається максимальна продуктивність трелювання, мінімальна технологічна витрата палива та навантаженість конструкції [4].

Автор роботи [10] наводить такі дані щодо впливу енергонасиченості на продуктивність: при рівних рейсових навантаженнях на кожні 10% підвищення енергонасиченості було отримано в середньому 5...11% збільшення продуктивності. Як зазначає автор, особливо велике збільшення технологічної продуктивності спостерігається при трелюванні великих пачок трактором високої енергонасиченості.

Проведені експериментальні дослідження трелювальних тракторів різної енергонасиченості на полігоні, зі змінними фізико-механічними властивостями ґрунту дозволили встановити вплив на техніко-експлуатаційні показники енергонасиченості, умов експлуатації та рейсового навантаження. Аналіз досліджень показав, що:

- енергопродуктивність і тяговий показник зростають зі збільшенням рейсового навантаження, але в усіх умовах експлуатації максимуму не спостерігається;
- енергонасиченість має незначний вплив на енергопродуктивність і тяговий показник;
- показник тягової ефективності має максимум;
- технологічна продуктивність підвищується зі збільшенням рейсового навантаження, а її максимум збігається з максимумом показника тягової ефективності [5].

Однак для конкретних умов експлуатації існують граничні рейсові навантаження, підвищення яких призводить до погіршення всіх показників експлуатаційних властивостей та ефективності. Крім того, рейсове навантаження обмежується вантажопідйомністю трактора, а також габаритними розмірами технологічного обладнання та таксаційними показниками деревостану, які можуть ускладнити можливість збору на тракторі пачок великих об'ємів.

Значний вплив на рейсове навантаження має технологія проведення лісосічних робіт. Часто граничне рейсове навантаження на трактор обмежується не його тягово-зчіпними властивостями, а технологічними факторами.

Експериментальні дані [3], отримані для тракторів показали такі результати: при трелюванні пачки хлестів вершинами вперед технологічна продуктивність збільшується на 20%, а енергоємність процесу знижується на 6% порівняно з трелюванням пачки деревини до обрізання сучків. А при трелюванні тієї ж пачки хлестів за комлі технологічна продуктивність зростає на 16% при зниженні енергоємності на 19% порівняно з трелюванням дерев.

Окрім несучої здатності ґрунтів значний вплив на продуктивну роботу трелювальних машин має глибина снігового покриву. Результати проведених досліджень показали, що високопродуктивна робота трелювального трактора ЛТ-154 можлива при глибині снігового покриву до 0,8 м. При перевищенні даної межі продуктивність роботи трелювальної машини починає різко падати через зростання сил опору руху і зниження активної зчіпної ваги машини. Реальний

спосіб підвищення продуктивності на трелюванні – це підготовка трелювальних волоків у зимовий період шляхом видалення шару снігу з волока за допомогою снігоочисника, встановленого на трелювальному тракторі [6].

Вищесказане дозволяє стверджувати, що вдосконалення лісових машин повинно здійснюватися на основі технічних рішень, які реалізуються з урахуванням загальних закономірностей у розвитку техніки, дозволяють підвищити експлуатаційну ефективність лісозаготівельних машин і зайняти важливе місце у напрямку активізації розвитку конкретних об'єктів машинобудування.

1.4 Екологічна оцінка лісових машин і технологій

Світовим співтовариством загальноновизнано, що лісові ресурси та пов'язані з ними землі повинні управлятися так, щоб задовольняти соціальні, економічні, екологічні, культурні та духовні потреби нинішніх і майбутніх поколінь. Крім того, у міру усвідомлення суспільством загрози деградації та руйнування лісів, споживачі захотіли мати гарантію того, що, купуючи продукцію лісового комплексу, вони не сприяють знищенню лісу, а навпаки, сприяють збереженню лісових ресурсів для майбутнього. У відповідь на ці вимоги на ринку почали з'являтися програми сертифікації лісової продукції [5].

У зв'язку з цими змінами лісове господарство і лісові галузі промисловості нашої країни змушені адаптуватися до нових ринкових умов та екологічних вимог до лісової продукції.

У вирішенні цих завдань усе більшу роль відіграє організація лісоуправління на принципах сталості та розвитку лісової сертифікації, як інструмента оцінки того, чи відповідає ведення лісового господарства та лісокористування вимогам сталого лісоуправління.

Організація сталого лісоуправління – комплексна проблема, що охоплює всі сфери діяльності лісового сектору. Пов'язані з нею заходи спрямовані як на збереження і примноження лісів, так і на застосування природооощадних техніки і технологій на лісозаготівлях [4].

У лісозаготівельній промисловості найбільша екологічна шкода виникає при розробці лісосік і вивезенні лісу. Наслідки цих техногенних факторів відбуваються у двох основних напрямках знищення підросту і деформація лісових ґрунтів з їх ущільненням і мінералізацією [7, 8, 9, 10].

Порушення ґрунтово-рослинного шару по площі лісосіки зумовлені технологічними факторами: густотою мережі волоків, їх транспортною завантаженістю, протягуванням по волоку пакета хлестів (дерев) у напівзавантаженому або напівпідвішеному стані, падінням дерев при валці, будівництвом вусів і лісонавантажувальних пунктів, механізованим очищенням лісосік від порубкових залишків.

Руйнування ґрунтово-рослинного шару лісосіки відбувається, перш за все, від колісутворення, інтенсивність якого залежить від використовуваної системи машин і прийнятої технологічної схеми розробки лісосіки.

Глибока колія викликає порушення гідрологічного режиму ґрунту, що у свою чергу призводить до його мікрозаболочування при рівнинному рельєфі, а при горбистому та гірському може призвести до водної ерозії. Крім того, значна глибина колії призводить до втрати прохідності лісосічних машин при перевищенні кліренсу і таким чином лімітує працездатність волока [8, 10, 18].

Залежно від застосовуваних машин, організації лісосічних робіт, механічного складу та вологості ґрунтів у період лісозаготівель лісорослинні умови погіршуються на 20...55% і більше площі лісосіки. Вивчення ґрунтових умов і природного відновлення на різних частинах вирубок дозволяє стверджувати, що зниження родючості ґрунтів, зумовлене сильним руйнуванням ґрунтового покриву в ході лісозаготівель, буде негативно позначатися на рості деревних порід протягом кількох десятиліть [3, 5, 9].

Авторами [48] встановлено, що після суцільної рубки лісу відбуваються три різні види ущільнень: фізичне, вторинне та екологічне. Перші два види ущільнення ґрунту відбуваються у колії. Фізичне ущільнення – одномоментне, відбувається під час безпосереднього впливу машин. Воно поширюється на глибину до 40...50 см і в боки від волока до 20...40 см.

Вторинне ущільнення відбувається у колії протягом тривалого (14...16 років) періоду, а природне розущільнення ґрунтів у колії триває близько 50 років.

Екологічне ущільнення відбувається у пасіці. Воно пов'язане з видаленням лісового пологу і не залежить від технології заготівлі та машин.

Період розущільнення ґрунтів у пасіці триває 25...30 років.

Свого часу завдяки концентрованим рубкам вдалося перебазувати лісозаготівлі у багатолісні райони і забезпечити потребу країни у деревині. Однак після проведення концентрованих рубок у багатьох випадках знижується родючість ґрунту через заболочування рівнинних площ і ерозію ґрунту на схилах. Вважається, що для утворення 1 см гумусного шару сірих лісових ґрунтів потрібно 1000 років, змивається ж такий шар на схилах крутизною понад 10° під час першої ж зливи після рубки [8].

З природоохоронної точки зору лісозаготівельні машини повинні відповідати таким вимогам: бути маневреними, швидкісними, забезпечувати мінімальний вплив на ґрунт і підріст.

Крім того, застосування таких машин повинно бути економічно виправданим і на невеликих лісосіках, з великою розосередженістю лісового фонду. Як зазначає автор роботи [6], в Україні традиційно використовується гусенична техніка, яка чинить менший (порівняно з колісними тракторами) тиск на поверхню ґрунту і має хорошу прохідність у зимових умовах. Однак гусеничні машини маломаневрені і важкі. При їх маневруванні пошкоджується поверхневий шар ґрунту. Тому гусеничний варіант не можна вважати лояльним щодо природи. Як він зазначає далі, використовуючи колісні трактори, можна позбутися несприятливого впливу гусеничного рушія на ґрунт. Однак при роботі на слабких ґрунтах кількість коліс повинна бути збільшена, і вони повинні бути розширені, щоб знизити тиск на ґрунт [4].

Проведені порівняльні дослідження впливу систем машин («харвестер + форвардер» і МП-5 «Урал» + ТДТ-55) на ґрунт (за механічним складом суглинок середній, за зволоженням свіжий) показали такі результати. При 12...14 кратному пересуванні харвестера і форвардера по лісосіці твердість ґрунту на

колії проходів зростала на 75...103%, при 20...25 кратному переміщенні ТДТ-55А – на 14...49% відносно непорушених ділянок лісосік. Глибина колії на перезволожених ділянках лісосік при транспортуванні сортиментів досягала 60...65, а хлестів – 15...20 см. Це пов'язано з тим, що тиск на ґрунт фінської техніки у 1,5 раза більший, ніж у ТДТ-55А [1]. Дані експериментальних досліджень представлені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Твердість ґрунту на колії технологічних коридорів

Технологія	Твердість ґрунту, кг/см ² , при глибині заміру				
	5	10	15	20	25
Харвестер + Форвардер	19,3	26,4	32,9	35,9	34,1
МП-5 Урал + ТДТ-55	8,3	14,7	18,6	21,9	22,5

Застосовувана при рубках догляду техніка, ущільнюючи ґрунт, знижує приріст дерев. Наприклад, у березняку зеленчуковому на дерново-сильнопідзолистому середньосуглинковому свіжому ґрунті за 7 років після першого прийому поступової рубки приріст за діаметром у ялин, що росли у 3-метровій смузі вздовж волока, по якому трактором ТДТ-40М було зроблено 26...50 рейсів, виявився на 20% нижчим, ніж у дерев, що ростуть між волоками [1, 3, 7].

Так, якщо у вирубаному насадженні була навіть невелика домішка осики, то після лісозаготівель ця порода посилено відновлюється, тому що трактори в процесі трелювання ніби живцюють кореневі системи, сприяючи тим самим рясній появі кореневих паростків. Глибока мінералізація ґрунту з оголенням нижніх малородючих і ущільнених горизонтів, рясна поява осикової порослі знижують ефективність лісовідновлювальних робіт і приріст головних деревних порід, ускладнюють догляд за лісовими культурами. У результаті впливу лісозаготівельної техніки водно-фізичні властивості та родючість ґрунтів не відновлюються повною мірою протягом 30...40 років [1, 7].

За даними [3] статичний тиск лісової машини на ґрунт понад 80 кПа перешкоджає розвитку дрібних коренів, концентрація яких у гумусному шарі

досягає 200...500 м/м². При тиску на ґрунт 30...50 кПа їх ріст може бути ускладнений. Тиск на ґрунт 90 кПа зменшує приріст молодняку на 15% протягом 3...4 років після впливу.

Автори роботи [2] дають таку лісівничу оцінку машин за збереженням підросту. Встановивши при дослідних рубках, що застосування ВПМ ЛП-19 і ЛП-2 з трелювальними тракторами ЛТ-157 на твердих ґрунтах і ЛТ-154 на слабких дозволяють зберігати влітку на пасіці 62...67% дрібного і середнього підросту та 50...55% великого, вони зробили висновок, що ці машини відповідають вимогам лісового господарства, хоча продуктивність ВПМ за рахунок підйому дерева над підростом знижується на 20...25%.

При трелюванні за вершини дерев за допомогою ЛП-18А можна зберегти 50...69% тонкоміру. Пошкодження ґрунту при цьому не перевищують 10% площі лісосіки. Однак продуктивність цих машин, порівняно з трелюванням за комлі, знижується на 11,2% [8].

1.5 Взаємодія трелювальних систем з лісовими ґрунтами

Антропогенний вплив на ґрунти має прямий і непрямий характер і, як правило, призводить до порушень ґрунту, тобто до зміни складу і властивостей ґрунту.

Ґрунти можна розглядати як непорушені – існуючі в природних умовах і порушені – перетворені та змінені людиною. До останніх належать сільськогосподарські угіддя, ґрунти міст, агропромислових районів, а також лісові ґрунти, змінені під дією лісозаготівельної техніки.

За ознаками змін розрізняють такі основні типи руйнувань ґрунту:

- повне знищення ґрунту, тобто видалення ґрунтового шару, в результаті якого відбувається вихід на поверхню ґрунтоутворюючих порід;
- перекриття ґрунтового профілю різними матеріалами (відходами, дорогами, покриттями та ін.);
- ерозія ґрунтів – руйнування ґрунтів і винесення пухких компонентів ґрунтового матеріалу водою і вітром. Водна ерозія відбувається під дією

поверхневого стоку, дощових і талих вод. Вітрова ерозія являє собою видування дрібнозему з верхніх ґрунтових горизонтів, особливо в посушливі періоди, при сильних вітрах. Відсутність рослинності призводить до посилення негативних наслідків вітрової ерозії.

– механічні порушення – ущільнення, перезволоження, пересушування, утворення щільних кірок, пірогенні порушення (є результатом пожеж). Механічні порушення зумовлюють погіршення фізичних (водно-теплових, повітряних), хімічних властивостей ґрунтів;

– забруднення ґрунтів – накопичення і поширення в них речовин, не пов'язаних із ґрунтоутворенням. Такі речовини можуть належати як до природних компонентів (солі, нафта, нафтопродукти), так і до забруднювачів. У результаті забруднення ґрунтів знижується їх родючість, а сам ґрунт може стати згубним середовищем для існуючих у ньому організмів.

Особливий інтерес у дослідників викликають механічні порушення ґрунтового покриву, які викликані впливом рушіїв сільськогосподарської та лісозаготівельної техніки і, як наслідок, можуть призводити як до повного знищення ґрунтів, так і до водної та вітрової ерозії.

Протягом кількох десятиліть вирішується проблема взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин і знарядь з ґрунтом. Основоположником створення нової дисципліни «Землеробська механіка» був професор В.П. Горячкін, який, формулюючи її особливості, писав: «землеробська механіка служить посередницею між механікою мертвого і живого тіла» [7].

Параметри сучасних тракторів, у тому числі й трелювальних, автомобілів, причепів і сільськогосподарських машин не завжди відповідають вимозі збереження ґрунтового шару. Підвищення щільності ґрунту тягне за собою збільшення тягового опору на 25% по сліду гусеничних тракторів, на 40% колісних, 65% вантажних автомобілів і причепів [8].

Для лісопромислових тракторів і лісогосподарських машин на їх базі показник тиску на ґрунт регламентується ДСТУ 27141-86, ДСТУ 27546-87.

Згідно із сучасними уявленнями, вплив рушія трактора на ґрунтову основу визначається діючими максимальними тисками, що покладено в основу ДСТУ 26955-86, який встановлює норми максимальних тисків на ґрунт для мобільної сільськогосподарської техніки, однак вони однакові як для колісного, так і для гусеничного рушія (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Норми тиску рушіїв на ґрунт за ДСТУ 26955-86

Вологість ґрунту в шарі 0-30 см	Максимальний тиск на ґрунт колісного та гусеничного рушія, кПа, не більше	
	весняний період	літньо-осінній період
Більше 0,9 НВ	80	100
Від 0,7 НВ до 0,9 НВ	100	120
Від 0,6 НВ до 0,7 НВ	120	140
Від 0,5 НВ до 0,6 НВ	150	180
Від 0,5 НВ і менше	180	210

Згідно з лісівничими вимогами [7] для лісозаготівельних і лісгосподарських машин при проведенні технологічних процесів лісосічних робіт і рубок догляду існують такі норми середніх тисків:

- для рубок головного користування 40...50 кПа;
- при проріджуванні та прохідних рубках 30...40 кПа;
- освітленнях і прочистках 20...40 кПа.

Таким чином, зазначені у стандартах і лісівничих вимогах нормативи питомих тисків лісових тракторів і агрегатів розроблені без урахування умов різних природно-кліматичних зон, типу ґрунту, його вологості та щільності [1, 7].

Вивчення взаємодії рушія лісопромислового трактора, зокрема трелювального, з лісовим ґрунтом є надзвичайно складним теоретичним завданням і важливою науково-технічною проблемою в науці про використання машин у лісових технологічних процесах [9].

Механізм впливу лісової техніки на ґрунт значно складніший, ніж у звичайних транспортних, сільськогосподарських та інших машин.

Пояснюється це специфічною системою сил, що сприймається машиною, сил, які впливають на ґрунт, а також надзвичайно складними умовами роботи машин. За способом прикладання сили, що впливають на ґрунт, поділяються на вертикальні (нормальні) та горизонтальні (дотичні). Вертикальні створюються масою машини, пачкою трелюваних дерев або хлестів, пакета сортиментів, навісних або причіпних знарядь або моментом сил підйому зрізаних дерев масою; горизонтальні – силою тяги дотичною або гаковою та силами опору.

Ущільненню піддається ґрунт на волоках, причому ущільнюється в основному дно колії. Воно викликається вертикальними навантаженнями, які передаються від машини на ґрунт тільки через рушії. Ущільнення ґрунту можливе також від комлів хлестів при трелюванні за вершину.

При трелюванні за комлі крони пачок майже не створюють нормальних навантажень. При досягненні граничних величин навантажень ущільнення супроводжується видавлюванням ґрунту по боках, тобто разом із прикладанням вертикальних сил. Якщо сила тяги машини на важких ділянках волока або на підйомах перевищує силу зчеплення, одночасно з ущільненням відбуваються зсуви і розпушування ґрунту.

Перемішування ґрунту відбувається від комбінованого впливу горизонтальних і вертикальних сил і в основному викликається дотичною силою тяги (F_K), що передається через гусениці машини, і силами опору (W), які виникають при волочінні вантажу. Ці ж сили, а також місцеві навантаження від ґрунтозачепів гусеничних і колісних машин сприяють розпушуванню ґрунту, щільність якого знижується.

Зсуви відбуваються під дією дотичних сил (F_K і W) і характеризуються зміщенням ґрунту в горизонтальному напрямку. Їх можна поділити на три види: видалення ґрунту, здирання і місцеві зсуви. Видалення ґрунту відбувається у технологічних цілях спеціальними землерийними машинами (бульдозерами, грейдерами). Здирання ґрунту відбувається в особливо важких умовах

експлуатації машин (при розворотах, буксуванні, а також при підтягуванні великих хлестів лебідкою). Здирання характеризується перемішуванням ґрунту на відносно невелику глибину (1...3 см). Місцеві зсуви ґрунту на (5...10 см) виникають при пробуксовуванні рушіїв і повороті машин у звичайному режимі [3, 7].

Дослідження, виконані в різних регіонах країни, показали, що механізовані заготівлі суттєво змінюють мікрорельєф, будову ґрунту, його фізичні та інші властивості. Ці зміни залежать від сезону заготівлі, способу трелювання, застосовуваних на трелюванні машин, організації лісосічних робіт, механічного складу ґрунту, його вологості в період трелювання та інших причин. Найбільш суттєві зміни виникають на тих лісосіках, де лісозаготівельні роботи проводилися в безсніжний період. При русі гусеничних тракторів по трелювальному волоку здирається трав'яний покрив і підстилка. При збільшенні кількості рейсів вони перетираються і перемішуються з верхніми мінеральними горизонтами ґрунту. У місцях руху трактора значно змінюється мікрорельєф лісосіки, фізичні властивості ґрунту, а отже його водний, повітряний, тепловий режими та інтенсивність фізико-хімічних і біологічних процесів, що в ньому відбуваються.

На лісовідновлювальні процеси великий вплив має мікрорельєф. Під впливом трелювання на одних ділянках лісосіки створюються мікрозниження, на інших мікропідвищення, крім того, суттєво змінюється будова і розташування верхніх ґрунтових горизонтів. Так, на підзолистих важких погано дренованих суглинкових і глинистих ґрунтах сходи з'являються тільки на мікропідвищеннях. У мікрозниженнях через надлишок вологи створюються несприятливі умови для проростання і росту сходів.

Поряд зі змінами об'ємної ваги і шпаруватості, під впливом трелювання збільшується щільність ґрунту, що створює несприятливі умови для розвитку кореневих систем і погіршує ріст деревних порід. Крім того, зменшення шпаруватості та збільшення щільності призводить до зниження водопроникності ґрунту [6].

У районах, де випадає невелика кількість опадів, здирання підстилки, викликане трелюванням, призводить до зменшення вологи в ґрунті.

Автор роботи [6] пропонує розподілити ґрунтово-ґрунтові умови за їх експлуатаційними показниками на 4 категорії.

До першої категорії віднесені лісосіки, на яких можлива робота протягом усього року, з невеликою перервою ранньою весною. До лісосік з таким типом ґрунтів можна віднести сухі піски, кам'яністі щебеністі ґрунти.

До другої категорії віднесені ґрунти, які допускають багаторазовий прохід машин по одному місцю (волоку). У періоди весняного й осіннього бездоріжжя несуча здатність падає незначно. До цієї категорії належать супіщані ґрунти, легкі суглинки, глинисті піски.

До третьої категорії віднесені ґрунти, вологість яких залишається значною протягом усього теплого періоду. Трактори швидко руйнують рослинний шар і утворюють глибокі колії на волоках. До таких типів належать суглинкові й глинисті ґрунти, супіски з глинистими прошарками.

До четвертої категорії належать найбільш несприятливі для лісоексплуатації категорії ґрунтів. Їх надмірне зволоження значно знижує прохідність трактора. У періоди бездоріжжя лісосіки стають зовсім непроїзними. Ця група ґрунтів характерна для насаджень на застійно-сирих і заболочених місцях.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ ТРЕЛЮВАЛЬНОГО ТРАКТОРА ТА ЙОГО ВПЛИВУ НА ЛІСОВИЙ ҐРУНТ

2.1 Теоретичні дослідження ущільнення ґрунту трелювальним трактором

Основні деформативно-міцнісні параметри ґрунту визначаються закономірностями взаємодії рушія машини та ґрунту, або закономірностями процесу «напруження-деформація». При русі трелювальних тракторів залежність «напруження-деформація» при певному тиску виражає певну глибину вдавлювання штампа або глибину колії від проходу трелювального трактора [6].

Теорія колієутворення ґрунтується на врахуванні зв'язку між вертикальним навантаженням, що діє на рушій, його геометричними параметрами та фізико-механічними властивостями ґрунту. Механіка впливу рушія трактора та трелюваної пачки з опорною поверхнею при русі трактора представлена на рис. 2.1, де G – сила тяжіння трактора; Q_1 і Q_2 – сила тяжіння пачки деревини, що припадає на коник трактора і ґрунт; P_f – сила опору коченню трактора; P_{fn} – сила опору ковзанню крони пачки деревини; P_k – дотична сила тяги; Z і Z_n – реакція ґрунту.

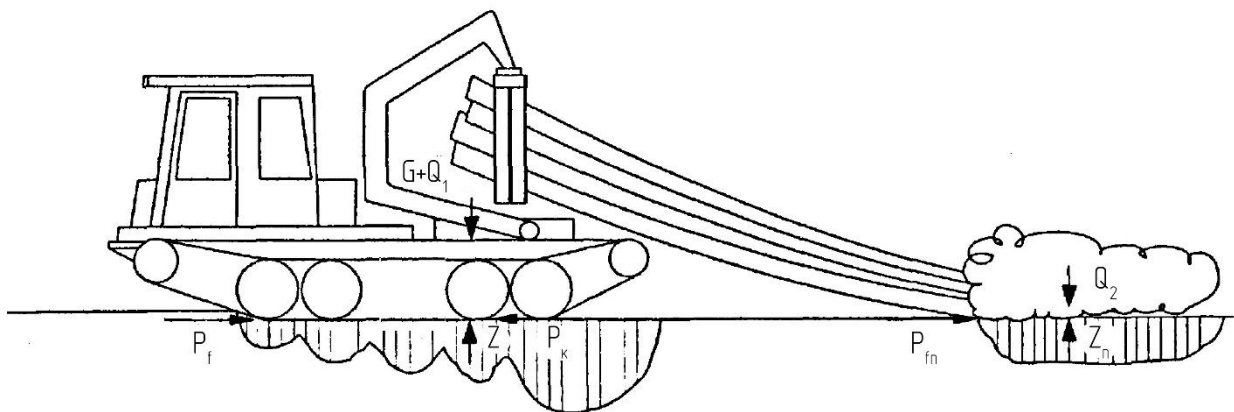


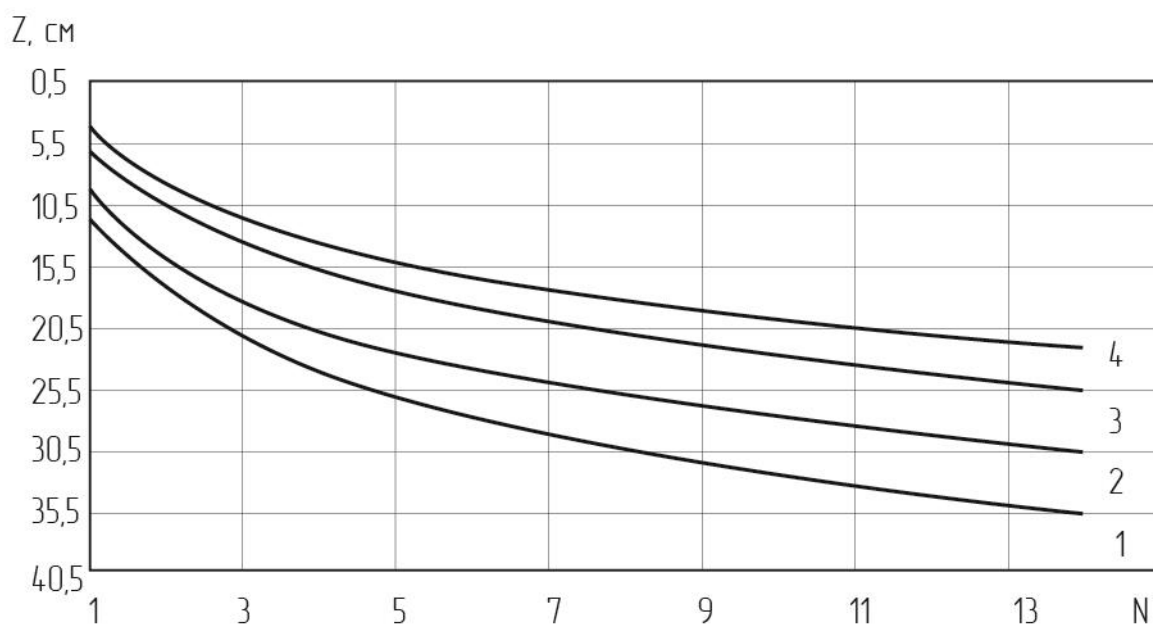
Рисунок 2.1 – Схема сил і епюра тисків рушія та деревини на ґрунт

Теоретичними та експериментальними дослідженнями [7] доведено, що за всіх інших рівних умов ступінь деформації ґрунту в контактi залежить від площі відбитка (штампа), через яку передається на ґрунт вертикальне навантаження.

Досвід і теорія показують, що чим більше навантаження на рушій трактора, тим більше зусилля зчеплення з ґрунтом потрібне для руху. Якщо зчеплення слабке – виникає часткове прослизання або буксування, тим самим інтенсивність колієутворення збільшується.

У теоретичних розрахунках іноді не враховується розподіл навантаження на рушій і тисків на ґрунт залежно від способу трелювання. У роботі [5] доведено, що зі збільшенням маси вантажу на щиті трактора центр тяжіння зміщується назад, що в підсумку впливає на темп колієутворення. Так темп осідання гусениць у ґрунт при одному проході трактора пропорційний величині зміщення центра тяжіння назад і становить 10%.

На підставі проведених раніше теоретичних і експериментальних досліджень у роботах [1, 2, 5, 7] були побудовані графіки (рис. 2.2) утворення колії трелювальними тракторами ЛТ-154, ТБ-1, ТТ-4, ТДТ-55 залежно від кількості проходів.



1 – ЛТ-154; 2 – ТБ-1; 3 – ТТ-4; 4 – ТДТ-55

Рисунок 2.2 – Графік колієутворення трелювальних тракторів в залежності від кількості проходів

При одноосьовій деформації відносно стиснення ґрунту під навантаженням визначається за відомим виразом такого виду:

$$s = \frac{\Delta Z}{H}, \quad (2.1)$$

яке пов'язане з відносною зміною щільності ґрунту

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0}, \quad (2.2)$$

де H – глибина поширення деформації; ρ_0 – початкова щільність

На ділянці ущільнення ґрунту під навантаженням деформованість характеризується модулем деформації [6, 7]:

$$E_0 = \frac{\omega b (P_2 - P_1) (1 - \nu_0^2)}{Z_2 - Z_1}, \quad (2.3)$$

де ω – коефіцієнт, що залежить від форми штампа; b – ширина штампа; Z_1 та Z_2 – осідання штампа, що відповідає тискам P_1 та P_2 ; ν_0 – коефіцієнт Пуассона.

Механічну модель в'язко-пружного тіла можна подати у вигляді послідовно з'єднаних елементів: пружного (пружини) і в'язкого (циліндра, наповненого рідиною, в якому переміщується дірчастий поршень). Таким чином, з урахуванням (2.1) і (2.2) отримаємо залежність, яка має такий вигляд:

$$\frac{Z_2 - Z_1}{H} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_0} = \frac{\omega b (P_2 - P_1) (1 - \nu_0^2)}{E_0 H}, \quad (2.4)$$

де H – глибина поширення деформації; ρ_2 , ρ_1 , ρ_0 – щільність ґрунту відповідно під тиском P_2 , P_1 і без навантаження.

Глибину поширення деформації визначимо аналітичним шляхом. Для цього складемо рівняння рівноваги сил, що діють на вибраний елемент однорідного ґрунту:

$$PLb - \left(P - \frac{\Delta P}{\Delta Z} \Delta Z \right) Lb = -2\tau \Delta Z b - 2\tau \Delta Z L, \quad (2.5)$$

де P – нормальне напруження; L і b – довжина і ширина штампа. Тоді:

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = -2\tau \left(\frac{b + L}{b \cdot L} \right) = -2\tau \alpha. \quad (2.6)$$

$$\text{де } \alpha = \left(\frac{b + L}{bL} \right)$$

Тоді при $L \ll b$, отримаємо:

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = -2 \frac{\tau}{b}. \quad (2.7)$$

Зв'язок дотичного τ і нормального напруження P можна записати у вигляді:

$$\tau = \alpha P, \quad (2.8)$$

де параметр α характеризує механічні властивості ґрунту.

Тому можна записати:

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = -2Pa\alpha = -\gamma P, \quad (2.9)$$

$$\text{де } \gamma = 2a\alpha = 2 \frac{b+L}{bL} \alpha.$$

Розв'язавши рівняння (2.9) при граничних умовах (при $Z = 0$ $P = P_0$) вираз набуде вигляду:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{2Z(b+L)}{bL} \alpha\right). \quad (2.10)$$

При $L \ll b$, вираз (2.10) набуде вигляду:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{2\alpha Z}{b}\right). \quad (2.11)$$

При $\alpha = 1/2$ отримуємо характер поширення тиску по глибині ґрунту:

$$P = P_0 \exp\left(\frac{-Z}{b}\right). \quad (2.12)$$

Таким чином, глибину поширення деформації H можна оцінити співвідношенням:

$$H = 1,3b, \quad (2.13)$$

Для в'язко-пружної деформації ґрунту під гусеничним трактором рівняння стану таке [7]:

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_0} = \frac{\omega b (P_2 - P_1) (1 - \nu_0^2)}{E_0 H} \left(1 + \frac{L}{\tau V}\right), \quad (2.14)$$

Рівняння стану ґрунту під навантаженням, згідно (2.4), (2.14) набуде вигляду:

$$\frac{\rho_i - \rho_1}{\rho_0} = \frac{Z_i - Z_1}{H}. \quad (2.15)$$

де Z_i – осідання ґрунту при багаторазових повтореннях відносно одноразового – Z_1 ; ρ_i – щільність ґрунту при багаторазових повтореннях відносно природної щільності ρ_0 ; H – глибина поширення деформації.

З урахуванням тиску трактора на ґрунт вираз (2.4) набуде вигляду:

$$P_{E\Phi} = \frac{E_0 H}{\omega b (1 - \nu_0^2)}. \quad (2.16)$$

З урахуванням виразів (2.15), (2.16) рівняння стану ґрунту під навантаженням набуде вигляду:

$$\frac{\rho_i - \rho_1}{\rho_0} = \frac{Z_i - Z_1}{H} = \frac{P_i - P_1}{P_{E\Phi}}. \quad (2.17)$$

де P_1 – тиск трактора при багаторазових повтореннях навантаження відносно одноразового – P_1 ; $P_{E\Phi}$ – ефективний тиск на ґрунт трелювального трактора.

Водночас на підставі (2.4) отримуємо вираз:

$$Z_i - Z_1 = D(P_i - P_1), \quad (2.18)$$

або

$$\frac{Z_i - Z_1}{P_1} = D \left(\frac{P_i}{P_1} - 1 \right), \quad (2.19)$$

де $D = \frac{\omega b (1 - \nu_0^2)}{E_0}$; $P_1 = P$ – середній тиск гусеничного рушія.

На підставі графіка (рис. 2.2) побудована залежність Z_i / P від кількості проходів трактора, яка представлена на рис. 2.3.

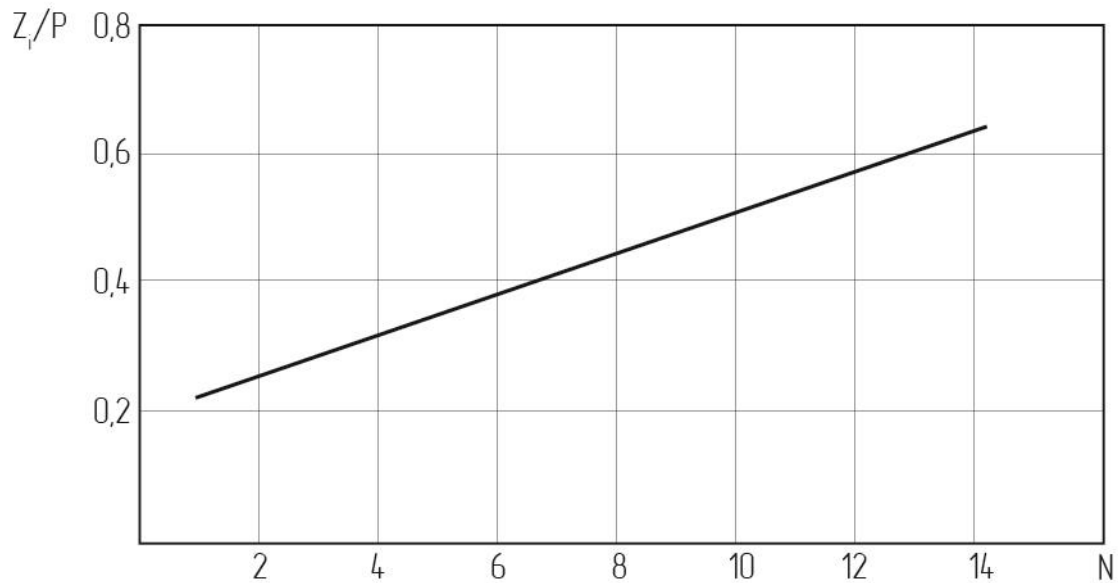


Рисунок 2.3 – Залежність Z_i / P від числа проходів трелювальних тракторів

Лінійне узагальнення має вигляд:

$$\frac{Z_i}{P} = 0,032(i-1) + 0,207. \quad (2.20)$$

де i – число проходів

При одноразовому навантаженні з рівняння (2.20) випливає, що:

$$\frac{Z_i}{P} = 0,207. \quad (2.21)$$

На підставі (2.20) і (2.21) можна записати:

$$\frac{Z_i - Z_1}{P_1} = 0,032(i-1). \quad (2.22)$$

Тоді з урахуванням (2.19) отримаємо число проходів, еквівалентне багаторазовому навантаженню:

$$\frac{P_i}{P} - 1 = \frac{Z_i - Z_1}{PD} = \frac{0,032}{D}(i-1), \quad (2.23)$$

або

$$\frac{P_i}{P} = 1 + \frac{0,032}{D}(i-1). \quad (2.24)$$

Остаточнo маємо:

$$P_i = P \left[1 + \frac{0,032}{D} (i-1) \right]. \quad (2.25)$$

Таким чином, отримали вираз для ефективного тиску на ґрунт, дія якого еквівалентна модулю пружності при i -ому проході трактора.

З урахуванням (2.20) рівняння (2.17) набуде вигляду:

$$\frac{Z_i - Z_1}{H} = \frac{(0,032i + 0,207)P - 0,207P}{H} = \frac{0,032(i-1)P}{H} = \frac{\rho_i - \rho_1}{\rho_{\text{ЕФ}}}. \quad (2.26)$$

Прийнявши ρ_i як $\rho_{\text{кр}}$ – критична щільність ґрунту, і перетворивши вираз (2.26) отримаємо:

$$\frac{\rho_{\text{кр}} - \rho_1}{\rho_0} = \frac{0,032(i-1)P}{H}. \quad (2.27)$$

Тоді:

$$i = \frac{\rho_{\text{кр}} - \rho_1}{\rho_0} H \frac{1}{0,032P} + 1. \quad (2.28)$$

Середній тиск на ґрунт трельовального трактора згідно ДСТУ 7057-81 визначається за формулою:

$$P_{\text{сеп}} = \frac{Gg}{2 \cdot 10^3 F}, \quad (2.29)$$

де G – маса машини; g – прискорення вільного падіння; $F = bL$ – площа опори гусениці машини; b – ширина гусениці; L – довжина ділянки гусениці, що знаходиться в контакті з основою.

З урахуванням руху трактора в холостому і вантажному напрямках середній тиск трактора на ґрунт визначимо за формулою:

$$P_{\text{сеп}} = \frac{(G_{\text{мп}} + 0,5G_n)g}{2 \cdot 10^3 F}. \quad (2.30)$$

де G_n – маса пачки, що припадає на коник трактора; $G_{\text{мп}}$ – маса трактора.

З урахуванням (2.30, 2.13) остаточно маємо:

$$N_{\text{прох}} = \frac{1,3b(\rho_{\text{кр}} - \rho_1)}{\rho_0} \frac{1}{\frac{0,032(G_{\text{мп}} + 0,5G_n)g}{2 \cdot 10^3 F}}. \quad (2.31)$$

2.2 Опис процесу роботи трелювального трактора

Залежно від умов і параметрів технологічного обладнання валочно-пакетувальної машини має місце три випадки, при яких об'єм пачки деревини M_F , сформованої ВПМ ЛП-19 може бути меншим за об'єм M , який може трелювати трелювальний трактор за технічними можливостями в даних лісорослинних умовах, дорівнювати об'єму M і більшим за об'єм M [5, 8].

Тому об'єм M , який може стрелювати трелювальний трактор дорівнює:

$$M = n_n M_p, \quad (2.32)$$

де n_n – число зібраних пачок.

При зборі n_n пачок трактор проходить по розробленій стрічці відстань L_n , яка дорівнює:

$$L_n = (R - r)(n_n - 1). \quad (2.33)$$

або

$$L_n = \frac{10^4 M_F}{\Delta q} (n_n - 1), \quad (2.34)$$

де q – запас лісу на гектарі, $\text{м}^3/\text{га}$; Δ – ширина розроблюваної стрічки, м ; R , r – максимальний і мінімальний виліт маніпулятора валочно-пакетувальної машини.

Відповідно до цього, число сформованих на стрічці довжиною B пачок об'ємом M буде дорівнювати:

$$n_M = \frac{B}{L_n + (R - r)} = \frac{B}{(R - r)n_n}, \quad (2.35)$$

або

$$n_M = \frac{B \Delta q}{10^4 M_F (M / M_F)} = \frac{B \Delta q}{10^4 M}. \quad (2.36)$$

У другому випадку, коли об'єми пачок $M_F = M$, $L_n = 0$, а число пачок на стрічці дорівнює:

$$n_M = \frac{B \Delta q}{10^4 M}. \quad (2.37)$$

де B – довжина розроблюваної стрічки, м.

Аналогічно буде і у випадку, коли $M_F > M$.

Таким чином, кількість пачок деревини, сформованих ВПМ на стрічці, буде залежати від довжини і ширини розроблюваної стрічки, запасу лісу на гектарі та об'єму трелюваної пачки M , а число проходів трактора буде чисельно рівним кількості пакетів повалених дерев.

Прийmemo число проходів трелювального трактора $N_{кр}$ (2.31), яке регламентує кількість проходів трелювальної системи за щільністю ґрунту. Тоді залежно від таксаційних показників лісосіки довжина пасічного волока, а відповідно і ширина розроблюваної лісосіки буде обмежуватися відстанню $B_{кр}$, яку можна визначити за формулою:

$$B_{кр} = \frac{10^4 MN_{кр}}{\Delta q}, \quad (2.38)$$

де q – запас лісу на гектарі.

Розміри лісосік впливають на відновлення лісу на вирубках. Цей вплив позначається на обсіменінні вирубуваної площі та на середовищі, в якому відбувається відновлення. Вважається, що зі збільшенням розмірів лісосік обсіменіння і розвиток сходів погіршуються [2].

Згідно з правилами рубок головного користування, максимальна площа лісосіки на схилах до 10° і в рівнинних лісах III групи встановлюється залежно від її ширини. Максимальна ширина може досягати 500 метрів.

Таким чином, максимальна ширина лісосіки, залежно від природно-виробничих умов може обмежуватися числом проходів трелювального трактора за щільністю ґрунту.

РОЗДІЛ 3 ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ З ҐРУНТОМ ГУСЕНИЧНОГО РУШІЯ З ІНДИВІДУАЛЬНОЮ ПІДВІСКОЮ ОПОРНИХ КОТКІВ

3.1 Обґрунтування застосовуваної конструкції підвіски на тракторі

Як відомо, характер ущільнювального впливу при постійній ширині гусениці визначається рівнем максимальних тисків на ґрунт. Усунення шкідливого впливу ходових систем на ґрунт безпосередньо пов'язане зі зниженням цих максимальних значень.

Одним із шляхів зниження нерівномірності розподілу питомих тисків є вдосконалення підвіски.

У традиційній балансирній системі підвішування збільшення вертикальної реакції на першому котку каретки при наїзді на нерівність викликає автоматичне підвищення навантаження і на другий опорний коток.

При русі по реальному мікропрофілю ця обставина призводить до збільшення нерівномірності розподілу опорних реакцій по довжині опорної поверхні.

Вертикальна складова при значному розтягувальному зусиллі ведучої вітки гусеничного ланцюга трактора традиційного компонування сприймається заднім опорним котком, в результаті опорна реакція на ґрунт під цим котком зменшується і, відповідно, збільшується навантаження під переднім котком задньої каретки.

Великі габарити і висока металоємність пружних елементів і важелів балансирної підвіски, нерівномірність розподілу опорних реакцій по довжині опорної поверхні трактора з балансирною підвіскою, що призводять до підвищеного ущільнення ґрунту і збільшеного зношування опорних котків, бігових доріжок ланок гусеничного ланцюга, збільшення маси підвіски при обґрунтуванні необхідних рівнів низькочастотних коливань остова і довговічності вузлів ходової та несучої систем, відносно невелику величину пружних ходів опорних котків і потенціальної енергії підвіски є основними недоліками балансирних систем підвішування, що обмежують їх застосування

на перспективних тракторах. Тому доцільним є використання балансирних підвісок як бази для уніфікації ходових систем перспективних тракторів високого класу.

Підвіска єдиної ходової системи порівняно з балансирною має у 2,8...2,2 рази більший запас потенціальної енергії, меншу на 16...19% металоємність і на 20...30% меншу собівартість.

За рахунок зниження жорсткості підвіски опорних котків у такій системі зменшується частота вільних вертикальних коливань остова, що позитивно позначається на плавності ходу трактора.

Випробування трактора Т-150 з індивідуальною та балансирною системами, проведені на полі, підготовленому під посів, показали, що буксування рушіїв Т-150 з індивідуальною підвіскою на 30% менше, ніж з балансирною.

При однаковому буксуванні трактор з підвіскою єдиної конструкції розвивав тягу на 7% більшу, ніж трактор з балансирною підвіскою, і мав на 5% більший коефіцієнт корисної дії ходової частини, що пояснюється більш рівномірним розподілом навантажень по каретках у єдиної ходової системи. Забивання ходової системи трактора Т-150 з двома типами підвісок визначали навесні при русі по сніговій цілині та восени на зораному полі.

Отримані такі дані, що єдина ходова система меншою мірою піддається забиванню ґрунтом і снігом, ніж балансирна. Опір перекочуванню трактора Т-150 з індивідуальною підвіскою на початку досліду на 16,7...26,8%, а наприкінці досліду на 19...22,8% менший, ніж у трактора Т-150 з балансирною підвіскою.

При оцінці трудомісткості ремонту і технічного обслуговування порівнюваних підвісок встановлено, що розбирання і складання індивідуальної підвіски займає на 35% менше часу, ніж балансирної, і не потребує додаткових пристосувань.

Аналіз надійності та довговічності підвіски проводили на тракторах, що досягли напрацювання 3800 мотогодин і більше. Результати мікрометражу

показали, що зношування опорних котків підвіски єдиної ходової системи у 1,3 раза менше, ніж котків балансірної підвіски.

На підставі проведеного аналізу нами була розроблена індивідуальна система підвіски трактора з шістьма опорними котками. З метою спрощення конструкції, зменшення металоємності та полегшення технічного обслуговування підвіски торсіонні вали замінені пружними елементами у вигляді пружин стиску, які одним кінцем заведені у тяги балансірів, а другі насаджені на штирі упорів остова трактора.

3.2 Визначення величини і характеру розподілу питомого тиску по лінії опорної поверхні гусеничного рушія

При розгляді схеми передачі тиску трактора на ґрунт у даній роботі прийнято, що його вплив здійснюється через опорну поверхню рушія, при цьому гусеничний рушій представлений у вигляді шарнірно з'єднаних балок. Ланковість опорної частини гусениці і безперервна зміна їх навантаженості створюються з боку ґрунту нормальною реакцією, якою визначається величина і характер розподілу питомих тисків по опорній поверхні рушія.

Характер розподілу питомого тиску по всій лінії опорної поверхні гусеничного рушія складається з розподілу нормальних реакцій ґрунту по опорній поверхні кожної ланки гусениці.

При розгляді розрахункової схеми ланку гусеничного ланцюга приймаємо абсолютно твердим тілом. Для підтвердження цього припущення необхідно визначити жорсткість ланки і ґрунту. Для оцінки жорсткості ланки була використана залежність з роботи [10]. Жорсткість балок, що лежать на пружній основі, прийнято оцінювати за показником гнучкості, який визначається виразом:

$$t = \frac{(1 - \mu_2^2)\pi E_1 b l^3}{4(1 - \mu_1^2)E_2 I}, \quad (3.1)$$

де t – показник гнучкості ланки; μ_2 – коефіцієнт Пуассона для ланки; μ_1 – коефіцієнт Пуассона для ґрунту; E_1 – модуль деформації ґрунту; E_2 – модуль

деформації ланки; b – ширина балки; l – довжина балки; I – момент інерції поперечного перерізу балки.

Розрахунки за формулою (3.1) показують, що жорсткість ланки гусениці порівняно з жорсткістю основи, тобто ґрунту, з яким вона взаємодіє, наближається до нескінченності.

Із теорії взаємодії ґрунтів з балками, що спираються на нього, відомо, що розподіл нормальних реакцій ґрунту по опорній поверхні балки визначається характером дії сил, якими навантажена балка.

При цьому враховуємо, що якщо сила прикладена у довільній точці або ж діє система сил, яка приводиться до сили і моменту, то буде відбуватися не лише вертикальне переміщення ланки, а й її поворот навколо шарніра.

Переміщення у вертикальній площині і поворот ланки навколо шарніра у будь-який момент часу буде залежати від місця прикладання сили та її величини. При русі котків по гусеничному ланцюгу ланки цього ланцюга через шарнірне з'єднання переміщуються у вертикальній площині і повертаються на кут β . При цьому відбувається занурення шарнірів у ґрунт.

Для визначення величини і характеру розподілу питомого тиску по довжині опорної поверхні необхідно знати навантаження на пружні елементи котків і навантаження від котків на ґрунт з урахуванням перерозподілу. Для цього розглянемо рис. 3.1 і умови рівноваги підресореної частини та всього трактора.

Підресореною частиною трактора є опорні котки, опорні вітки гусениць і частина деталей підвіски. Центр тяжіння цієї частини G_n можна вважати розташованим під серединою опорної поверхні, а навантаження під кожним опорним котком від цієї частини можна визначити за формулою:

$$Q_{in} = \frac{G_n}{2n}, \quad (3.2)$$

де n – число опорних котків рушія.

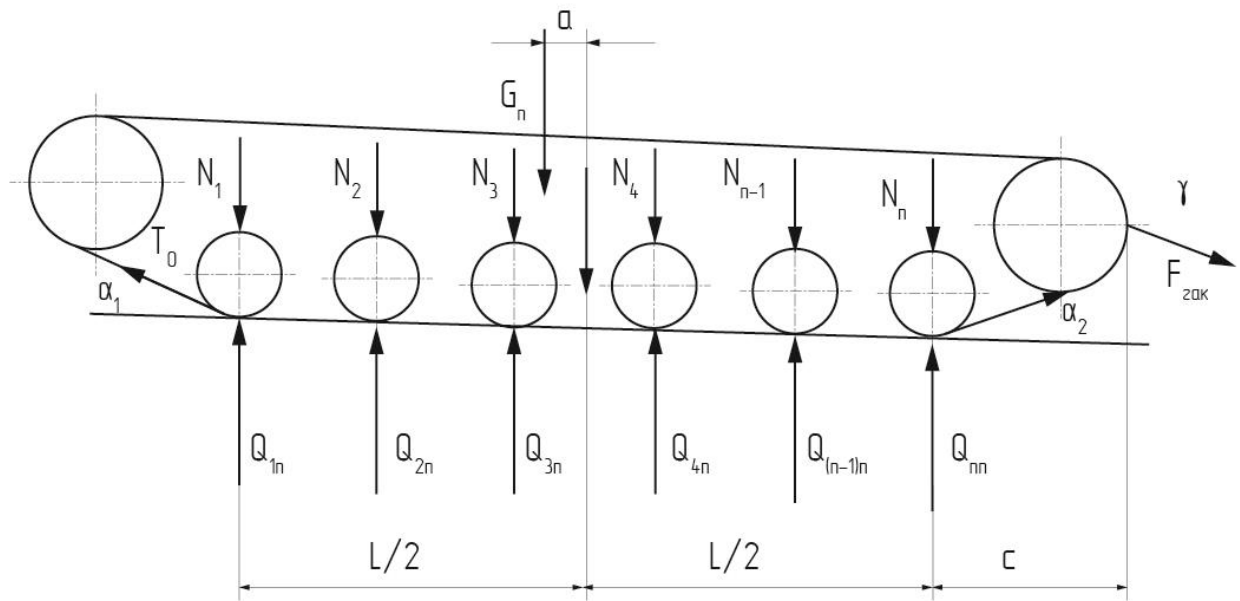


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема до визначення навантаження під опорними котками

Навантаження на пружні елементи котків від непідресореної частини трактора визначимо таким чином.

Зробимо припущення, що підресорена частина трактора спирається на перший і n -й коток. Тоді, складаючи рівняння моментів сил, що діють на підресорену частину трактора відносно точки A і B , знайдемо реакції пружних елементів першого і n -го опорних котків:

$$Y_1 = \frac{G_n}{2} \left(\frac{1}{2} \pm \frac{a}{L} \right) - \frac{F_{zak}}{2L} (h_{zak} \cos j + c \sin j);$$

$$Y_n = \frac{G_n}{2} \left(\frac{1}{2} \mp \frac{a}{L} \right) + \frac{F_{zak}}{2L} (h_{zak} \cos j + (L + c) \sin j).$$
(3.3)

Виконуючи побудову епюри навантаження пружних елементів крайніх котків, знайдемо рівняння прямої лінії, що проходить крізь точки A і B :

$$Y = \frac{x}{L} \left[\frac{F_{zak}}{L} \left(h_{zak} \cos j + \frac{L+c}{2} \sin j \right) \mp \frac{aG_n}{L} \right] + G_n \left(\frac{1}{4} \pm \frac{a}{2L} \right) - \frac{F_{zak}}{2L} (h_{zak} \cos j + c \sin j).$$
(3.4)

З отриманих виразів випливає, що навантаження під котком залежить від колового зусилля на ведучій зірочці, відстані між крайніми опорними котками, прикладеного крюкового зусилля трактора та параметрів ходової системи.

З наведених формул видно, що при русі трактора відбувається перерозподіл навантажень під котками. Від величини і місця прикладання навантаження, а також від числа опорних котків буде залежати характер розподілу нормальних реакцій під опорною поверхнею рушія.

Для визначення величини і характеру розподілу нормальних реакцій приймаємо такі припущення:

- буксування дорівнює нулю (тертям між ланкою гусениці і ґрунтом нехтуємо);
- під ланкою гусениці ґрунт розглядаємо як лінійно-деформоване середовище.

За прийнятих припущень дана задача зводиться до розв'язання задачі теорії пружності зі змішаними граничними умовами.

Отримані розрахункові епюри нормальних тисків рушія на ґрунт при різних значеннях гакового зусилля трактора – рис. 3.2 і 3.3

На підставі проведеного теоретичного аналізу можна зробити такі висновки.

1. На величину нормального навантаження, що діє на гусеничний ланцюг, більший вплив мають схема підвіски, конструктивні та експлуатаційні параметри трактора.
2. Питомий тиск під довжиною опорної поверхні розподіляється нерівномірно.
3. Концентрація питомих тисків під шарнірами обертання ланок гусениці призводить до найбільшого ущільнення і руйнування структури ґрунту.
4. Раціональна кількість опорних котків для рушія трактора – 6.

РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ГУСЕНИЧНОГО РУШІЯ НА ҐРУНТ

Для того щоб визначити негативний вплив, який чинять ходові системи гусеничних тракторів на ґрунт, нами проведено розрахунки з різними типами підвісок опорних котків.

Результати досліджень свідчать про те, що під дією навантаження від маси трактора ґрунт деформується, утворюючи при цьому слід різної глибини. З підвищенням кратності впливу, тобто числа проходів, глибина сліду збільшується.

Дані щодо зміни глибини сліду під різними ходовими системами тракторів свідчать про те, що найбільша глибина сліду (рис. 4.1) спостерігається під ходовою системою трактора Т-70С. Після двократного проходу цього трактора по одному й тому ж сліду утворюється колія глибиною 10,8 см, у той час як після проходу трактора ХТЗ-150 глибина колії дорівнює 3,5 см, на 10% менше. Ходова система трактора ТТ-4М меншою мірою впливає на зміну глибини сліду. Колія, що утворюється після двократного проходу, становила 8 см. Це на 26% менше колії, що утворюється після проходу ходової системи трактора ТДТ-55, і на 16% менше трактора ХТЗ-150.

Дослідження з визначення напружень (рис. 4.2), що виникають у ґрунті на різній глибині під ходовими системами тракторів, дозволяють стверджувати, що зі збільшенням глибини шару ґрунту напруження в ньому зменшуються.

Своїх максимальних значень вони досягають у верхньому шарі, орному, при перших двох-трьох проходах трактора. При подальшому збільшенні числа проходів напруження стабілізується.

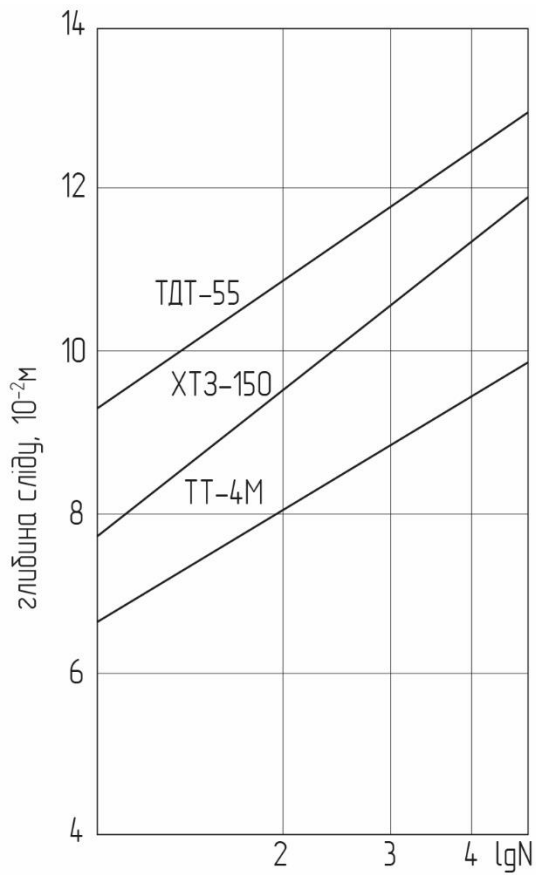
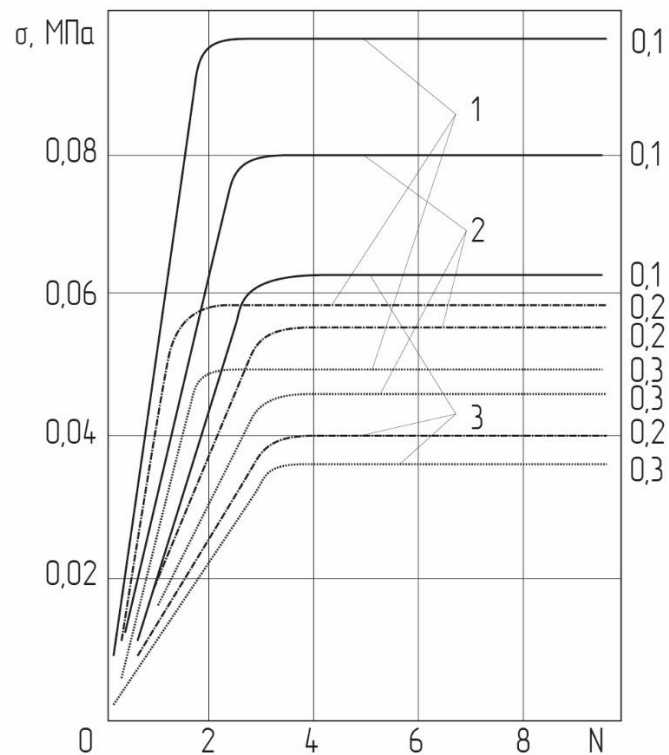


Рисунок 4.1 – Зміна глибини сліду під впливом рушія трактора



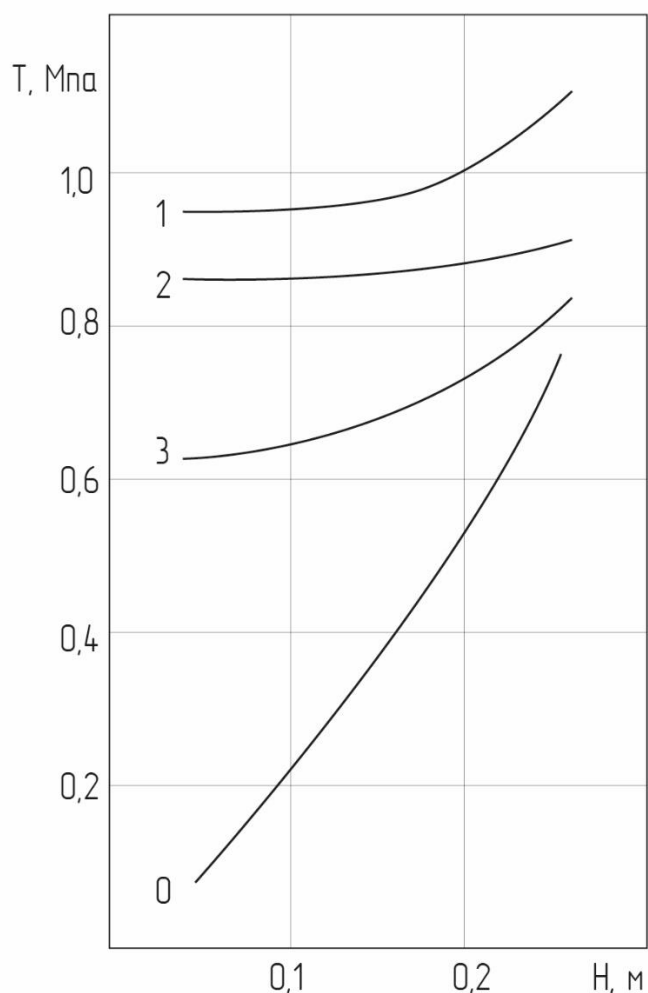
1, 2, 3 – відповідно, трактори ТДТ-55, ХТЗ-150 та ТТ-4М

Рисунок 4.2 – Напруження на різній глибині в залежності від числа проходів трактора

Також було відмічено, що напруження у ґрунті під рушіями тракторів зменшується зі збільшенням швидкості руху. Найбільші напруження виникають у ґрунті під ходовою системою трактора ТДТ-55 і досягають значень 0,095, 0,068, 0,047 МПа відповідно на глибині 0,1; 0,2 та 0,3 метра.

Під рушієм трактора ХТЗ-150 ці значення на 6...15% нижчі – 0,08, 0,55, 0,045 МПа, а під рушієм ТТ-4М – на 25...33% нижчі – 0,63, 0,46, 0,036 МПа.

Аналіз твердості ґрунту (рис. 4.3) показав, що зі збільшенням горизонту ґрунту його твердість зростає. Твердість ґрунту по сліду трактора ТДТ-55 більша, ніж по сліду ХТЗ-150 у шарі 0,01 м у 1,1...1,5 рази, в орному шарі – у 1,1...1,3 рази, і ТТ-4М у шарі 0,01 м – у 1,5...1,8 рази, в орному шарі – у 1,2...1,4 рази.

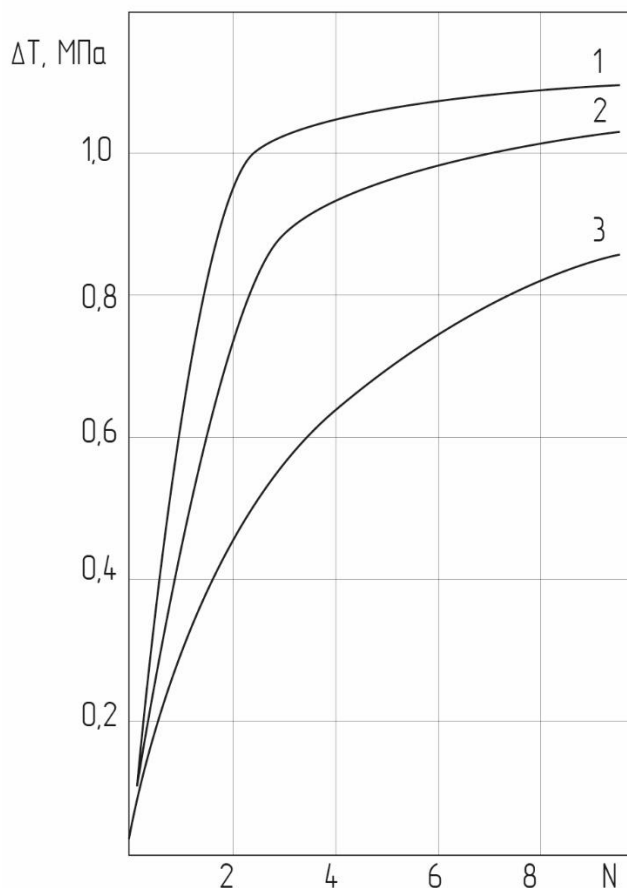


0 – без ущільнення; 1, 2, 3 – відповідно, по сліду трактора ТДТ-55, ХТЗ-150 та ТТ-4М

Рисунок 4.3 – Твердість чорнозему по сліду трактора

Хоча трактор ТТ-4М меншою мірою впливає на зміну твердості ґрунту порівняно з ТДТ-55 і ХТЗ-150, він суттєво збільшує її у шарі 0,3 м.

Зміна приросту твердості ґрунту в орному шарі (ΔT) залежно від кратності проходу тракторів показана на рис. 4.4. Причому зміна твердості при багатократних проходах спостерігається до глибини 0,5 м.



1, 2, 3 – відповідно, трактори ТДТ-55, ХТЗ-150 та ТТ-4М

Рисунок 4.4 – Зміна приросту твердості ґрунту в орному шарі в залежності від числа проходів трактора

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що жодна з ходових систем досліджуваних гусеничних тракторів не відповідає вимогам агротехніки. Отже, необхідно показати шляхи для створення таких ходових систем тракторів, щоб вони якомога меншою мірою впливали на ґрунт.

4.1 Розподіл питомого тиску по довжині опорної поверхні рушія трактора ТТ-4М

Від величини і характеру розподілу питомого тиску по довжині опорної поверхні гусеничного рушія залежать опір руху трактора, тягово-зчіпні якості, а також ступінь руйнування структури ґрунту.

З метою визначення діючих величин питомого тиску та закономірностей його розподілу по довжині опорної поверхні були проведені теоретичні дослідження з трактором ТТ-4М.

При проведенні цих досліджень величина і характер розподілу питомого тиску визначалися комплексно на елементи ланки гусениці по всій опорній ділянці на різних агрофонах ґрунту – стерня, культивоване поле, зоране поле.

Результати проведених досліджень (рис. 4.5 та 4.6) дозволили певною мірою оцінити вплив ходової системи трактора на ґрунт.

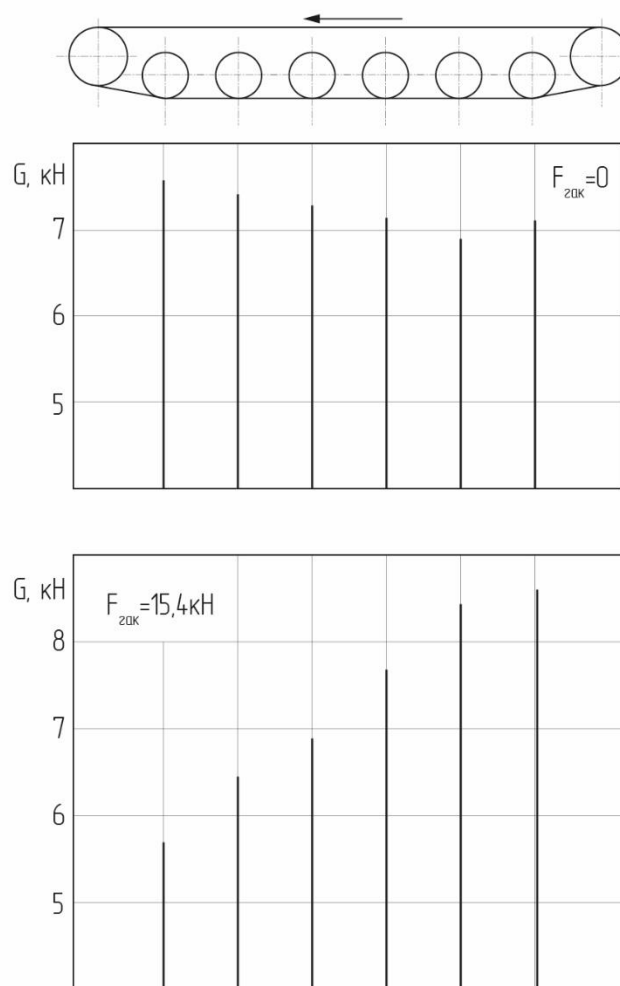


Рисунок 4.5 – Розподіл навантаження під шістьма катками трактора ТТ-4М

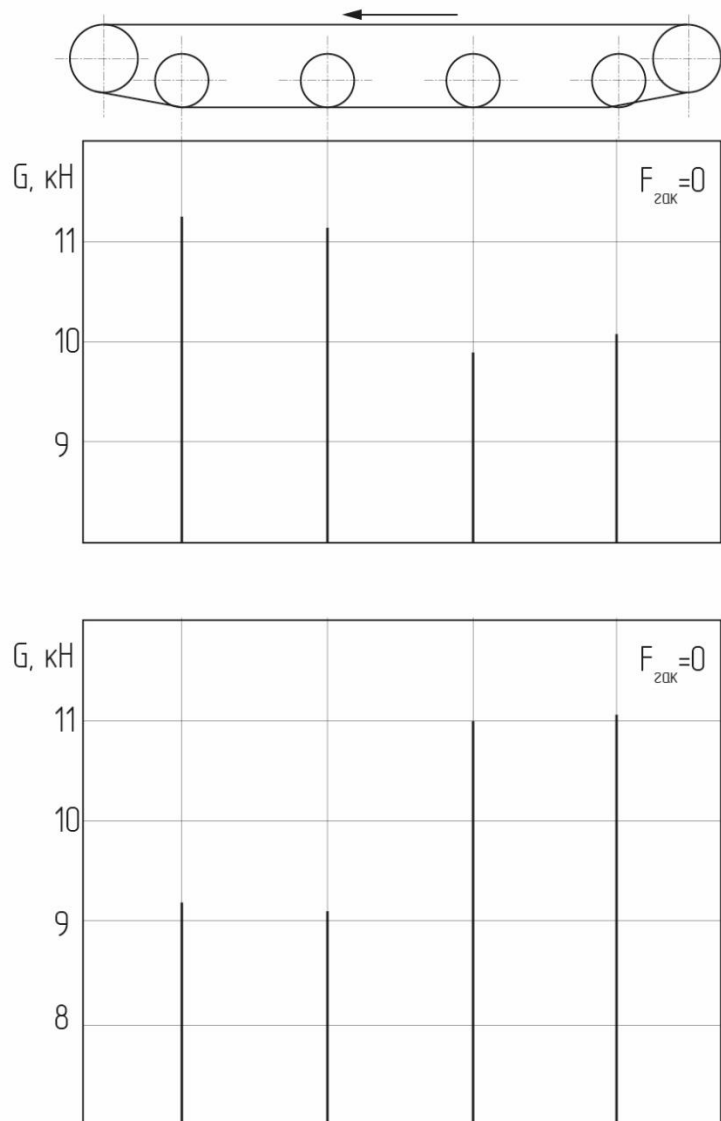


Рисунок 4.6 – Розподіл навантаження під чотирма катками трактора ТТ-4М

В результаті проведених досліджень були отримані епюри розподілу питомого тиску по довжині опорної поверхні гусеничного рушія і навантаження на опорні котки з боку остова трактора залежно від швидкості руху та крюкового зусилля досліджуваного трактора.

Із даних досліджень видно, що розподіл навантажень опорних котків на гусеничний ланцюг у трактора з індивідуальною 6-катковою підвіскою є більш рівномірним порівняно з трактором на балансірній 4-катковій підвісці.

При холостому ході тракторів коефіцієнт нерівномірності розподілу навантажень по котках індивідуальної підвіски в середньому у два рази нижчий, ніж у балансірної.

Порівнюючи розподіл навантажень при холостому ході тракторів, помічаємо, що найбільш навантаженими є передні котки. Це пояснюється тим, що центр тяжіння трактора зміщений уперед до напрямного колеса.

Зі збільшенням крюкового зусилля відбувається різкий перерозподіл навантажень по котках. У цьому випадку найбільш навантаженими стають задні опорні котки.

Аналіз результатів дослідження показує, що для рівномірного розподілу маси трактора по опорних котках при крюковому навантаженні необхідно центр тяжіння трактора змістити до напрямного колеса.

Також слід зазначити, що розподіл маси по опорних котках суттєво впливає як на характер розподілу питомого тиску по довжині опорної поверхні гусениці, так і на довжину активної опорної поверхні гусеничного рушія.

Порівнюючи залежності зміни нормального тиску ланки від крюкового зусилля трактора за рис. 4.7 і 4.8, помічаємо, що максимальне значення питомого тиску на ґрунт, яке виникає під шарнірами обертання ланок, при індивідуальній системі підресорювання становить 126...164 кН, що на 18...25% нижче, ніж при балансірній.

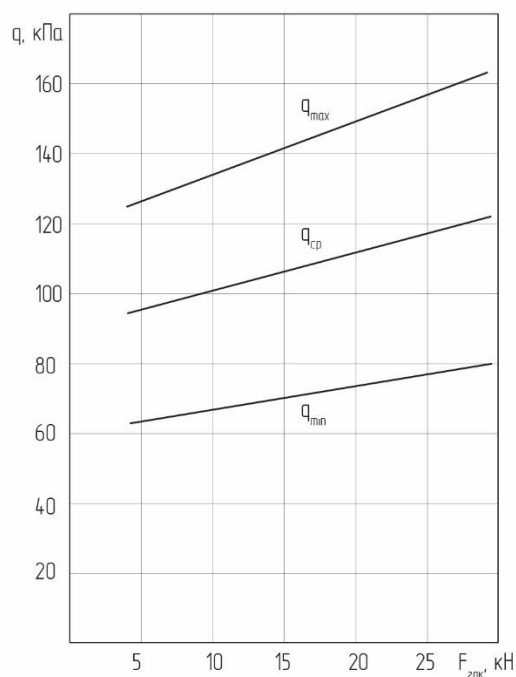


Рисунок 4.7 – Зміна нормального тиску ланки від гакового навантаження трактора з шістьма опорними котками

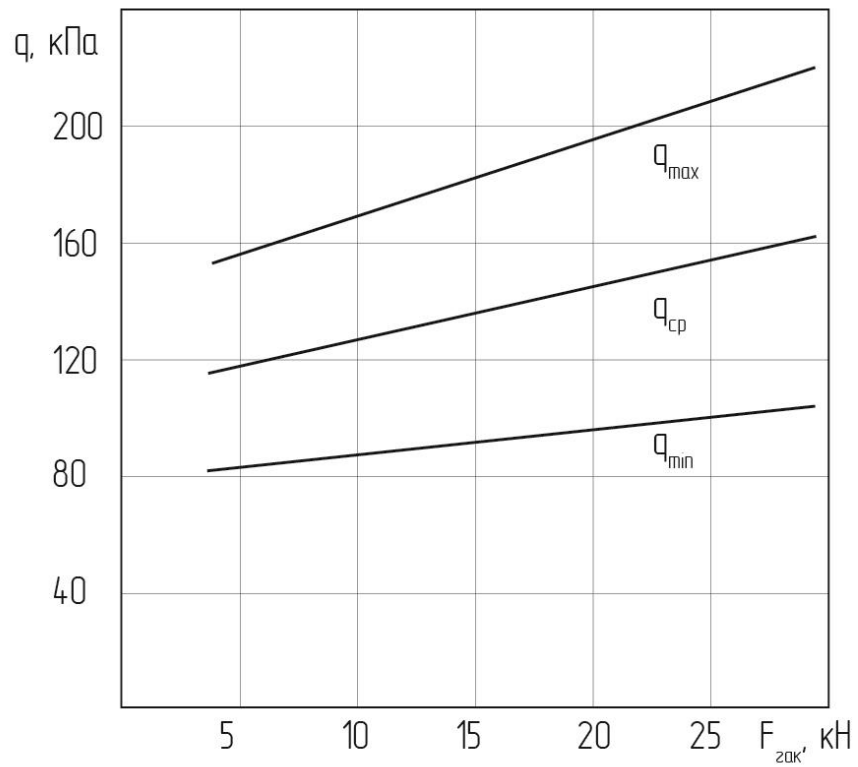
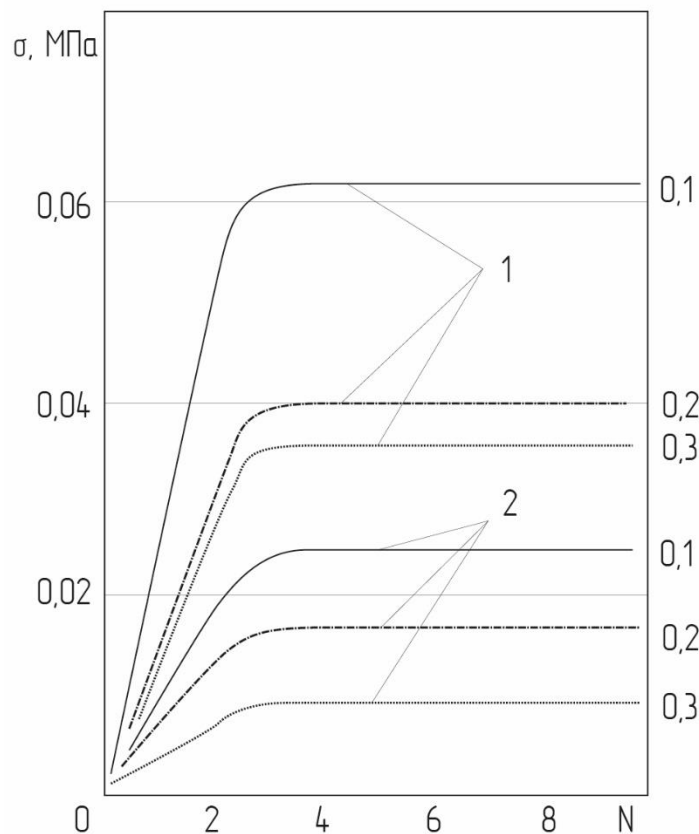


Рисунок 4.8 – Зміна нормального тиску ланки від гакового навантаження трактора з чотирма опорними котками

Результати досліджень показали, що максимальне напруження (рис. 4.9) у ґрунті під гусеницею серійного трактора ТТ-4М досягає значення 0,064, 0,042, 0,037 МПа відповідно на глибині 0,1; 0,2 та 0,3 м.



1 – базовий варіант; 2 – новий варіант

Рисунок 4.9 – Напруження на різній глибині в залежності від числа проходів трактора

Напруження, що поширюються у ґрунті при русі трактора, досягають максимуму при перших трьох проходах. При подальшому збільшенні проходів трактора вони стабілізуються – рис. 4.9.

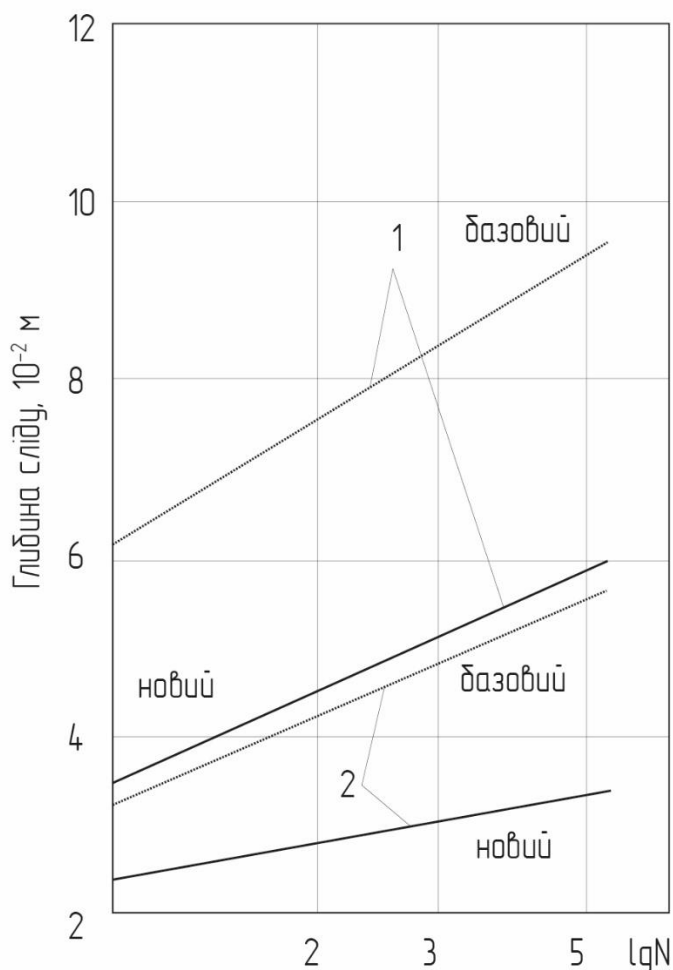
Зі збільшенням швидкості трактора напруження під його ходовою системою зменшується за величиною.

Також було відзначено, що зі збільшенням глибини шару ґрунту напруження в ньому під гусеничними рушіями згасає.

Експлуатація даного трактора з індивідуальною шестикатковою підвіскою опорних котків дозволяє на 60...66% знизити стискальні напруження у ґрунті залежно від швидкості руху агрегату.

Під дією стискальних напружень ґрунт деформується, утворюючи слід різної глибини.

Дані щодо зміни глибини сліду, рис. 4.10, під різними ходовими системами трактора ТТ-4М при роботі свідчать про те, що найбільша глибина сліду спостерігається під ходовою системою серійного трактора.



1 та 2 – вологість ґрунту 0,9 та 0,7 відповідно

Рисунок 4.10 – Зміна глибини сліду під впливом рушія трактора

Також слід зазначити, що цей параметр суттєво залежить від вологості ґрунту. При цьому з підвищенням кратності впливу числа проходів глибина сліду збільшується. Застосування в агрегаті тракторів ТТ-4М з індивідуальною підвіскою дозволило знизити глибину сліду на 26...50% залежно від вологості ґрунту.

РОЗДІЛ 5 ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗНИЖЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОГО ВПЛИВУ НА ГРУНТ ТРАКТОРА ПРИ ВИРОЩУВАННІ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР (НА ПРИКЛАДІ ТРАКТОРА ХТЗ-150-05-09)

Сучасними технологіями вирощування зернових культур у період ранньовесняних польових робіт передбачається використання гусеничних тракторів.

В результаті роботи цих тракторів на полі ґрунт після їх руху значно ущільнюється.

Технологічними прийомами, як правило, не вдається знизити надмірне ущільнення ґрунту, особливо у підорних шарах. Тому зниження ущільнювального впливу на ґрунт рушіїв цих тракторів має найбільше значення.

Виходячи з результатів проведених нами досліджень, одним із ефективних прийомів зменшення ущільнювальної дії на ґрунт є застосування на тракторі шестикаткової індивідуальної підвіски.

З цією метою у виробничих умовах, для порівняння, пропонується використовувати на всіх операціях з підготовки ґрунту і сівби зернових культур тракторні агрегати на базі трактора з чотирма та шістьма котками.

В основу розрахунку передбачуваної економічної ефективності від впровадження заходів зі зниження питомих тисків покладено методику визначення економічної ефективності модернізованих і нових конструкцій тракторів та їх агрегатів, а також методи економічної оцінки спеціальних машин.

При визначенні очікуваного ефекту від впровадження удосконалень у конструкцію ходової системи агрегату при виконанні ранньовесняних польових робіт визначаємо річну економію в розрахунку на один гектар за формулою:

$$E = (П_{\text{бк}} - П_{\text{нк}}) + (П_{\text{он}} - П_{\text{нн}}) + У, \quad (5.1)$$

де E – економічний ефект; $П_{\text{бк}}$, $П_{\text{нк}}$, $П_{\text{он}}$, $П_{\text{нн}}$ – сума приведених витрат у базовому і новому варіанті відповідно на культивуванні та сівбі; $У$ – економічний ефект від збільшення обсягу отримуваної продукції.

Приведені питомі витрати на одиницю роботи визначаються за формулою:

$$P = \frac{1}{W_{23}} \left[nC_{\text{мех}} + \kappa C_{\text{доп}} + QC_{\text{нмм}} + X_p + \frac{B_{\text{тр}}(a_{\text{тр}} + r_{\text{тр}} + E_{\text{н}})}{t_{\text{тр}}} + \right. \\ \left. + \frac{B_{\text{с2}}(a_{\text{с2}} + r_{\text{с2}} + E_{\text{н}})}{t_{\text{с2}}} + \frac{B_3(a_3 + r_3 + E_{\text{н}})}{t_3} \right], \quad (5.2)$$

де W_{23} – продуктивність агрегату за годину змінного часу; $C_{\text{доп}}$ – годинна ставка допоміжного робітника; $C_{\text{мех}}$ – годинна ставка механізатора; Q – витрата палива; $C_{\text{нмм}}$ – вартість одного кілограма пального; n – кількість механізаторів; κ – кількість допоміжних робітників; $t_{\text{тр}}$, $t_{\text{с2}}$, t_3 – річне завантаження тракторів, сільськогосподарських машин і зчіпок, X_p – витрати на зберігання трактора і машин-знарядь, віднесені до години роботи агрегату; $B_{\text{тр}}$, $B_{\text{с2}}$, B_3 – балансова вартість тракторів, сільськогосподарських машин і зчіпок; $a_{\text{тр}}$, $a_{\text{с2}}$, a_3 – норма амортизаційних відрахувань по тракторам, сільськогосподарським машинам і зчіпкам; $r_{\text{тр}}$, $r_{\text{с2}}$, r_3 – річна норма відрахувань на ремонт по тракторам, сільськогосподарським машинам і зчіпкам; $E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, рівний 0,15.

Годинна продуктивність агрегату визначається за формулою:

$$W_{\text{г}} = 0,1 B_p V_p \tau, \quad (5.3)$$

де B_p – ширина захвату агрегату; V_p – робоча швидкість агрегату, яка збільшується в новому варіанті за рахунок зниження втрат на деформацію ґрунту; τ – коефіцієнт використання робочого часу.

Знаходимо продуктивність агрегату на культивації в базовому і новому варіанті:

$$W_{\text{зкб}} = 0,1 \cdot 8 \cdot 8,2 \cdot 0,75 = 4,92 \text{ га/год};$$

$$W_{\text{зкн}} = 0,1 \cdot 8 \cdot 8,5 \cdot 0,75 = 5,1 \text{ га/год}.$$

Продуктивність агрегату на сівбі в базовому і новому варіанті:

$$W_{\text{зпб}} = 0,1 \cdot 18,8 \cdot 18,4 \cdot 0,5 = 5,63 \text{ га/год};$$

$$W_{\text{зпн}} = 0,1 \cdot 18,8 \cdot 18,8 \cdot 0,5 = 6,83 \text{ га/год};$$

Витрата палива на культивуванні та сівбі для трактора ХТЗ-150 складає $Q_k = 15,46$ кг/год та $Q_n = 16,20$ кг/год.

Інші нормативні дані беремо з робіт [6, 8]

Економічний ефект від збільшення об'єму отриманої продукції розраховується по формулі:

$$\Delta Y = C_{\text{дн}} - C_{\text{дб}}, \quad (5.4)$$

де $C_{\text{дн}}$ та $C_{\text{дб}}$ – вартість продукції в новому та базовому варіантах.

$$C_{\text{д}} = C \cdot \mathcal{K}, \quad (5.5)$$

де C – ціна 1 кг зерна; $\mathcal{K}$ – врожайність.

Врожайність з 1 га посіву визначаємо за формулою:

$$\mathcal{K} = (1 - r) \mathcal{K}_0 + r \mathcal{K}_c, \quad (5.6)$$

де $\mathcal{K}_0$ – врожайність поза слідами; $\mathcal{K}_c$ – врожайність по сліду; r – величина ущільненої площі на 1 га посіву:

$$r = \frac{B}{B_a}, \quad (5.7)$$

де B – ширина слідів; B_a – ширина захвату агрегату.

$$r = \frac{8,34}{18,8} = 0,087.$$

Врожайність ярого ячміню по сліду трактора становить 11,4 ц/га, а по сліду покращеного трактора приймемо 13,9 ц/га, а поза слідами – 15,3 ц/га. Тоді врожайність з 1 га посіву буде дорівнювати:

$$\mathcal{K}_{\text{с}} = (1 - 0,087)15,3 + 0,087 \cdot 11,4 = 14,96 \text{ ц/га}$$

$$\mathcal{K}_{\text{н}} = (1 - 0,087)15,3 + 0,087 \cdot 13,9 = 15,18 \text{ ц/га.}$$

Економічний ефект від збільшення об'єму буде мати значення:

$$\Delta Y = 151,8 - 149,6 = 2,2 \text{ грн/га.}$$

Підставивши отримані значення в вираз (5.1), отримаємо економічний ефект від впровадження удосконалень в конструкцію:

$$E = 2,642 \text{ грн/га.}$$

Інші показники, що розраховані за відомою методикою, зведемо в табл. 5.1

Таблиця 5.1 – Економічний ефект від використання експериментального рушія на тракторі ХТЗ-150-09

Показник	Варіант	
	базовий	новий
Трактор	ХТЗ-150К-06	ХТЗ-150К-06
Балансова вартість, грн	183760	187660
Продуктивність агрегату, га/год		
– на культивації	4,92	5,1
– на сівбі	5,63	5,63
Врожайність ярового ячменю по колії, ц/га	11,4	13,9
Сума приведених витрат, грн/га		
– на культивації	5,69	4,95
– на сівбі	9,33	9,33
Річний економічний ефект на один трактор, тис.грн/рік	–	1,381
Строк окупності додаткових капіталовкладень, рік	–	0,31
Віддача на 1 грн капіталовкладень, грн	–	25,86

ВИСНОВКИ

На підставі проведених нами досліджень можна зробити такі висновки.

Конструкція ходових систем гусеничних тракторів ТДТ-55, ТТ-4М, ХТЗ-150 через надмірне ущільнення ґрунту не відповідає вимогам агротехніки.

Ґрунт має безцінну властивість родючості, яку необхідно враховувати при конструюванні сільськогосподарських машин. Тому з метою збільшення рівномірності розподілу питомого тиску по опорній поверхні гусеничного рушія і зниження недобору врожаю по колії нами теоретично обґрунтовано та розроблено шестикаткову систему підресорювання опорних котків для трактора ТТ-4М.

Отримана нами теоретична залежність для визначення величини і характеру розподілу нормальних тисків по ланці і всій опорній ділянці гусениці рушія з індивідуальними підресореними опорними котками включає в себе як основні конструктивні параметри ходової системи, так і експлуатаційні показники трактора.

Розрахунки для трактора ТТ-4М з шістьма котками показали, що зі збільшенням швидкості трактора напруження під його ходовою системою зменшується за величиною. Також було відзначено, що зі збільшенням глибини шару ґрунту напруження в ньому під гусеничними рушіями затухає. Експлуатація даного трактора з індивідуальною шестикатковою підвіскою опорних котків дозволяє на 60...66% знизити стискальні напруження у ґрунті залежно від швидкості руху агрегату. Під дією стискальних напружень ґрунт деформується, утворюючи слід різної глибини. Дані щодо зміни глибини сліду, рис. 4.10, під різними ходовими системами трактора ТТ-4М при роботі свідчать про те, що найбільша глибина сліду спостерігається під ходовою системою серійного трактора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wong J.Y. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering. 3rd Edition, Elsevier, 2022. ISBN: 978-0323902946
2. Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles. 5th Edition, Wiley, 2021. ISBN: 978-1119635857
3. Sharma A., Azad M. Recent advances in tractor traction mechanics and soil-track interaction modelling: A review. Journal of Terramechanics, 2023, Vol. 107. DOI: 10.1016/j.jterra.2023.02.004
4. Keller T., Lamandé M., Schjønning P. Soil compaction caused by agricultural machinery. Soil and Tillage Research, 2021, Vol. 213. DOI: 10.1016/j.still.2021.105122
5. Fanigliulo R., Biocca M., Grilli R. et al. Comparative Tests of Agricultural Traction Systems under Heavy Soil Conditions. Environments, 2026, Vol. 13(3), 150. DOI: 10.3390/environments13030150
6. Bulgakov V., Adamchuk V., Nadykto V. et al. Theoretical investigation of oscillatory processes in tractor running systems during tillage operations. Agriculture, 2022, Vol. 12(9), 1367. DOI: 10.3390/agriculture12091367
7. Rahman M., Chen Y. Soil-Machine Interaction for Conservation Farming. Springer, 2021. ISBN: 978-9811606793
8. Sakai K., Upadhyaya S. Advances in Agricultural Machinery and Technologies. Springer, 2021. ISBN: 978-9813364189
9. Molari G., Mattetti M., Sedoni E. Energy demand and efficiency in agricultural tractor operations under different soil conditions. Applied Sciences, 2021, Vol. 11(3), 925. DOI: 10.3390/app11030925
10. Wang J., Li Y., Zhao Z. Dynamic modelling and vibration characteristics of tractor-implement systems under field conditions. Biosystems Engineering, 2022, Vol. 214. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.11.012

11. Roșca R., Cârlescu P., Țenu I., Perșu C. The Improvement of a Traction Model for Agricultural Tire–Soil Interaction. *Agriculture*, 2022, Vol. 12(12), 2035. DOI: 10.3390/agriculture12122035
12. Jia H., Wang G., Li M. Ride comfort and vibration reduction of agricultural tractors equipped with hydro-pneumatic suspension systems. *Shock and Vibration*, 2021. DOI: 10.1155/2021/6643218
13. Verbitsky V., Bulgakov V., Pascuzzi S. et al. Dynamic loading and energy consumption of wheeled and tracked tractor units during agricultural operations. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13(7). DOI: 10.3390/app13071452
14. Chyba J., Kroulík M., Kumhála F. Influence of tractor running gear on soil compaction and traction characteristics. *Agronomy Research*, 2020, Vol. 18(S2). DOI: 10.15159/AR.20.201
15. Grisso R., Pitman R., Perumpral J. *Tractor Management for Conservation Agriculture*. ASABE, 2021. ISBN: 978-1888626193
16. Nadykto V., Golub G., Tsyvenkova N. et al. Modeling Movement Stability of Machine-Tractor Units Based on Modular Type Tractor. *Applied Sciences*, 2025, Vol. 15(5), 2822. DOI: 10.3390/app15052822
17. Findura P., Nadykto V., Kyurchev V., Gierz Ł. Transverse Movement Kinetics of a Unit for Inter-Row Crops—Case Study: Cultivator Unit. *Applied Sciences*, 2024, Vol. 14(2), 580. DOI: 10.3390/app14020580
18. Kim Y.S., Park S.U., Lee J.H. Prediction of tractor traction performance under various soil moisture conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, Vol. 198. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107019
19. Keller T. *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, 2022. ISBN: 978-0323856713
20. Hamza M.A., Anderson W.K. *Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions*. Soil and Tillage Research, 2021 reprint edition. ISBN: 978-0128236550

ДОДАТКИ