

Допущено до захисту
 “ ____ ” _____ 20 ____ р.
 Зав. кафедри К.Т.Н., доцент
 (науковий ступінь, вчене звання)
 _____ **Андрій ВОЙТІК**
 (підпис) (ініціали, прізвище)

магістр

(освітній рівень)

тема роботи **«ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМЕНШЕННЯ
УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ КОЛІСНИМИ РУШІЯМИ МАШИННО-
ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності 208
«Агроінженерія»
Савранський М.П.
(прізвище та ініціали)

Керівник к.е.н., доцент, Кутковецька Т.О.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Савранський М.П. Обґрунтування процесу зменшення ущільнення ґрунту колісними рушіями машинно-тракторних агрегатів (Дипломна робота, Уманський національний університет садівництва, 2023: пояснювальна записка на 53 сторінках, у т.ч. 5 розділів, 21 рисунок, 4 таблиці, 27 джерел літератури).

У дипломній роботі проведені дослідження, що полягають у покращенні показників якості підготовки ґрунту для вирощування сільськогосподарських культур шляхом зменшення ущільнення ґрунту колісними рушіями при виконанні робіт. Проведений аналіз теоретичних та експериментальних досліджень процесу ущільнення ґрунту рушіями машинно-тракторних агрегатів (МТА).

Метою дослідження є зменшення ущільнення ґрунту колісними рушіями шляхом розробки нових технічних і технологічних параметрів роботи МТА.

Об'єкт дослідження – процес зменшення ущільнюючого впливу на ґрунт рушіїв МТА.

Предмет дослідження – обґрунтування процесу зменшення ущільнення ґрунту колісними рушіями машинно-тракторних агрегатів, зв'язок процесу з конструктивно-технологічними параметрами тракторних агрегатів і фізико механічними властивостями ґрунтів.

Ключові слова: ГРУНТ, МАШИННО-ТРАКТОРНІ АГРЕГАТИ, ПАРАМЕТРИ РОБОТИ, КОЛІСНІ РУШІЇ, УЩІЛЬНЕННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
1.1. Агротехнічні вимоги до сівби просапних культур.....	9
1.2. Аналіз сучасного технічного забезпечення сівби просапних культур.....	15
1.3. Мета та завдання дослідження.....	19
Висновки по розділу.....	20
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РУШІВ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ НА ҐРУНТ.....	21
2.1. Теоретичні підходи до впливу машинно-тракторних агрегатів на ґрунт.	21
2.2. Інструментальні методи і засоби дослідження ущільнення ґрунту.....	27
2.3. Експлуатаційні параметри машинно-тракторних агрегатів, що впливають на ущільнення ґрунту при агрегуванні.....	28
2.4. Напружено-деформований стан ґрунту під слідом колеса транспортного засобу.....	31
Висновки по розділу.....	33
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЛІСНИХ РУШІВ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ НА УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ.....	34
3.1. Технічні засоби для забезпечення експериментальних досліджень.....	34
3.2. Експериментальні дослідження по визначенню ущільнюючого впливу на ґрунт рушіїв трактора МТЗ-82.....	35
3.3. Експериментальне визначення ущільнюючого впливу на ґрунт при експлуатації трактора CASE 340.....	37
Висновки по розділу.....	41
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	42
4.1. Організація умов та заходів з охорони праці при роботі з машинно-тракторними агрегатами.....	42

4.2. Моделювання процесів виникнення травм при роботі із машинно-тракторними агрегатами.....	44
Висновки по розділу.....	45
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ	
ЗДВОЄНИХ ШИН ТА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ КОЛІЇ.....	46
Висновки по розділу.....	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51

ВСТУП

Використання важкої техніки в сільськогосподарському виробництві пов'язане з ущільненням ґрунтів і, як наслідок, з негативним впливом на зростання і врожайність вирощуваних культур. Тут має місце очевидне протиріччя: необхідність у достатній кількості продуктів харчування потребує потужних машин, а збереження придатливого для вирощування рослин ґрунту вимагає обмежень кількості важкої техніки на полях. Тому, пошук оптимального співвідношення цих протилежних тенденцій залишається актуальним у сучасних наукових дослідженнях.

Оптимальна щільність за своєю абсолютною величиною індивідуальна для кожного типу ґрунту, для різновидів ґрунтів за механічним складом і для біологічних груп сільськогосподарських рослин. Реакція рослин на різне ущільнення залежить від біологічних особливостей окремих культур і, в першу чергу, від особливостей розвитку кореневих систем.

З метою удосконалення тягово-зчіпних можливостей машинно-тракторних агрегатів (МТА) часто використовується нерівномірний розподіл навантажень на осі, практикується навіть додаткове навантаження, наприклад, за рахунок баласту на ведучі колеса. Це призводить до збільшення ущільнюючого впливу на ґрунт. У зв'язку з цим залишається актуальним питання раціонального розподілу зусиль між осями і колесами машин.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖУВАНОГО ПИТАННЯ

1.1. Актуальність питання ущільнення ґрунту машинно-тракторними агрегатами

Чорноземні ґрунти і сприятливий клімат, велика густота населення та землеробські навички, які здавна склалися в нього, зручне економіко-географічне положення зробили рослинництво базовою галуззю аграрного виробництва України [8].

Найважливішим елементом аграрного виробництва є земля. Найбільш сприятливі для вирощування сільськогосподарських культур – чорноземи. Географічно так склалося, що близько 27% світових запасів чорноземних ґрунтів знаходиться в Україні. Історичний тип українського селянина увібрав у себе любов до сільськогосподарської праці, яка складається з багатовікового досвіду обробітку землі та розведення худоби. Відомо, що впродовж тривалого часу в Україні переважало сільське населення, яке займалося веденням сільського господарства, виробництвом та вдосконаленням технологій вирощування культур та знарядь для обробітку ґрунту. Міське населення поповнювалося широкими темпами за рахунок сільського – основних носіїв звичаїв, традицій та культури [8].

Сучасне машинобудування в аграрному виробництві відрізняється тим, що з року в рік конструкційні особливості машин призводять до збільшення маси [19]. Розвиток аграрного машинобудування направлений на збільшення продуктивності праці агрегатів найчастіше за рахунок зменшення робітників та працюючої техніки на полях. Усі ці фактори призводять до збільшення переущільнення ґрунту ходовою системою МТА. Актуальність цього питання неодноразово доведена як на практиці, так і провідними науковцями [6, 9]. Ця задача в наш час має актуальне значення.

Тож було прийнято рішення вивчити механізми ущільнення ґрунту, процеси, які виникають у ньому під час контакту з колесом, тобто загальний

процес деформації та ущільнення не лише на поверхні, а й розповсюдження його вглиб масиву.

Напруження, які виникають у товщі родючого шару, розповсюджуються вглиб масиву, цим самим утруднюючи вільний доступ вологи до кореня рослини [8]. Як буде сказано далі, деформація ґрунту є частково залишковою, що не дає змоги швидкого відновлення [9]. На нашу думку, це і є одна з основних проблем сучасного сільського господарства. Адже внаслідок нераціонального використання сільськогосподарської техніки ми залишаємо дедалі складніші умови вирощування культур.

Аналізуючи сучасний стан аграрного машинобудування та його розвиток, доцільно зазначити, що вектор, який тримають підприємства, направлений на збільшення енергоємності машин та агрегатів. Можна проаналізувати, що пропонують нам сільськогосподарські закордонні виробники, представляючи нову сучасну техніку на більшості виставок та підприємств, які займаються продажем та обслуговуванням.

Найчастіше керівники сільськогосподарських господарств, купуючи більш важку енергоємну техніку замість малогабаритних тракторів та знарядь обробітку ґрунту, переслідують ціль мінімізації парку та затрат на утримання техніки та кваліфікованих робітників. Але поряд з вирішенням одного питання з'являється декілька інших важливих питань щодо умов росту і розвитку рослин після обробітку ґрунту даними машинами та агрегатами. Адже головний показник, який впливає на економічний ефект, – це врожайність, а головною метою господарства є її збільшення.

На сучасному ринку машинобудування відбувається конкурентна боротьба, направлена на збільшення продуктивності, точності роботи, надійності, відповідності сучасним технологіям вирощування та обробітку. Це все і спричиняє, як зазначено вище, збільшення маси техніки та негативного впливу на родючий шар ґрунту.

З одного боку ми маємо більш чисельний тракторний парк, який з досить великою продуктивністю виконує всі поставлені задачі, а з іншого – питання

щодо раціональності використання громіздкої техніки при вирощуванні певних рослин. Відомо, що для кожної культури потрібні особливі умови, до яких входять технології сівби і обробітку, вирощування та умови зовнішнього середовища (у ґрунті), які сприяють відповідному проникненню вологи і поживних речовин, пористості тощо.

У минулому столітті такий розвиток машинобудування мотивувався покращенням технології вирощування, обробітку, полегшенням роботи водіїв та персоналу, який працював у господарстві. Зараз же до цієї мотивації впевнено можна додати і зменшення коштів, які потрібні для закупівлі і утримання значно меншої кількості техніки.

У процесі руху сільськогосподарської техніки поверхнею поля в результаті взаємодії рушія з ґрунтом відбувається процес деформації ґрунту. Деформуванню ґрунту під впливом рушіїв сільськогосподарських машин присвячені роботи багатьох науковців.[2, 12, 20].

Процес деформації ґрунту є дуже складним явищем. При дії короткочасного навантаження у ґрунті будуть спостерігатися залишкова та оборотна деформації, при чому залишкова деформація буде набагато перевищувати оборотну деформацію.

Оборотні деформації складаються з пружних і в'язких. Пружні деформації становлять малу частину оборотних деформацій, які протікають у результаті переміщення вузлів кристалічної решітки мінералів. Інша частина оборотних деформацій (в'язка) відбувається внаслідок зміни товщини водних плівок, які оточують тверді частини ґрунту [27].

Залишкові деформації відбуваються за рахунок зсуву частинок ґрунту (або її агрегатів) однієї щодо іншої (рис.1.1).

Отже, основним процесом, що обумовлює стисненість ґрунтів, є процес перегрупування твердих частинок, що супроводжується зменшенням пористості і збільшенням щільності.

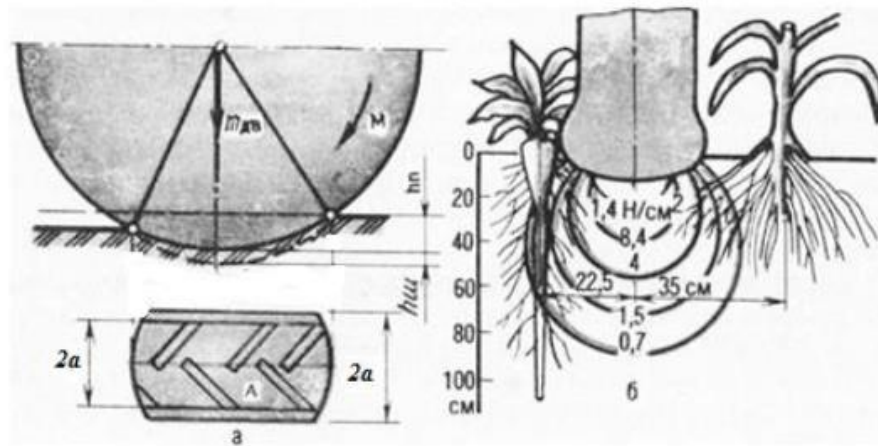


Рисунок 1.1 – Тиск колеса на ґрунт:

а) опорна площа контакту; б) розподіл тиску

Таким чином, при ущільненні ґрунтів мають місце три види деформації: залишкові, оборотні, пружні. Однак ступінь впливу кожного з них залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту і параметрів ущільнення. На основі в'язко пружних математичних моделей деформування ущільненості ґрунту можуть бути отримані більш обґрунтовані теоретично і більш точні формули для визначення показників взаємодії рушіїв машин і ґрунту, ніж при застосуванні моделей, що не включають в себе час [3].

Останнім часом у спеціальній літературі з'явився термін «Машинна деградація ґрунтів». Він позначає комплекс шкідливих наслідків, що викликаються колесами, гусеницями та робочими органами ґрунтообробних машин. Один з найбільш грізних факторів деградації ґрунтів – переущільнення [15]. Для того, щоб рослини розвивалися нормально, потрібно певне співвідношення між основними частинами ґрунту: твердими частинками, водою і повітрям. Оптимальним буде такий ґрунт, в якому тверді частки складають 50%, вода – 30 і повітря – 20% (рис. 1.2, а). Якщо ґрунт переущільнений (рис. 1.2, б), врожайність різко знижується. Це пояснюється тим, що переущільнений ґрунт погано вбирає вологу. Перерізи верхніх шарів неущільненого і переущільненого ґрунтів наочно показують, на скільки скорочується простір для повітря і води під дією коліс і гусениць сільськогосподарських машин. Збільшення об'єму цього простору оздоровлює ґрунт [2].



Рисунок 1.2 – Перерізи верхніх шарів ґрунту:

а – не ущільнений, б – переущільнений.

Білий колір – простір для повітря або води. Чорний колір – ґрунт

Вирощування сільськогосподарських культур на сьогоднішній день потребує багаторазових проходів техніки по полю, що спричиняє збільшення ущільнення ґрунту за рахунок впливу рушіїв МТА.

Відомо, що поле під час вирощування пшениці зазнає впливу ходових систем більш, ніж два рази, а під час вирощування цукрових буряків – близько шести. У наш час досить активно використовуються інтенсивні технології обробітку ґрунту. Головним недоліком даної технології є значне збільшення кількості проходів техніки по полю.

Під час технологічних процесів вирощування культур працююча техніка проходить полем близько 10 – 15 разів, в результаті загальна площа слідів може досягати 200% площі поля, близько 15 – 20% поля ущільнюється рушіями МТА від 6 до 20 разів, близько 80% - від 1 до 6, 10 – 15% поля залишається без взаємодії з рушіями [4].

Під час ущільнення в ґрунті відбувається ряд негативних процесів, які призводять до зменшення повітряного та водного простору між частинками ґрунту, особливо після проходу такої техніки як Т-150К. Щільність ґрунту для багатьох аграрних культур в даному разі може перевищувати максимально допустиму норму, яка складає 1,3 – 1,4 г/см³. Вологість за такої щільності зменшується більш ніж на 15%, а твердість зростає до 20 кг/м². Процес

збільшення щільності поширюється під рушіями даної техніки на досить значну глибину (50 – 60 см), але після 30 см значно послаблюється [4].

У науковій літературі приводиться безліч даних про те, як впливає зміна щільності на врожайність сільськогосподарських культур. Щільність, яка найбільш сприятлива для розвитку рослини в шарі ґрунту від 10 до 20 см становить 1,18 – 1,36 г/см³, після проходження важкої техніки вона становить: Т-34 – 1,40–1,44; МТЗ-80/82 – 1,39–1,44; Т-150К – 1,5; К-700 – 1,63 г/см³. У результаті збільшення щільності виникає ряд негативних наслідків, головним з яких є зміна фізико-механічних властивостей ґрунту. Втрати врожаю ячменю, які виникають після чотирьох разового проходження МТА по полю, можуть досягати 50%, а вівса – 30% [16].

Надмірно ущільнений ґрунт не здатен у повній мірі вбирати в себе всю вологу, утворювану на поверхні опадами. При наявності на полі схилів потік води змиває верхні шари ґрунту, таким чином збільшення ущільнення призводить до виникнення ерозії.

Зміна структури ґрунту, викликана ущільненням, та зміна пористості негативно впливає на повітряний режим. Зниження активності аеробної мікрофлори ґрунту насамперед впливає на корені рослини. У результаті цього до коренів не потрапляє потрібна кількість повітря, що позначається на зменшенні врожайності [4].

Найбільшій ущільнюючій дії ґрунти зазнають під час одночасної дії вертикального навантаження та вібрації, динамічних та горизонтальних зусиль, які виникають під рушіями працюючої техніки. Дані явища найбільш розповсюджені на погано вирівняних полях, особливо на прикатаних ґрунтах, які дуже погано поглинають ударні та динамічні впливи рушіїв МТА. Ще однією причиною слугує не дотримання швидкості роботи під час виконання технологічної операції.

Таким чином дотримання оптимальної швидкості руху може зменшити інтенсивність і силу ударних деформацій, які виникають у ґрунті, що забезпечує найменшу ущільнюючу дію рушія на поверхню поля. Проте

дотримання оптимальної швидкості руху призводить до зниження продуктивності за одиницю часу, що не завжди відповідає вимогам використання аграрної техніки. Дану суперечність можливо розв'язати збільшивши швидкість виконання технологічних операцій.

Для приведення родючого шару ґрунту до норми використовують ряд технологічних операцій, суттєво ж ущільнюються ґрунти вже за один сезон вирощування культури.

Таким чином дане питання має досить актуальне значення. Працюючи на полях важка техніка збільшує продуктивність виконання операції, але велика маса техніки та збільшена швидкість роботи призводить до надмірних вібрацій та інтенсивності коливань, що в свою чергу викликає підвищення ущільнюючого впливу рушіїв МТА на ґрунт. Головним питанням, яке ж ставиться перед агровиробниками, є підвищення продуктивності праці та зменшення затрат для виконання технологічних операцій. Досягається воно за рахунок використання енергоємної широкозахватної техніки.

1.2. Способи уникнення ущільнення ґрунту машинно-тракторними агрегатами

Вирішення питання уникнення ущільнення ґрунту машинно-тракторними агрегатами можливе за трьома напрямками: 1) зниження ущільнення; 2) запобігання ущільненню; 3) розущільнення ґрунту.

Останнім часом на ряду з обладнанням сільськогосподарської техніки здвоєними колесами та аровними шинами вчені рекомендують при створенні нових моделей обмежувати навантаження на одну вісь до 6 т та застосовувати тандем-колеса. Варто зауважити, що збільшення площі контакту колеса з ґрунтом не усуває повністю шкідливої ущільнюючої дії, але знижує її до мінімального [5, 9].

Виявити ефективність впливу рушіїв МТА на ґрунт можливо лише в конкретних польових умовах.

У наш час одним із основних способів боротьби переущільненням ґрунту є використання здвоєних або строєних коліс чи використання тракторів з гусеничним ходом (рис. 1.3) [6].



Рисунок 1.3 – Використання здвоєних, строєних шин

Основними функціями системи здвоєних коліс є збільшення тягового зусилля трактора за рахунок збільшення площі контакту колеса з поверхнею ґрунту та площі, на яку діє вага трактора. У результаті це призводить до зменшення ущільнення ґрунту.

Особливо дуже добре система здвоєних коліс себе показує при використанні трактора на вологих ґрунтах та при агрегуванні з важкою широкозахватною технікою. Використовуючи здвоєні колеса з правильно підібраним тиском, отримуємо відсутність глибоких слідів та зменшення ущільнюючої дії. Відомо, що спарені рушії зменшують буксування зі звичайних 20 – 30 до 5 – 10% [5].



Рисунок 1.4 – Використання гусеничного ходу

Такі ж переваги, а іноді й значно більші, мають трактори, що використовують систему напівгусеничного або гусеничного ходу (рис. 1.4). Гусеничний хід дозволяє максимально використовувати тяговий потенціал за рахунок великої площі контакту, що знижує витрати палива та зводить до мінімуму ущільнюючу дію на ґрунт [3, 4]. Італійський фермер Алессіо Бірінделлі в 2010 році, замінивши більшість колісної техніки гусеничною зекономив близько 900 000 євро на площі в 2000 акрів [2].

Також одним з методів зниження ущільнюючої дії є використання широкозахватних машин та комбінованих агрегатів. Це зменшує кількість багаторазових циклічних проходів МТА по полю.

Відомо, що не враховуючи транспортно-збиральні операції при вирощуванні озимої пшениці, площа, що покривається колесами і гусеницями тракторів на 1 га дорівнює в середньому 2226 тис. м², при вирощуванні кукурудзи – 18-30 тис. м², цукрових буряків – 30-32 тис.м² [12].

Але кількість проходів по одному й тому самому місцю поля неоднакова. Під час вирощування озимої пшениці більше 30% площі поля зазнає дворазового впливу рушіїв тракторів, 20% – шестиразової і 2% – восьмиразової. Не зазнають ущільнюючого впливу лише 10% площі поля. Поворотні смуги на полі за рік прикочуються понад 20 разів [6].

У процесі використання широкозахватної техніки все частіше використовують технологію використання «технологічної колії». Ця технологія Controlled Traffic Farming (CTF) більш широко розвинена за кордоном. Вона дозволяє не тільки знизити ущільнюючу дію коліс сільськогосподарської техніки, а й підвищити економічну ефективність використання польового транспорту (рис. 1.5) [16].

Ця система була розроблена в 70-тих роках. На практиці використання технологічних колій означає, що всі технологічні операції при підготовці ґрунту до вирощування та в процесі обробітку і збирання культури відбуваються по одним і тим же коліям (рис. 1.6).



Рисунок 1.5 – Вивантаження зерна комбайном у вантажівку, що рухається сусідньою технологічною колією



Рисунок 1.6 – Однакова ширина колії для всіх машин

Учені Австралії, Німеччині, Чехії довгий час вивчали та аналізували питання руху техніки по полю в рамках технології СТФ [12]. Під час проведення досліджень багато уваги приділялось також таким факторам як підвищення інфільтрації води, покращення схожості рослин, стабільність проростання на всій поверхні поля та збільшення врожайності.

Згідно з результатами досліджень, окрім зменшення процесу ущільнення, при використанні технології СТФ покращувалися й інші показники. До них належать доступ поживних речовин та вологи до коренів рослин, збільшення об'єму кисню в ґрунті тощо. За рахунок відкритих ґрунтових пор зменшується кількість водної і вітрової ерозії, а отже і змивання поживних речовин. Дослідження європейських вчених показали, що при використанні СТФ технології можливе збільшення врожаю до 10% [12].

Практично технологія СТФ була використана за кордоном лише у 1990-х роках після розповсюдження системи GPS, за допомогою якої і контролювалась точність руху агрегатів.

Питання запобігання ущільненню ґрунту найчастіше вирішується шляхом мінімізації впливу рушіїв на поверхню поля, тобто зведення до мінімуму кількості технологічних операцій. Серед таких є технологія No-Till (система нульового обробітку ґрунту) та Mini-Till (система мінімального обробітку ґрунту).

Система No-Till – сучасна технологія аграрного виробництва. Вона передбачає те, що ґрунт не орється, а вкривається подрібненими рештками рослин – мульчею. За даної технології майже відсутні водна та вітрова ерозія, адже верхній шар ґрунту не пошкоджується, також краще зберігається волога. Цю технологію найчастіше використовують у більш посушливій місцевості та на схилах в умовах вологого клімату.

Особливістю цього методу є мінімальна витрата ресурсів, але і врожайність при використанні даної технології значно нижча.

Система Mini-Till також направлена на зменшення використання енергоресурсів за рахунок мінімізації технологічних операцій та використання комбінованих агрегатів, її основою є зменшення глибини обробітку та використання плоскорізних ґрунтообробних знарядь [22].

Для процесу розущільнення підплучної підшви найчастіше використовують глибокорозпушувачі, які часто також виконують функцію культиватора, працюючи на глибину до 65 см.

1.3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є зменшення ущільнення ґрунту колісними рушіями шляхом розробки нових технічних і технологічних параметрів роботи МТА.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення таких завдань:

- провести аналіз способів та конструкцій технічних засобів, що зменшують ущільнення ґрунту;
- виконати теоретичні дослідження впливу рушіїв машинно-тракторних агрегатів на напружено-деформований стан ґрунту;
- здійснити експериментальні дослідження процесу ущільнення ґрунту рушіями машинно-тракторних агрегатів;
- здійснити економічне обґрунтування проекту дослідження.

Висновки по розділу

Із зазначеного огляду проблеми в даному розділі можна зробити наступні висновки, що тенденція швидкого розвитку аграрного машинобудування призводить до поступового збільшення ваги транспортного засобу та його ущільнюючої дії. Дана тема є актуальною, але деякі її питання не досліджені в достатній мірі.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РУШІВ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ НА ГРУНТ

2.1. Теоретичні підходи до впливу машинно-тракторних агрегатів на ґрунт

Сьогодні, поряд з класичною механікою ґрунтів, заснованою на визначенні напруженого стану ґрунту при допущенні лінійної залежності між зусиллями й деформаціями, застосовується багато інших методів.

У 1801 році М.І. Фусс запропонував гіпотезу, основою якої було поняття пропорційної залежності деформацій ґрунту від навантаження. А в 1885 році Ж. Буссінеск отримав рішення задачі про розподілення напружень у ґрунті в напівпросторі від дії зосередженої сили, започаткувавши основи теорії розподілення напружень у ґрунті. У другій половині ХІХ століття та з приходом ХХ ст.. Г.Є. Паукер, М.Леві, У. Репкін, Л.Прандль створили принципи сучасної теорії граничної рівноваги сипучих середовищ [11].

До появи в літературі робіт К. Тергаці науковці розглядали ґрунти як суцільні, однорідні, однофазні, матеріали, часто вважали, що щільність та вологість у процесі деформування майже не змінюється. К.Теграрці у своїх роботах описував, що основні явища, які спостерігаються у поведінці ґрунту під час навантаження залежать від зміни кількісного співвідношення фаз ґрунту у процесі деформування та від механічної взаємодії фаз.

До недоліків класичної механіки ґрунтів слід віднести, що вона не давала відповіді на основне питання визначення напруженого стану ґрунтів за межами лінійної, пружної стадії деформування.

За розрахунковими моделями М.М. Герсєванова дозволялось умовно надавати певні ідеальні властивості ґрунтам, як, припущення про рівномірний розподіл напруження за горизонтальними перерізами основи, поверхня якої навантажена [7].

Розглянемо моделі ґрунтів, які зводяться до відношення «напруження - деформація», контактні моделі. Поділ всіх моделей можна виконати за такою ознакою: входить чи ні в їх рівняння час. Моделі, які мають в своїх рівняннях залежність від часу, називають реологічними. В основному їх беруть зі статичних моделей, в яких час не беруть до уваги з додаванням в'язкості, подібно до моделей Максвелла чи Бінгама [26]. Існують і більш складні t-моделі, які не виводяться прямо із статичних. Детально в своїх працях описує моделі Вялов С.С. [12].

У такій науці як реологія, пружні, в'язкі та пластичні властивості тіл моделюють набором механічних елементів, які з'єднують паралельно чи послідовно. Такі моделі частіше всього моделюють, як ідеально пружне тіло (підкорюється закону Гука); модель із в'язкими властивостями та ідеально пластичним тілом – Сен-Венома [6].

Розходження, яке виникає між дійсними властивостями ґрунтів та їх моделями призвели до виникнення багатоелементних моделей з великою кількістю пружних та в'язких елементів.

Інший загальний поділ пов'язаний із встановленням залежності «напруження - деформація». З урахуванням того, що ґрунт є не суцільним, а дискретним середовищем, його реальною моделлю може бути та, яка описує взаємодію окремих частинок з урахуванням фізичного виду зв'язків між ними. У загальній літературі цей напрям має назву мікропідходу.

Альтернативою цій моделі є макropідхід, заснований на гіпотезі про безперервність ґрунтового середовища.

Континуальні моделі, які звичні для механіки суцільного середовища, можна провести за такими ознаками: моделі лінійно-деформованого середовища; граничної рівноваги; моделі пружно-пластичного середовища.

Найбільш поширеними моделями в інженерній практиці механіки ґрунтів є моделі лінійно-деформованого середовища. У цих моделях, крім разового навантаження і лінійної залежності між напруженнями та деформацією,

розглядають тільки загальну деформацію без поділу на пружну й пластичну складові [20].

Рівняння цих моделей записуються у вигляді:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x - \mu(\sigma_y - \sigma_z); \quad \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy}; \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x); \quad \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz}; \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y); \quad \gamma_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx}; \quad (2.3)$$

де E – модуль загальної лінійної деформації, μ – коефіцієнт Пуассона.

Моделі теорії граничної рівноваги ґрунту відповідають умовам, коли в ґрунтовому середовищі у всіх точках виконується умова граничної рівноваги, а в елементах масиву переважають пластичні деформації (т. С графіка $S=f(\sigma)$, рис. 2.1).

Систему рівнянь можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\tau_{xz}}{\partial z} = x; \quad (2.4)$$

$$\frac{\tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial z} = z; \quad (2.5)$$

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xz}^2 = (\sigma_x + \sigma_z + 2C \cdot \operatorname{ctg} \varphi)^2 \sin^2 \varphi; \quad (2.6)$$

де C – питоме зчеплення ґрунту; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту; x, y – компоненти об'ємних сил.

Одним із недоліків даних рівнянь є те, що вони дають задовільні результати лише за умови постійності значень характеристик міцності та реформованості ґрунтів усіх елементів масиву в будь-який момент навантаження [12].

Моделі пружно-пластичного середовища та теорії пластичної течії – це набір рівнянь, які визначають границі пружної поведінки середовища та зв'язок та зв'язок деформацій та напруг за межею пружної області. Базою для них є диференціальні співвідношення між напругами та деформаціями й можуть

ураховувати закономірності зміни механічних властивостей ґрунту як у процесі експерименту, так і в натурних умовах.

Компоненти деформацій та напруг у цих моделях поділяють на пружні й пластичні складові лінійних та кутових деформацій.

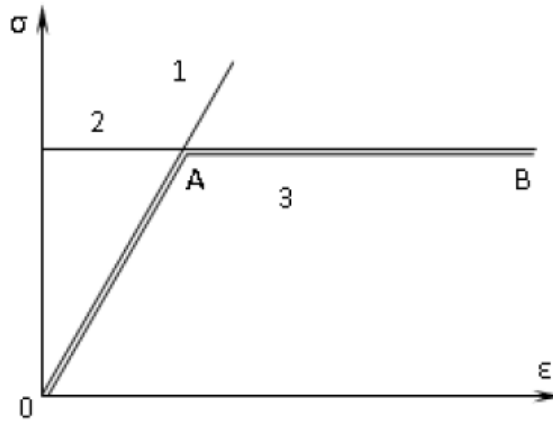


Рисунок 2.1 – Типовий вигляд графіків залежності між напругами (σ) та деформаціями (ϵ) моделей ґрунтів: 1 – лінійно деформованого середовища; 2 – жорстко-пластичного тіла; 3 – пружно-пластичного тіла (діаграма Прандтля)

Лінія 3 на рис. 2.1 показує властивості досить поширеної моделі ідеального пружно-пластичного тіла. У цій моделі межі пропорційності, текучості та міцності збігаються в точці *A*.

Сучасні задачі механіки ґрунтів дуже різноманітні, але не дозволяють в повному обсязі відповісти на більшість практичних питань.

У роботах М.Л. Зоценка детально розглянуто процес деформації ґрунтів від дії на нього місцевого зростаючого навантаження [12]. Під час взаємодії на поверхню ґрунту жорсткого штампу фундаменту виникає складний напружений стан, який суттєво відрізняється від компресійного стиснення, бо ґрунт крім нормальних відчуває і дотичні напруження, які при досягненні певної величини можуть викликати незворотні зрушення.

Залежність між напруженням і відносною деформацією ґрунту має досить складний характер [12]. На графіку (рис. 2.2) виділено три зони. Перша зона – ділянка *OB*. Тут виникають переважно пружні деформації. У межах цієї ділянки

знаходиться так звана структурна міцність ґрунту σ_s – напруження, до якої має місце лінійна залежність між σ і ε (відрізок OA).

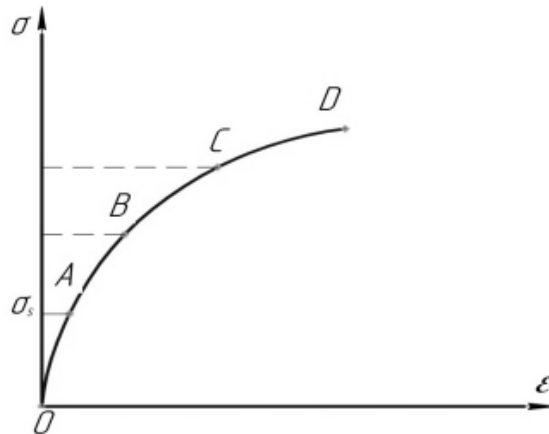


Рисунок 2.2 – Залежність між напруженням і деформацією ґрунту

Якщо напруження перевищує величину σ_s , відбувається ущільнення ґрунту за рахунок зменшення його пористості. При подальшому збільшенні напруження (ділянка BC) ґрунт ущільнюється інтенсивніше, хоча вплив дотичних напружень поки ще незначний, тому частки ґрунту переміщуються, в основному, вниз і не зміщуються в сторони.

Вплив тиску поширюється на велику глибину. Глибина проникнення тиску залежить від щільності ґрунту: чим вище щільність, тим глибше проникає тиск. Але й на цій ділянці залежність між напруженням і осадкою ґрунту (деформацією) звичайно приймається лінійною. Ця фаза вважається безпечною навіть при розрахунках фундаментів.

Подальше збільшення навантаження викликає пластичні деформації. При напруженнях, які відповідають ділянці CD , відбувається різке осідання ґрунту, видавлювання його в сторони і нагору. Починається процес руйнування. У цьому випадку під дією зростаючих дотичних напружень розвиваються зсуви ґрунту по так званим лініям ковзання. Ґрунт знаходиться в пластичному стані або в стані повзучості. Фактично він поводить себе, як дуже в'язка рідина. У будівництві ця фаза викликає катастрофи. Якщо подібні явища розвиваються під колесами машин, що працюють на полях, вони буксують, осідають, і тоді виникає потреба в додатковій техніці у вигляді тягачів, щоб звільнити поле від руйнівної атаки.

Досвід показує, що в межах ділянок OB і BC ґрунт поводить, як суцільний матеріал. Напруження зменшуються (розсіюються) в міру віддалення від місця навантаження як углиб, так і в сторони. В зв'язку з тим, що частинки ґрунту дуже малі, реальні сили, які діють між ними, можна замінити умовними силами, розподіленими за об'ємом. Ці внутрішні зусилля, як відомо, називаються напруженнями. Закономірність їх розподілу залежить від величини і характеру зовнішнього навантаження.

Отже, для оцінки напружено-деформованого стану ґрунту в нашому випадку можна використовувати положення механіки суцільного середовища.

З огляду на поведінку ґрунту під навантаженням, яка характеризується графіком на рис. 2.3, робимо висновок, що в даному випадку застосована теорія лінійно деформованого середовища, згідно з якою деформації змінюються прямо пропорційно напруженням, тобто ґрунт, як досить пружний матеріал, підкоряється закону Гука. Тому в даному випадку можна використовувати математичний апарат теорії пружності.

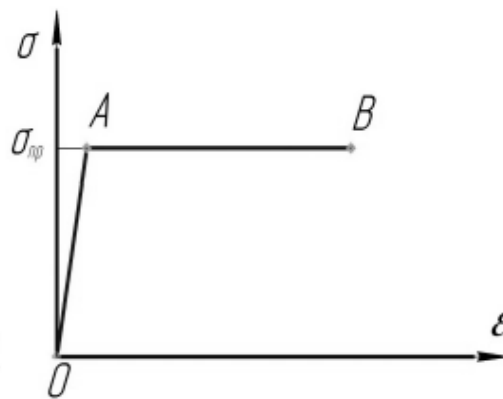


Рисунок 2.3 – Діаграма ідеального пружно-пластичного матеріалу

Відомо, що розрахунки, на основі теорії пружності виконуються в інтервалі напружень, при яких середовище вважається суцільним, однорідним, ізотропним і не деформується в часі. Відносно ґрунту це справедливо лише з певним наближенням. У зв'язку з цим були зроблені спроби створення більш точних механічних моделей ґрунту. Такими моделями є, наприклад, реологічні, які враховують тимчасові явища.

2.2. Інструментальні методи і засоби дослідження ущільнення ґрунту

Процес визначення напруження у ґрунті під рушіями техніки, яка працює на полі досить складне завдання. Отриманню точних результатів вимірювань перешкоджають деякі фактори. Насамперед, ґрунт – це неоднорідне середовище і всі процеси, що в ньому протікають, проходять при різних умовах по різному. Тому, на нашу думку, відомі прилади для визначення напружень у ґрунті частково не задовольняють наші потреби.

У сучасному аграрному виробництві для визначення ущільненості ґрунту та глибини залягання під плужної підшви використовують пенетрометр (твердомір) рис. 2.4 [18].

Твердомір – це прилад, який вимірює твердість ґрунту.



Рисунок 2.4 – Пенетрометр (твердомір): 1– робочі стержні, 2 – дисплей в межах від до 450 мм, діапазон вимірювань тиску від 0 до 100 кг/см²

Для дослідження напружень і деформацій у ґрунті відомий пристрій, який має корпус з направляючими руху, каретку з датчиками тиску та інше [2].

Недоліком такого пристрою є те, що внаслідок розташування датчиків в одній площині, неможливо визначити одночасно нормальні та дотичні напруження в ґрунті від дії рушіїв транспортних засобів.

Також є пристрій для вимірювання напружень у ґрунті, що складається з основного диска, допоміжного диска з каліброваними кульками, які встановлені по його периметру, а кришка виконана з виступом та гнучкими балочками з допоміжними тензодатчиками та ін. [8].

Суттєвим недоліком такого пристрою є значна похибка виміру як нормальних, так і дотичних напружень у ґрунті. Це пов'язано з тим, що під дією зовнішнього нормального зусилля верхній диск деформується (прогинається) по периферії, а це призводить до виникнення дотичних напружень і деформації тензодатчиків. Внаслідок цього значно затрудняється процес отримання дійсних значень одночасно як нормальних, так і дотичних напружень в ґрунті, що виникають від дії рушіїв транспортних засобів.

2.3. Експлуатаційні параметри машинно-тракторних агрегатів, що впливають на ущільнення ґрунту при агрегуванні

Питанням підвищення тягово-зчіпних властивостей та зменшенню ущільнюючої дії рушіїв на ґрунт приділяли багато вчених особливо: Ю.А., Ксенович І.П., Ляско А.А., Frank M. Zoz., Robert D. Grisso, Cudzik, A., Białczyk, W., Brennenstul, M., Czarnecki, J. [24, 25]

Горячкін В.П. у своїх роботах звертає особливу увагу на енергетичну оцінку тракторного агрегату і вказує на необхідність оцінки джерела енергії (трактора) та засобу виконання безпосередньо роботи (агрегату).

До головних параметрів, що характеризують роботу сільськогосподарського агрегату слід віднести: 1) тягово-зчіпні властивості; 2) ККД агрегату; 3) продуктивність.

Аналізуючи літературу про тягово-зчіпні властивості трактора з агрегатом, ми дійшли висновку, що найбільшого поширення набула оцінка Полетаєва А.Ф. [20]. Згідно його досліджень тягова характеристика являє собою комплекс залежностей швидкості руху, тягової потужності, питомої витрати палива, буксування, числа обертів колінчастого вала двигуна трактора від тягового зусилля. Усі перелічені залежності можуть бути показані у вигляді графіків чи таблиць.

Тягову характеристику можна також розглядати як сукупність областей на графіку, обмежених відповідними кривими і характеризують різноманіття

варіантів агрегування трактора з машинами і знаряддями залежно від ступеня завантаження двигуна [4].

Тягові характеристики трактора встановлюють розрахунковим шляхом (при проектуванні) або в процесі тягових випробувань (для існуючої машини). Тягові випробування дозволяють охарактеризувати можливість поєднання трактора з машинами і знаряддями, а також оцінити його тягово-зчіпні, динамічні та економічні показники.

У роботі [20] детально описуються статичні коефіцієнти навантаження коліс, які визначаються з відношення:

$$\lambda_{\text{ст}1} = s/l; \lambda_{\text{ст}2} = (l - s)/l; \lambda_{\text{ст}1} + \lambda_{\text{ст}2} = 1, \quad (2.7)$$

де s – відстань від центру мас до осі заднього мосту, l – відстань між мостами трактора.

Ці коефіцієнти показують як саме відбувається розподіл навантаження між передніми та задніми рушіями трактора.

Записавши вирази суми моментів відносно точки O_2 і O_1 отримаємо статичні реакції Y_1 і Y_2 , які діють на колеса в статиці (Рис. 2.5).

$$Y_{\text{к}} = G \cdot s/l; \quad (2.8)$$

$$Y_{\text{п}} = G(l - s)/l. \quad (2.9)$$

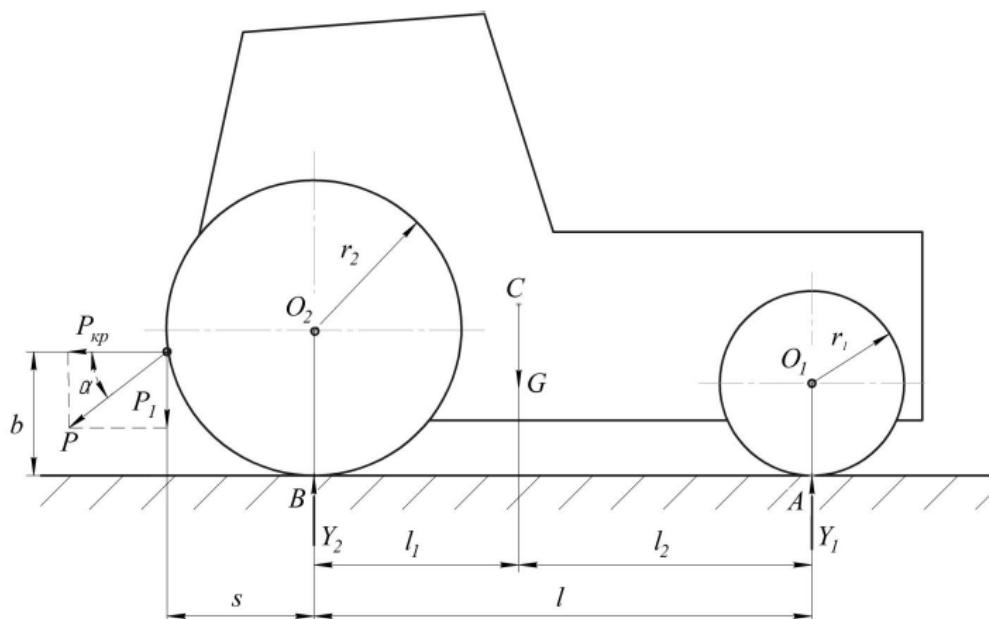


Рисунок 2.5 – Схема сил, що діють на колісний трактор

Для аналізу розподілу навантаження на колеса трактора під час його руху з крюковою силою вводять поняття динамічні коефіцієнти навантаження коліс λ_1 і λ_2 , які визначаються відношеннями:

$$\lambda_1 = \lambda_{ст1} - P \cdot b / (l - Q); \quad (2.10)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{ст2} + P \cdot b / (l - Q). \quad (2.11)$$

Визначення динамічних коефіцієнтів навантажень λ_1 і λ_2 проводилися з метою визначення динамічних нормальних реакцій:

$$Y_1 = \lambda_1 \cdot G; \quad (2.12)$$

$$Y_2 = \lambda_2 \cdot G. \quad (2.13)$$

У роботі [20] пропонується для вирівнювання нормальних реакцій на колеса трактора використання довантажувачів для збільшення зчіпної реакції колеса з ґрунтом.

Відомо спосіб підвищення тягово-зчіпних властивостей повнопривідних колісних тракторів, які реалізуються зміною кута дії сили тяги на крюку зчіпки трактора [17].

До недоліків такого способу належить обмеженість його використання, а саме – регулювання перерозподілу нормальних реакцій на ґрунт тільки зміною кута дії сили тяги.

Більш кращим за технічною сутністю способом перерозподілу нормальних реакцій ґрунту на рушії повнопривідних тракторів, є спосіб зниження негативного впливу кінематичної невідповідності трансмісії повнопривідних машин [17].

Недоліком приведенного способу є наступне. Відповідно перерозподіл нормальних реакцій по ведучим осям трактора пропонується тільки зміною кута дії сили тяги на крюку, що обмежує можливості такого способу в його реалізації і знижує його універсальність.

Головними негативними показниками при невідповідності розподілення реакцій ґрунту на колеса є: зменшення тягово-зчіпних властивостей та збільшення ущільнюючої дії.

2.4. Напружено-деформований стан ґрунту під слідом колеса транспортного засобу

Наука про механіку ґрунтів отримала розвиток у зв'язку з необхідністю забезпечення стійкості і надійності фундаментів. У цих випадках доводиться мати справу зі значними питомими навантаженнями, які, як правило, викликають велику осадку ґрунту і перехід його в пластичний стан. При цьому в ґрунті розвиваються зрушення, інтенсивні деформації і ущільнення. Відомо також, що при досягненні напруженнями в ґрунті межі міцності або межі несучої здатності відбувається осідання штампа і випинання ґрунту в сторони і вгору. Це явище часто зустрічається на автомобільних дорогах. Само собою зрозуміло, що ці процеси неприпустимі під колесами і робочими органами машин, що працюють на полях.

У зв'язку з цим є всі підстави для використання в розрахунках з визначення напружень і деформацій теорії лінійно деформованого середовища, згідно з якою існує пряма пропорційність між тиском на ґрунт і його деформацією.

З точки зору науки про опір матеріалів та теорії пружності ми повинні прийняти такі припущення: залежність між напруженнями та деформаціями підкоряється закону Гука; ґрунт є суцільним, однорідним і ізотропним середовищем.

У місці контакту колеса із землею на ґрунт передається тиск, інтенсивність якого по ширині площадки контакту, з метою спрощення задачі, будемо вважати постійною (рис. 2.6), а закономірність зміни тиску уздовж лінії руху (по осі Oz) загалом не має значення, адже максимум тиску буде відчувати кожна точка утвореного сліду.

Таким чином, маємо смугу нескінченної довжини шириною $2a$, деформовану рівномірно розподіленим навантаженням інтенсивності q (рис. 2.7). Ця задача аналогічна вдавлюванню жорсткого штампа у напівплощину [21].

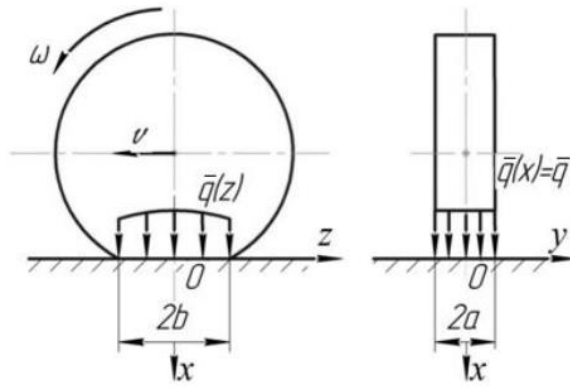


Рисунок 2.6 – Навантаження на ґрунт у місці контакту з колесом

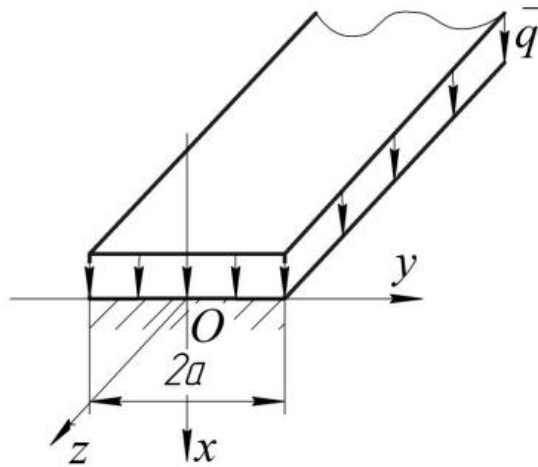


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема

Під час кочення колеса ґрунт під ним деформується у всіх напрямках, тому в довільній точці деформованого обсягу має місце об'ємний напружений стан, який описується дев'ятьма величинами, що характеризують напружений стан елементарного об'єму.

Як відомо, використання апарату механіки суцільного середовища для розрахунку напружень і деформацій у масиві ґрунту виявляється справедливим лише у випадках, коли розміри масиву і розміри ділянок, через які передається навантаження на масив, значно перевищують розміри елементарного об'єму. У нашому випадку ці умови дотримані.

Шукані напруження в ґрунті є компонентами тензора напружень, який відповідно до вибраної системи координат можна записати у вигляді:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} . \quad (2.14)$$

Висновки по розділу

Таким чином, для практичного дослідження напруженого стану ґрунту за допомогою більшості моделей, з'являється потреба у розв'язанні складного математичного апарату. Застосування цих моделей не дають змоги швидко в числах отримати результат, для надання практичних рекомендацій у кожному конкретному випадку.

Використання причіпного та навісного обладнання призводить до нерівномірного перерозподілу реакцій на ґрунт між переднім і заднім мостом трактора. Виникає питання в пошуці реальних оптимальних параметрів агрегування обладнання, які б призводили до мінімальної ущільнюючої дії та реалізовували б максимальні тягово-зчіпні властивості.

Під час експлуатації енерго-засобів на полі часто виникає питання кінематичної невідповідності спарених коліс, або кінематично пов'язаних під час криволінійного руху, що призводить до додаткових затрат потужності.

Ціль дослідження полягає в розробці, модернізації та реалізації заходів з підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва, на основі використання сучасних технологій вирощування зернових та овочевих культур, при використанні сучасних екологічно безпечних агрегатів, а також обґрунтування методики розрахунку ущільнюючої дії рушіїв МТА на ґрунт, яка базувалася б на результатах досліджень процесів деформації, а також розробці рекомендацій щодо зниження ущільнюючої дії тракторів та с.-г. машин.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЛІСНИХ РУШІВ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ НА УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ

3.1. Технічні засоби для забезпечення експериментальних досліджень

Досить важливим етапом по визначенню зміни напруження та щільності ґрунту під час впливу рушіїв МТА є експериментальні дослідження. Для скорочення термінів проведення експериментальних досліджень та для отримання достовірних показань з мінімальною похибкою, слід використовувати системний підхід.

Експериментальні дослідження проводили за наступною програмою:

1) визначення головних та залишкових напружень у ґрунті під час першого і повторних наїздів на дослідну ділянку трактором МТЗ-82.

2) визначення головних та залишкових напружень під час першого і повторних наїздів під рушіями трактора CASE-340 Magnum.

Всі етапи експериментальних досліджень проводилися на різній глибині та різній відстані від центра колеса.

Для травмування ґрунту використовувалися трактори марок МТЗ-82 і CASE 340 Magnum. Їх технічні характеристики наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики тракторів

Показники	МТЗ-82	CASE 340 Magnum
Тяговий клас	1,4	3
Швидкість руху, км/год.	2,1-24,5	40
Модель двигуна	Д-243	FPT Cursor 9 / Tier II
Робочий об'єм, л	4,75	8,7
Потужність двигуна, к.с.	60	340
Габаритні розміри, мм		
– довжина, мм	3930	6100
– ширина	1970	3100
– висота	2765	3500
Експлуатаційна маса, кг	3900	11931
Шини передніх коліс	9x20	Здвоєні 480/70R34
Шини задніх коліс	15x38	Здвоєні 710/70R42
Питомий тиск на ґрунт від передніх коліс, МПа	0,08	0,05
Тиск повітря в передніх шинах МПа	0,27	

Використані машини є найбільш поширеними в сільських господарствах регіону і належать до різних класів за тяговими характеристиками. Це дало можливість розширити діапазон вимірів.

3.2. Експериментальні дослідження по визначенню ущільнюючого впливу на ґрунт рушіїв трактора МТЗ-82

Експеримент проводився на ділянці ґрунту – глинистий чорнозем, з використанням найбільш розповсюдженого трактора 1,4 класу МТЗ-82. Перед початком проведення дослідів поле було двічі продисковане.

Для кожної дослідної точки в ґрунті проводилося чотири серії дослідів: визначення залишкових деформацій при наїзді трактора на точку і працюючому двигуні, при вимкненому двигуні, після з'їзду трактора і після повторного наїзду.

Після першої серії навантажень дослід повторювався, повторний рух транспортного засобу по одному сліду. На рис. 3.1 зображені порівняльні криві зміни напруження σ_x при першому та повторному наїзді на дослідну точку. Повторний рух по одній колії збільшує напруження на 2–15% залежно від глибини. При цьому щільність ґрунту збільшується на 1–3% відносно щільності після першого проїзду.

Порівнювані результати теоретичних та дослідних даних наведено на графіках (рис. 3.2), з яких можна оцінити значення динамічного коефіцієнта.

Як відомо, динамічний коефіцієнт дорівнює відношенню навантаження на ґрунт при працюючому двигуні до статичного навантаження. У нашому випадку це відношення однойменних напружень виміряних при працюючому і вимкненому двигуні трактора. Він залежить від місцезнаходження вимірюваної точки і змінюється від 1,01 до 1,7.

Із даних графіків (рис. 3.2) видно, що теоретичні дані з дослідними мають розбіжність від 2 до 4%.

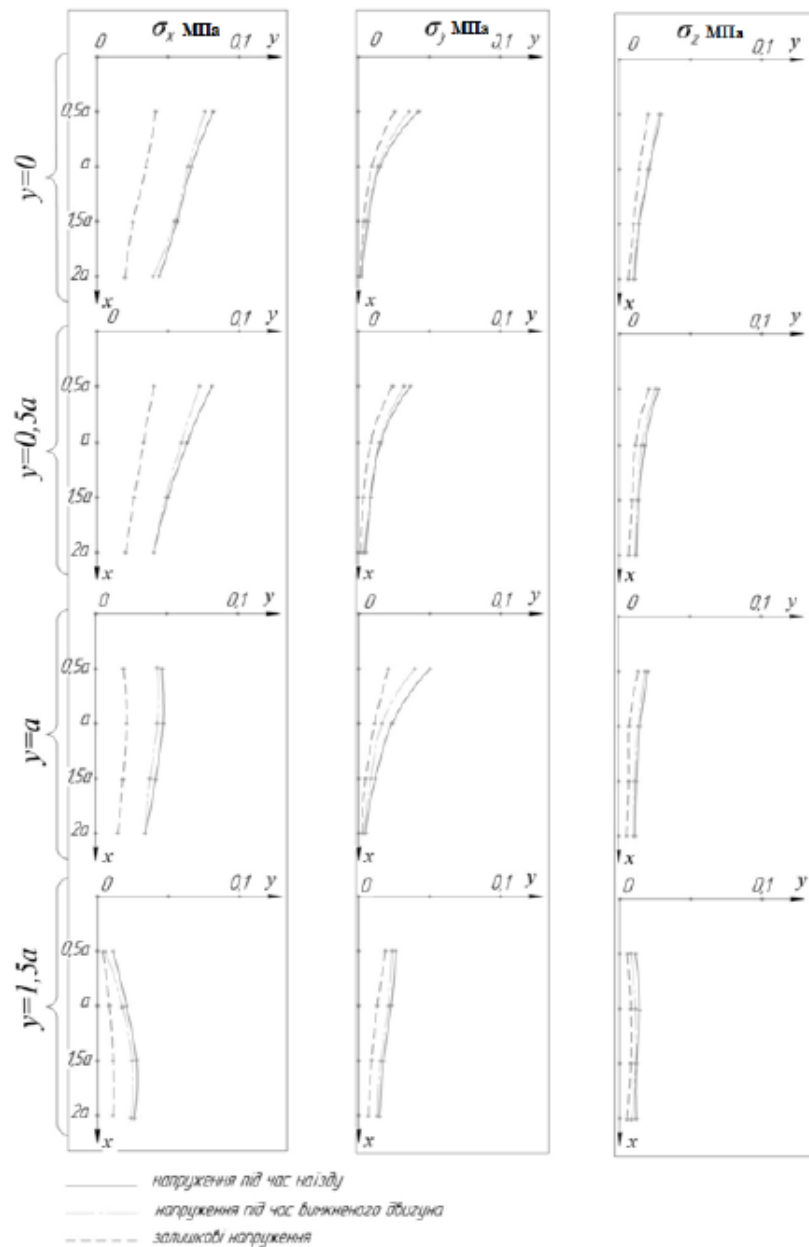


Рисунок 3.1 – Графіки зміни експериментальних значень напружень у ґрунті під передніми рушіями трактора МТЗ-82

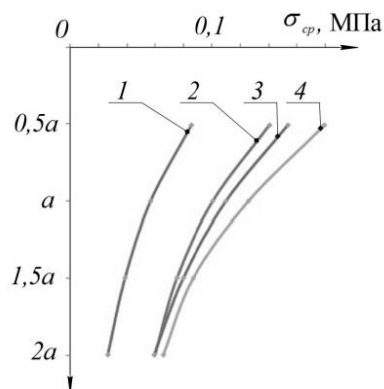


Рисунок 3.2 – Графіки теоретичних і експериментальних значень напружень: 1 – залишкових; 2 – теоретичних; 3 – статичних; 4 – динамічних під колесами трактора МТЗ-82

Зміна щільності ґрунту під передніми рушіями трактора МТЗ-82 наведена на рис. 3.3.

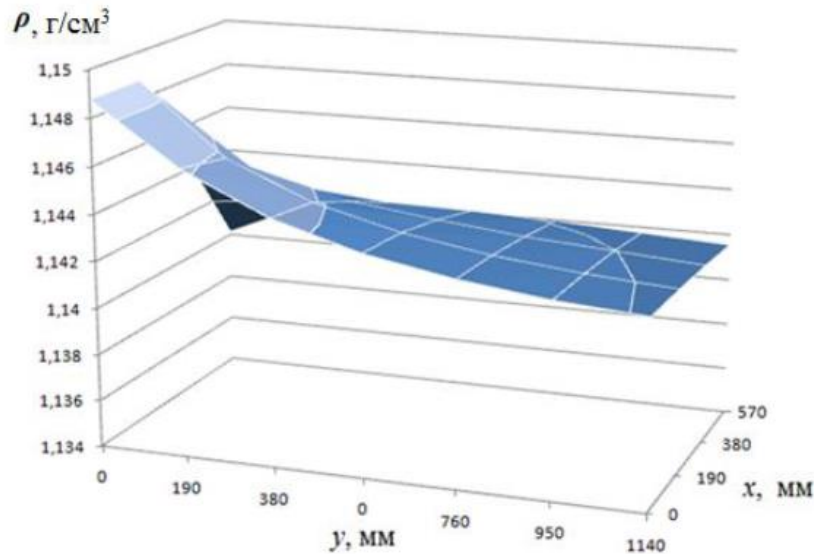


Рисунок 3.3 – Зміна щільності ґрунту під передніми рушіями трактора МТЗ-82

3.3. Експериментальне визначення ущільнюючого впливу на ґрунт при експлуатації трактора CASE 340

Дослідження проводилися ділянці поля – глинистий чорнозем з використанням трактора французького виробника CASE-340 Magnum (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Трактор CASE 340 Magnum

Як відомо, з метою зменшення негативного впливу колісних тракторів на ґрунт використовують «систему здвоєння» коліс. Використання здвоєних коліс зменшує питомий тиск на ґрунт і ущільнення ґрунту в 1,5–2,0 рази. При цьому

збільшується ширина колії і тягова здатність трактора, підвищується прохідність і стійкість, а також збільшується вантажопідйомність трактора, що дозволяє підвищити його продуктивність.

При правильно дібраному тиску повітря в шинах здвоєних коліс загальна вага машини розподіляється на велику площу контакту шин з ґрунтом. Наслідком цього є відсутність глибоких слідів від коліс і відсутність переущільнення ґрунту. Крім того, збільшується тягове зусилля за рахунок кращого зчеплення протекторів шин з ґрунтом.

Питомий тиск на ґрунт визнався за формулою:

$$q = \frac{m_T}{2B_{\text{п}}l_{\text{п}} + 2B_3l_3} = 0,05 \text{ МПа}, \quad (3.1)$$

де m_T – експлуатаційна маса трактора, $B_{\text{п}}$, B_3 – ширина ободу шини передніх і задніх коліс, $L_{\text{п}}$, L_3 – довжина опорної частини передніх і задніх коліс. Дана формула використовується для визначення питомого тиску трактора зі звичайною колісною схемою. У нашому випадку дійсний питомий тиск буде вдвічі менший, тому що використовуються здвоєні рушії.

Визначення напружень у ґрунті проводилися у тій же послідовності, що й для трактора МТЗ-82.

Теоретичні значення напружень σ_x , σ_y і σ_z визначалися за формулами наведеними в розділі 2, які можна використовувати також і у випадку здвоєних коліс згідно з однією з двох схем (рис. 3.5). Обидві схеми дають однаковий результат, якщо $a_1 = 2a_2$.

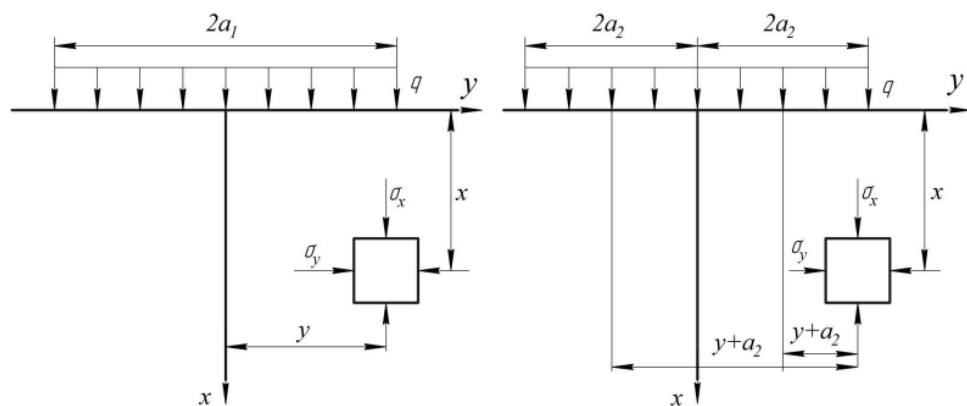


Рисунок 3.5 – Розрахункові схеми для визначення напружень у випадку здвоєних шин

Результати досліджень зображено на рис. 3.6–3.8.

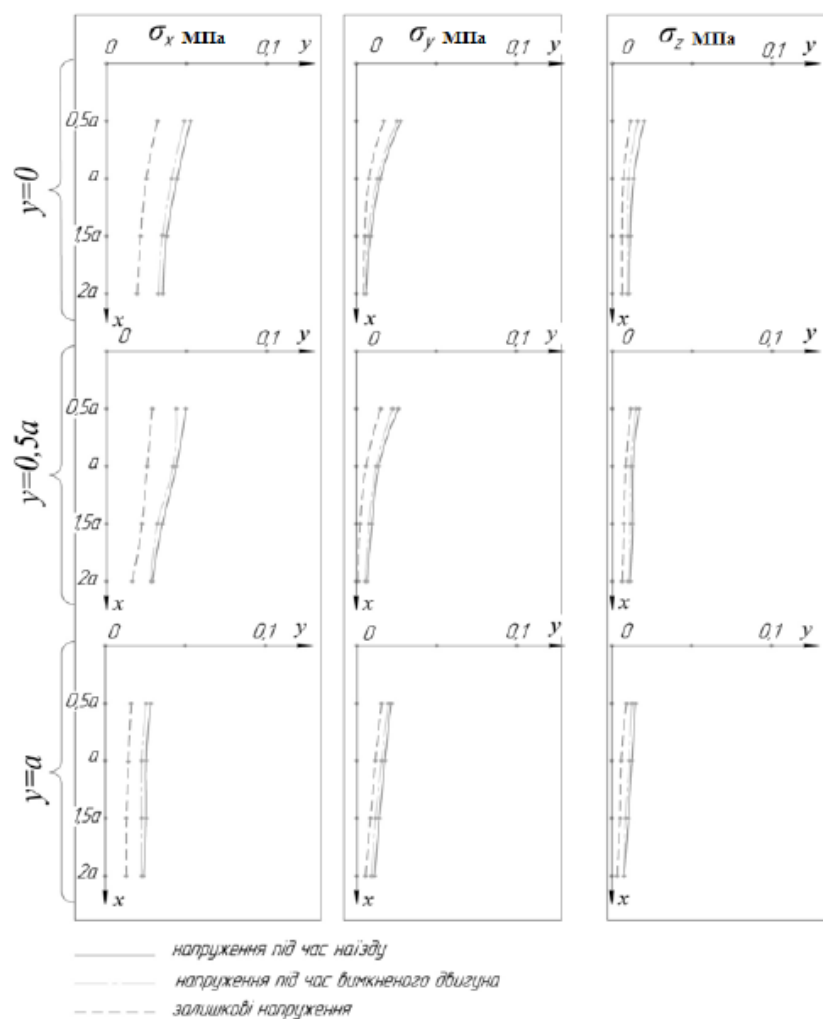


Рисунок 3.6 – Графіки зміни експериментальних значень напружень у ґрунті під передніми рушіями трактора CASE-340

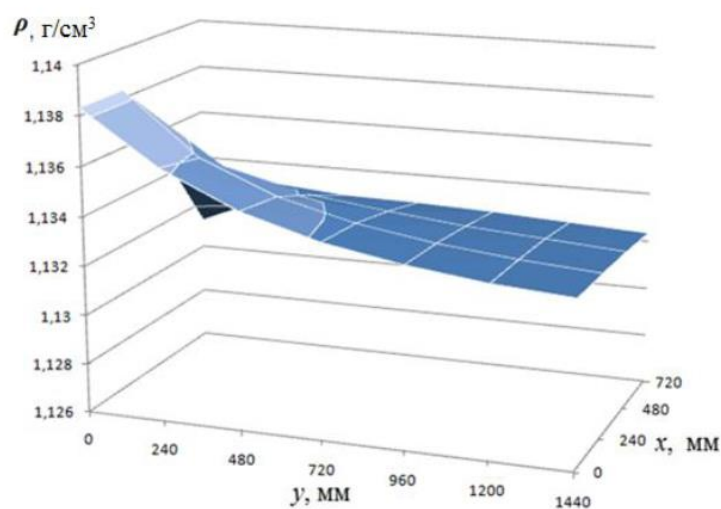


Рисунок 3.7 – Зміна щільності ґрунту під рушіями CASE-340 (базова комплектація)

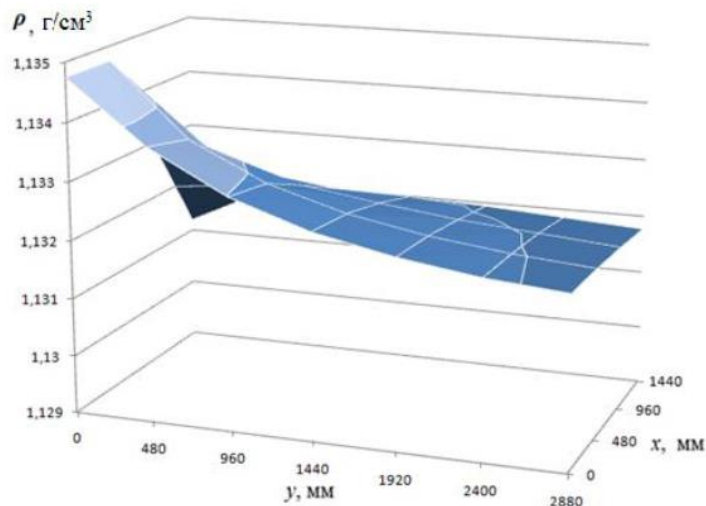


Рисунок 3.8 – Зміна щільності ґрунту під рушіями CASE-340
(спарені шини)

У табл. 3.2. показано як саме впливає зміна щільності ґрунту на зменшення врожайності конкретних зернових культур.

Таблиця 3.2 – Залежність зміни врожайності від зміни щільності ґрунту

Щільність чорнозему	Кількість рослин	Кількість продуктивних стебел	Маса 1000 зерен, г	Врожайність, ц/га
<i>Пшениця</i>				
0,9	340	480	25	46
1,0	260	460	32	44
1,1	240	440	25	40
<i>Овес</i>				
0,9	250	560	33	44,2
1,0	225	500	32	38,3
1,1	175	440	30	32,2
<i>Ячмінь</i>				
0,9	225	500	46	37,0
1,0	175	480	49	25,5
1,1	163	340	45	25,7

Використовуючи здвоєні чи строєні колеса, слід приділити увагу також тиску в шинах. Адже при неправильно підбраному тиску одне з коліс може рухатися з юзом, або працювати як фреза, цим самим збільшуючи витрати енергії та змінювати структуру верхнього шару ґрунту.

Особливо питанню кінематичної невідповідності спарених коліс слід більш приділити увагу, коли використовується трактор із блокуванням міжосьового диференціала.

Залежно від типу трактора та величини кінематичної невідповідності спарених коліс втрати потужності досягають 15%.

У свою чергу, у багатьох господарствах при використанні навісного знаряддя інженери віддають більший пріоритет питанню покращення тягових характеристик, ніж питанню ущільнення ґрунту та часткових втрат керованості. На нашу думку, налаштування навісного знаряддя повинно забезпечити оптимальні умови, при яких не буде відбуватися буксування та буде збалансована реакція ґрунту на мости трактора. Особливо це важливо при використанні повнопривідних машин, тому що в них досягти балансу між ущільнюючою дією рушіїв на ґрунт та зчіпними властивостями коліс з поверхнею поля значно легше.

Висновки по розділу

В результаті проведених експериментальних досліджень з використанням тракторів МТЗ-82 та CASE 340 Magnum маємо: середні напруження σ_{cp} від дії рушіїв трактора МТЗ-82 на глибині $0,5a$ склали: під час наїзду 0,063 МПа; після з'їзду (залишкові) – 0,029 МПа. При використанні трактора CASE: під час наїзду 0,032 МПа; після з'їзду (залишкові) – 0,019 МПа. Відповідно щільність під рушіями МТЗ-82 зросла на 3%, а під рушіями CASE на 2%.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Організація умов та заходів з охорони праці при роботі з машинно-тракторними агрегатами

Керівникам сільськогосподарських підприємств, головам фермерських господарств, інженерам з охорони праці потрібно організувати роботу працівників згідно з вимогами Правил охорони праці у сільськогосподарському виробництві.

Обладнання, що надається працівникам та ними використовується за призначенням, має бути технічно справним і відповідати:

- вимогам технічних регламентів, якщо обладнання виготовлене після дати обов'язкового застосування відповідних технічних регламентів, що поширюються на нього;

- загальним вимогам безпеки до обладнання, що зазначені у нормативно-правових актах з охорони і гігієни праці та відповідних нормативних документах на його виготовлення, якщо обладнання виготовлене до дати обов'язкового застосування відповідних технічних регламентів, що поширюються на нього.

Якщо під час експлуатації обладнання можливе виділення шкідливих речовин у повітря робочої зони, воно має бути обладнане місцевою вентиляцією.

Трактори обладнують звуковим сигналом із увімкненням з робочого місця. Рівень звуку цього сигналу на відстані 1м від трактора має перевищувати не менше ніж на 8дБА зовнішній шум трактора. Рівень звуку зовнішнього шуму тракторів та машин не має перевищувати 80 дБА.

Гальма засобів малої механізації, які застосовують під час збирання урожаю і транспортування його у складські приміщення, таких, як підвісні транспортні лінії, стрічкові транспортери, електричні талі, візки, що

переміщуються надґрунтовими реєстрами, та інших мають бути справними та заблокованими з пусковими пристроями.

Працівники мають використовувати відповідний спецодяг, спецвзуття та засоби індивідуального захисту органів дихання та зору.

Також працівникам заборонено перебувати у зоні можливого руху маркерів або навісних машин під час розвертання машинно-тракторних агрегатів.

Під час руху агрегату не допускається одночасне обслуговування одним працівником двох або більше сівалок. Завантаження сівалок і садильних машин насінням, садильним матеріалом та добривами має бути механізованим. Ручне завантаження дозволяється лише за умови зупинення посівного або садильного агрегату та вимкнення двигуна трактора.

Заміну, очищення і регулювання робочих органів навісних машин і знарядь, які підняті, потрібно проводити тільки спеціальними чистками в рукавицях із зупиненим, загальмованим агрегатом та вимкнутим двигуном. Обов'язково потрібно вжити заходів, що запобігають їх самовільному опусканню.

Експлуатація сільськогосподарських машин (сільськогосподарських тракторів, їх причепів і змінних причіпних машин, систем складових частин та окремих технічних вузлів) має здійснюватися з урахуванням вимог експлуатаційної документації.

Вузли та елементи сільськогосподарських машин, що рухаються, обертаються та можуть становити небезпеку, мають бути огорожені захисними кожухами, які забезпечують безпеку працівників.

Не дозволяється: експлуатація несправних машини та обладнання; експлуатація сільськогосподарських тракторів без електростартерного запуску двигуна та з відсутньою або несправною системою блокування запуску двигуна за ввімкнутої передачі.

Перед тим, як починати виконання робіт, потрібно переконатися, що дрти повітряних ліній електропередач не буде зачіпати техніка, яка під ними

проїжджає. А під час проїзду сільськогосподарської техніки потрібно дотримуватися безпечної дистанції.

4.2. Моделювання процесів виникнення травм при роботі із машинно-тракторними агрегатами

Під час функціонування системи «Людина – середовище» за різних причин виникають випадкові події, які утворюють травмонебезпечні та аварійні ситуації, пов'язані між собою причинно-наслідковими зв'язками. Усі ці події можна розглядати, як статистично залежні або статистично незалежні між собою компоненти, що утворюють логічні моделі виробничих процесів, які вивчаються.

Метод логічного моделювання потенційних аварій і травм надає можливість розробити досконалу систему управління безпекою життєдіяльності на виробництві, яка базується на оперативному пошуку виробничих небезпек, їх поглибленому логічному аналізі і терміновому прийнятті заходів для усунення потенційних небезпек ще до виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій.

Аналіз побудованої логічної моделі технологічного процесу дозволяє знайти первинну подію, з якої починається утворення небезпечної ситуації. Крім того, логічні моделі дають можливість виявити причетність окремих осіб до виникнення небажаних подій, а також ступінь вини самого потерпілого. Метод є більш наглядним для процесу не тільки навчання, але і виховання в молоді стереотипу безпечної поведінки.

Під час побудови логіко-імітаційних схем використовують сукупність небезпечних подій, пов'язаних між собою причинно-наслідковими зв'язками, які у процесі діяльності можуть призвести до виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій. Головним елементом логічної моделі є поняття про небезпечну ситуацію (НС) – тобто випадкове явище, що передує виникненню травм, аварій, катастроф. [23]

При роботі із машинно-тракторними агрегатами логіко-імітаційна модель виникнення небезпечних ситуацій буде мати вигляд:

$$НУ - НД - НС - (А;Т)$$

У процесі роботи трактора було відключення двигуна (НУ), робітник намагається усунути недолік в умовах роботи машини, що працює (НД), це призводить до захоплення руки (НС) та травмуванню (Т) робітника.

Висновки по розділу

Таким чином, в розділі наведені заходи з охорони праці при роботі з машинно-тракторними агрегатами та показано моделювання виробничих небезпек при роботі з ними. Визначено, що при проведенні моделювання травмонебезпечних ситуацій можна уникнути травм та небезпечних ситуацій виконанні польових робіт.

РОЗДІЛ 5.

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЗДВОЄНИХ ШИН ТА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ КОЛІЇ

Використання здвоєних, строєних шин та технології технологічної колії при виконанні операцій сільськогосподарською технікою забезпечує не тільки зменшення ущільнюючої дії рушіїв на ґрунт, а й підтверджує правильність вибору методу з точки зору економічної ефективності. Як наслідок після проведення вищеперерахованих експериментальних досліджень у тракторів з використанням здвоєних рушіїв та в поєднанні з використанням технології Т.К. збільшується продуктивність. Головною ж метою було досягти максимальної продуктивності ґрунту, який забезпечує максимальний показник економічної ефективності (вартість додаткової продукції). Трактори з використанням здвоєних коліс дозволяють зекономити до 7% палива у вітчизняних виробників та до 10-15% в закордонних, в першу чергу це пояснюється покращенням тягово-зчіпних властивостей.

Головним критерієм ефективності техніки під час виконання технологічної операції є оцінка мінімуму приведених затрат.

Показник річного економічного ефекту під час виконання однієї технологічної операції отримаємо з виразу:

$$E_{\Gamma} = S_0 + E_H K_{y0} - S_1 + E_H K_{y1} + \Delta U_{\text{цпр}} W_1 T_1; \quad (5.1)$$

де S_0 і S_1 – експлуатаційні витрати базового варіанта та запропонованого на одиницю роботи, грн.; K_{y0} і K_{y1} – питома капіталовкладення для даних агрегатів, грн., $E_H = 0,15$ – коефіцієнт ефективності капіталовкладення; ΔU – підвищення врожайності культури під час використання здвоєних шин та технологічної колії, ц/га; $U_{\text{пр}}$ – ціна одиниці продукції, грн/ц; W_1 – продуктивність агрегату за годину змінного часу га/год.; T_1 – річна норма завантаження трактора з використанням здвоєних шин, чи Т.К., год.

Експлуатаційні витрати агрегату, які потрібні для виконання технологічної операції на одиницю виконаної роботи розраховуються за формулою:

$$S = Z + \Gamma + T_p + A; \quad (5.2)$$

де Z – заробітна платня одиниці обслуговуючого персоналу, грн.; Γ – вартість палива та мастильних матеріалів, грн.; T_p – вартість капітальних ремонтів технічного обслуговування, грн.; A – амортизаційні відрахування, грн.

Заробітна плата обслуговуючого персоналу, який обслуговує агрегат:

$$Z = \frac{Z_m n K_m}{W}; \quad (5.3)$$

де Z_m – річна тарифна ставка механізатора, грн/год; n – кількість працівників обслуговуючих агрегат, чел.; $K_m = 1,65$ – коефіцієнт враховуючий премії, надбавки за класність, стаж роботи, якість роботи, терміни виконання та ін.; W – продуктивність агрегату за годину змінного часу, га/год.

Вартість паливо-мастильних матеріалів використаних на виконання технологічної операції розраховується:

$$\Gamma = q_{\text{пал}} \Pi; \quad (5.4)$$

де $q_{\text{пал}}$ – витрати палива при виконання операції за один гектар, кг/га; Π – ціна палива включаючи мастило, грн/кг.

Відрахування на поточний капітальний ремонт з урахуванням вартості технічного обслуговування:

$$T_p = \frac{1}{100W} \frac{B_T \chi_T}{T_T} + \frac{B_M \chi_M n_M}{T_M}; \quad (5.5)$$

де, B_T та B_M – вартість трактора та машини, грн; χ_T і χ_M – норма відрахування на поточний ремонт та технічне обслуговування, %; n_M – кількість с.-г. машин в агрегаті, шт.

Амортизаційні відрахування:

$$A = \frac{1}{100W} \frac{B_T a_T}{T_T} + \frac{B_M a_M n_M}{T_M}; \quad (5.6)$$

де a_T і a_M – норма відрахування на трактор і машину, %.

Загальні капіталовкладення на трактор та с.-г. машину:

$$K_y = \frac{1}{W} \frac{B_T}{T_T} + \frac{B_M n_M}{T_M} ; \quad (5.7)$$

Економічна ефективність розглядалась з позиції використання здвоєних коліс та здвоєних коліс з поєднанням технології Т.К.. В розрахунках базовим варіантом було обрано трактор CASE 340 Magnum в поєднанні з плугом KUHN Challenger 9T, культиватором Landoll 9800 та сівалкою CASE SDX30 (табл. 5.1)

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунків

Найменування показника	CASE 340 Magnum	Landoll 9800	CASE SDX30	KUHN Challenger 9T
Продуктивність, га/год	-	6,9	8,75	1,3
Витрата палива, кг/га	-	6,1	6,14	24
Ціна машини, млн. грн.	-	0,486	2,1	0,706
Ціна обладнання для здвоєних коліс, грн.	10000	-	-	-
Кількість обслуговуючого персоналу, чол.	1	1	1	1
Кількість знарядь в агрегаті	1	1	1	1
Річне завантаження машини, год	1600	180	230	400
Експлуатаційна маса, кг.	11940	7500	11113	4048
Потужність двигуна, кВт	250	-	-	-
Тягове зусилля, кН	60	-	-	-
Робоча швидкість, км/год	-	9	13	6
Ширина захвату, м	-	10,7	9,1	9,3
Погодинна тарифна ставка, грн/час	-	6,04	7,63	30,6
Комплексна ціна палива, грн/кг	54			

Результати економічної ефективності використання спарених коліс в поєднанні з технологічною колією під час технологічних операцій культивації та сівби пшениці представлені в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Економічна ефективність використання спарених коліс

Найменування показника	Серійні шини			Здвоєні шини			Здвоєні шини з використанням технологічної колії			Економічна ефективність, S = 100га.					
										Здвоєні шини			Здвоєні шини + Т.К.		
	О	К	С	О	К	С	О	К	С	О	К	С	О	К	С
Продуктивність роботи, га/год.	1,3	10	8,75	1,5	11	9,6	1,5	11	9,6	0,2	1	0,85	0,2	1	0,85
Витрати палива, кг/га	24	6,1	6,14	20	5,71	5,8	20	5,76	5,82	4	0,39	0,34	4	0,34	0,32
Підвищення врожайності, ц/га	(42) 100%			(48) 114%			(50) 119%			180000 грн.			240000 грн.		
Витрати часу на виконання роботи, год.	76,9	10	11,4 3	66,7	9,09	10,4 2	66,7	9,09	10,42	-	0,91 год	1,01	-	0,91 год	1,01
Тарифна ставка, грн./га.	30,6	6,04	7,63	30	6,04	7,63	30	6,04	7,63	-	-	-	-	-	-
Витрати на з.п. водіям, грн..	4427			4427			4427			9460			9320		
Загальні експлуатаційні затрати грн.	72480			63020			63160								
Додаткові капіталовкладення, грн.	-			66966			66966			-			-		
Підсумкова економія, тис. грн.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	122,5			182,4		

Отже, ми бачимо, використання здвоєних шин в поєднанні з технологічною колією під час технологічних операцій культивування та сівби пшениці є економічно вигідно, що підтверджують результати розрахунків наведених в таблиці 5.2. Спостерігається підвищена урожайність, а економія витрат становить 182,4 тис. грн.

Висновки по розділу

Таким чином, прораховано річний економічний ефект який складає: при використанні спарених шин 125,5 тис. грн. на 100 га, а при використанні спарених шин в поєднанні з технологічною колією – 182,4 тис. грн. на 100 га. Були задіяні такі операції, як оранка, культивування та сівба.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Таким чином, проведені дослідження в дипломній роботі дозволяють зробити наступні висновки:

Проведеним аналізом та узагальненням відомих досліджень щодо визначення зміни напружень та деформацій в ґрунті встановлено: в найближчій перспективі все більший розвиток отримуватимуть моделі пружно-пластичного середовища та теорії пластичної течії, які визначають границі пружної поведінки середовища та зв'язок деформацій і напружень за межею пружної області. Визначальний вплив на ріст і розвиток рослин мають залишкові напруження, які зберігаються в ґрунті після проходження МТА по полю.

Для виконання теоретичних досліджень напружень у ґрунті від дії рушіїв МТА розроблена динамічна математична модель, розрахунком якої визначені траєкторії головних напружень і напрямки екстремального тиску в ґрунті, а також напрямки ліній ковзання, що характеризують видавлювання ґрунту з-під коліс, коли напруження досягають границі текучості. Встановлено, що максимальні напруження поширюються під центром рушія і навіть на глибині 3а складають близько 30% від максимального значення.

В результаті проведених експериментальних досліджень з використанням тракторів МТЗ-82 та CASE 340 Magnum визначено: середні напруження σ_{cp} від дії рушіїв трактора МТЗ-82 на глибині 0,5а склали: під час наїзду 0,063 МПа; після з'їзду (залишкові) – 0,029 МПа. При використанні трактора CASE: під час наїзду 0,032 МПа; після з'їзду (залишкові) – 0,019 МПа. Відповідно щільність під рушіями МТЗ-82 зросла на 3%, а під рушіями CASE на 2%.

Прораховано річний економічний ефект який складає: при використанні спарених шин 125,5 тис. грн. на 100 га, а при використанні спарених шин в поєднанні з технологічною колією – 182,4 тис. грн. на 100 га. Були задіяні такі операції, як оранка, культивування та сівба.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алімов К.Г. Постійна технологічна колія (ПТК) в інноваційних агротехнології хлібних злаків [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.webfarmerstvo.org.ua/roslynnnyctvo/postijna-tehnologichna-kolija-ptk-v-innovacijnyh-agrotehnologii-hlibnyh-zlakiv.php>.
2. Бекенов Т.Н. Анализ деформируемости грунта при оценке проходимости транспортных средств [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://e-lib.kazntu.kz/sites/default/files/articles/bekenov_2008_4.pdf.
3. Белов Г.Д., Подолько А.П. Уплотнение почвы и урожайность зерновых. Урожай, 1985. 64 с.
4. Бондаренко В. Технологическая колея для посевных агрегатов с различной рабочей шириной захвата [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://agrocart.com/3068/tehnologicheskaya-koleya-dlya-posevnyx-agregatov-s-razlichnoj-rabochej-shirinoj-zaxvata>.
5. Вдовенко В. Двойная колесная сила. Зерно. 2012. №2. С. 11-13.
6. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.
7. Герсевич Н.М. Основы динамики грунтовой массы. Госстройиздат, 1973. 197 с.
8. Дорогунцов С.І., Коценко К.Ф., Хвесик М.А. та ін. Екологія: підручник. Київ : КНЕУ, 2005. 371 с.
9. Дьяков В.П. Механизм деформации почвы и модель критической скорости приложения нагрузки. Достижения науки и техники АПК. 2007. № 10. С. 51-53.
10. Золотаревская Д.И. Обоснование и экспериментальное подтверждение математических моделей закономерностей деформирования вязкоупругих почв. International journal of experimental education. 2013. №3. С. 72-76.

11. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник / [Зоценко М.Л., Коваленко В.І. та ін.]; за ред. М.Л. Зоценко. Полтава: ПНТУ, 2003. 554 с.

12. Інженерна геологія: Механіка ґрунтів, основи і фундаменти: підручник для вузів / М.П. Зоценко, В.І. Коваленко та ін. К.: Вища школа, 1992. 408 с.

13. Кононов А.М. Об агротехнической проходимости тракторов по почве. Совершенствование технологических процессов и рабочих органов сельскохозяйственных машин: сб. науч. тр. К.: УСХА, 1978. Вып. 212. С. 54-56.

14. Лещенко С.М., Сало В.М. Технічне забезпечення збереження родючості ґрунтів в системі ресурсозберігаючих технологій. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Ч.1. Кіровоград: КНТУ, 2013. Вип. 43. С. 96-102.

15. Машинна деградація ґрунтів, причини та шляхи подолання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://uchebnik-online.com/128/297.html>.

16. Надикто В. Колійна технологія землеробства. The Ukrainian Farmer. 2011. №1. С. 22-23.

17. Пат. 104304 України. МПК/B60C023/00 Спосіб перерозподілу нормальних реакцій ґрунту на рушії повнопривідних тракторів / Соларьов О.О., Довжик М.Я, Татяниченко Б.Я., Плавинський В.І. №u201506332; заявл. 16.07.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. №2.

18. Плотномер (твердомер) почвы Wile Soil [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.lhm-pushkino.ru/page/ru_RU/lesotax/plotnomer.

19. Пути повышения производительности сельскохозяйственных машин [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://refer.in.ua/major/249/17628/>.

20. Савочкин В.А. Тяговая динамика колесного трактора : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение», 2005. 97 с.

21. Терегулов І.Г. Опір матеріалів і основи теорії пружності та пластичності. «Вища школа», 1984. 472 с.
22. Технологии Mini-till, No-till и Strip-till [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.agrodialog.com.ua/tehnologii-mini-till-no-till-i-strip-till.html.
23. Шмирко В.І., Коробко О.В., Троян Ю.І., Якімцов Ю.В. Моделювання процесів виникнення травмонебезпечних ситуацій. Науковий часопис НПУ імені М.П. Драгоманова. 2021. Випуск 82. С. 177-181.
24. Biggs L. Current and future agricultural practices and technologies which affect fuel efficiency [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieep/projects/files/projects/documents/efficient20_review_of_agricultural_practices_and_technologies_en.pdf.
25. Hughes J. D. Tires, traction and compaction [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.extension.umn.edu/agriculture/tillage/tires-traction-and-compaction/#4>.
26. Mitsoulis E. Flows of viscoplastic materials: models and computations / E. Mitsoulis // Rheology Reviews. 2007. №1. P. 135-178.
27. Perumpral J. V. A numerical method for predicting the stress distribution and soil deformation under a tractor wheel / J. V. Perumpral, J. B. Liljedahl, W. H. Perloff / Journal of Terramechanics. 1971. Vol. 8. P. 9-22.