

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Білоусов Олександр Володимирович

УДК 631.3.02:629.114

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ З
ГРУНТООБРОБНО-ПОСІВНИМ КОМПЛЕКСОМ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Білоусов О.В.

Керівник роботи
Дерев’янка Д.А.
доктор технічних наук, професор

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Білоусов Олександр Володимирович. Підвищення ефективності використання машинно-тракторного агрегату з ґрунтообробно-посівним комплексом. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Проведена в результаті виконання магістерської роботи модернізація бункерного модуля дає змогу підвищити тягово-динамічні показники МТА шляхом зменшення ущільнювального впливу коліс на ґрунт завдяки раціональному перерозподілу ваги бункера з насінням і добривами між колесами бункера та трактора в процесі виконання технологічної операції. Бункер для посівного агрегату може використовуватися як в одноосьовому виконанні при агрегуванні за схемою трактор – бункер – культиватор, так і в двоосьовому виконанні при агрегуванні за схемою трактор – культиватор – бункер.

Розроблений в роботі інформаційно-вимірювальний комплекс із сучасними цифровими датчиками та перетворювачами в програмному середовищі ZETLAB забезпечує під час тягово-енергетичної оцінки машинно-тракторного агрегату в режимі реального часу візуалізацію вимірюваних параметрів, спектральний аналіз, генерування, запис і відтворення сигналів. Використання сучасної елементної бази та розробленого програмного забезпечення дає змогу у багато разів знизити трудомісткість проведення випробувань і оброблення отриманих результатів.

Встановлено, що продуктивність агрегату за одну годину основного часу становила 5,98 га/год, а після обґрунтування режиму роботи посівного агрегату збільшилася до 6,21 га/год при коефіцієнті використання змінного часу 0,81.

Ключові слова: посівний комплекс, машино-тракторний агрегат, продуктивність, тяговий опір.

ANNOTATION

Bilousov Oleksandr Volodymyrovych. Improving the Efficiency of Using a Machine-Tractor Unit with a Soil-Tillage and Seeding Complex. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The modernization of the hopper module carried out as part of the master's thesis makes it possible to improve the traction and dynamic performance of the machine-tractor unit (MTU) by reducing the compacting effect of the wheels on the soil. This is achieved through the rational redistribution of the hopper weight with seeds and fertilizers between the wheels of the hopper and the tractor during the technological operation.

The hopper for the seeding unit can be used both in a single-axle configuration, when aggregated in the tractor–hopper–cultivator scheme, and in a two-axle configuration, when aggregated in the tractor–cultivator–hopper scheme.

The information-measuring system developed in this work, equipped with modern digital sensors and converters and implemented in the ZETLAB software environment, ensures real-time visualization of measured parameters, spectral analysis, signal generation, recording, and playback during the traction-energy assessment of the machine-tractor unit. The use of a modern electronic base together with the developed software makes it possible to significantly reduce the labor intensity of testing and processing the results obtained.

It was established that the productivity of the unit per hour of main operating time amounted to 5.98 ha/h, and after substantiating the operating mode of the seeding unit, it increased to 6.21 ha/h, with a shift-time utilization factor of 0.81.

Keywords: seeding complex, machine-tractor unit, productivity, traction resistance.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. МОДЕРНІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ БУНКЕРНОГО МОДУЛЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	22
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	35
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасне аграрне виробництво характеризується високим рівнем технічної оснащеності, інтенсивністю використання машинно-тракторного парку та зростаючими вимогами до ефективності виконання технологічних операцій. У структурі механізованих робіт особливе місце займають ґрунтообробно-посівні комплекси, які забезпечують одночасне виконання кількох операцій: передпосівного обробітку ґрунту, внесення добрив, формування посівного ложа та висіву насіння. Саме тому від їх техніко-економічних і тягово-динамічних характеристик значною мірою залежить загальна продуктивність рослинницьких технологій, якість посіву та рівень витрат матеріальних ресурсів.

В умовах переходу аграрного сектору до ресурсозберігаючих технологій, мінімізації обробітку ґрунту і збільшення виробничих площ особливо актуальною стає проблема оптимізації роботи машинно-тракторних агрегатів (МТА). Важливим є забезпечення стабільної швидкості руху, раціонального використання тягових можливостей трактора, зменшення буксування, а також зниження питомих енерговитрат та витрат палива. Особливу роль при цьому відіграє стан та конструкція бункерних модулів посівних комплексів, маса яких у процесі роботи постійно змінюється, що призводить до коливань тягового опору, порушення глибини посіву та зниження рівномірності внесення матеріалів.

Традиційні конструкції ґрунтообробно-посівних комплексів не забезпечують автоматичної компенсації зміни навантаження на рушії та робочі органи, що знижує ефективність їх використання. Тому постає необхідність удосконалення конструктивних рішень, які забезпечували б оптимальне позиціонування бункерних модулів, зменшення сил опору перекочуванню та стабільність агротехнічних параметрів посіву.

Удосконалення конструкції машинно-тракторного агрегату та розроблення інноваційних систем моніторингу й керування його роботою є ключовими

аспектами підвищення енергоефективності, продуктивності та якості виконання технологічних операцій. Це визначає актуальність проведеного дослідження, спрямованого на підвищення ефективності використання МТА з ґрунтообробно-посівним комплексом на основі удосконалення його конструкції та режимів роботи.

Мета роботи: підвищення ефективності використання машинно-тракторного агрегату з ґрунтообробно-посівним комплексом зі збільшеними масо-габаритними характеристиками шляхом вибору раціональних режимів роботи з урахуванням зміни сил опору коченню, нерівномірності робочої швидкості та продуктивності МТА впродовж технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких наукових завдань:

- подати технічні рішення щодо модернізації конструкції ґрунтообробно-посівного комплексу, які забезпечують стабільне горизонтальне положення його бункерного модуля;
- удосконалити методику енергетичної оцінки машинно-тракторного агрегату в режимі реального часу за умови зміни його вагових та швидкісних параметрів із використанням цифрових технологій збору та передавання даних;
- провести експериментальні тягово-енергетичні випробування машинно-тракторного агрегату. Визначити раціональні режими роботи посівного агрегату з урахуванням змін маси бункерного модуля та зчіпної ваги трактора в процесі виконання посіву зернових культур і надати техніко-економічну оцінку ефективності отриманих результатів досліджень.

Об'єктом дослідження є технологічний процес роботи машинно-тракторного агрегату у складі трактора та ґрунтообробно-посівного комплексу.

Предметом дослідження закономірності зміни тягово-швидкісних характеристик МТА в реальних умовах експлуатації.

Методи наукового дослідження. У теоретичних дослідженнях застосовано методи системного аналізу та синтезу, моделювання, використано

положення та закони тягового балансу. Експериментальні дослідження виконувалися відповідно до вимог ДСТУ та відомих методик. Отримані експериментальні дані оброблялися методами математичної статистики з використанням ЕОМ.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Білоусов О. В. Перспективні напрямки розвитку посівних комплексів Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 8-9 травня 2025 року. Рівне : НУВГП, 2025. С. 11-12.

2. Дерев'янка Д.А., Бродовський Д.О., Білоусов О.В. Розрахункова схема динамічної коливальної системи мобільного енергетичного засобу. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

3. Білоусов О.В. Шляхи підвищення ефективності функціонування машинно-тракторних агрегатів. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 3-5.

4. Дерев'янка Д.А., Білоусов О.В. Аналіз конструктивних особливостей ґрунтообробних-посівних комплексів та способів їх агрегатування. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. С. 111-116

Практичну інтерес для аграрних підприємств представляє впровадження конструкції модернізованого бункерного модуля, який дає змогу підвищити тягово-динамічні показники МТА шляхом зменшення ущільнювального впливу

коліс на ґрунт завдяки раціональному перерозподілу ваги бункера з насінням і добривами між колесами бункера та трактора в процесі виконання технологічної операції..

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 22 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 51 сторінку комп'ютерного тексту, містить 23 рисунки та 1 таблицю.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1. Перспективні напрямки розвитку посівних комплексів

Сучасне сільське господарство зазнає значних трансформацій завдяки впровадженню інноваційних технологій у посівних комплексах зернових культур. Ці зміни спрямовані на підвищення ефективності, зниження витрат та мінімізацію впливу на навколишнє середовище. Розглянемо ключові напрямки розвитку в цій сфері.

Впровадження автономних тракторів та посівних машин є відповіддю на дефіцит кваліфікованої робочої сили та необхідність підвищення продуктивності. Компанія John Deere представила автономний трактор 9RX 640, оснащений 16 камерами та системою комп'ютерного зору, що дозволяє йому працювати без присутності оператора в кабіні. Цей трактор здатний виконувати завдання з обробітку ґрунту, використовуючи передові технології для навігації та виявлення перешкод [1].

Крім того, John Deere пропонує комплекти для модернізації існуючих тракторів, перетворюючи їх на автономні машини. Ці комплекти включають систему автономного сприйняття з 16 камерами, що забезпечує огляд на 360 градусів навколо трактора та знаряддя. Такі рішення дозволяють фермерам підвищити ефективність роботи, зменшити залежність від людського фактора та оптимізувати використання ресурсів [1].

Технології точного землеробства, зокрема використання сенсорів для моніторингу стану ґрунту та рослин, дозволяють оптимізувати процес сівби. Інтеграція датчиків вологості ґрунту в посівне обладнання сприяє точному регулюванню глибини сівби та покращенню схожості культур. Дослідження показують, що використання таких сенсорів у поєднанні з автономними системами контролю глибини може покращити встановлення рослин та

зменшити витрати пального в областях з більш сприятливим профілем вологості ґрунту .

Додатково, використання лазерних сенсорів та бездротових комунікаційних систем у моніторингу параметрів сівби дозволяє підвищити точність та ефективність посівних операцій. Ці технології забезпечують реальний моніторинг та контроль процесу сівби, що сприяє покращенню врожайності та зниженню витрат.

Розробка інтелектуальних систем управління, які включають активні дозуючі пристрої, контроль норми висіву та позиціонування насіння, сприяє підвищенню точності та ефективності посівних операцій. Такі системи дозволяють адаптувати процес сівби до конкретних умов поля, що веде до покращення врожайності. Наприклад, використання моторизованих дозуючих пристроїв та механізмів профілювання поверхні ґрунту забезпечує рівномірний розподіл насіння та оптимальну глибину сівби.

Крім того, впровадження систем контролю глибини сівби на основі вимірювання зусилля на сошнику дозволяє автоматично регулювати глибину сівби в реальному часі, враховуючи змінні умови ґрунту. Це сприяє покращенню схожості та рівномірності розвитку рослин.

Технологія прямого висіву (no-till) набуває все більшої популярності в сучасному сільському господарстві завдяки своїм екологічним та економічним перевагам. Цей метод передбачає висів насіння без попереднього механічного обробітку ґрунту, що сприяє збереженню його структури, зменшенню ерозії та покращенню вологоутримуючих властивостей. Для реалізації цієї технології використовуються спеціалізовані посівні комплекси, які одночасно здійснюють передпосівну обробку та висів насіння. Посівні комплекси для прямого висіву обладнані спеціальними сошниками та дисковими ножами, які прорізають рослинні рештки та створюють вузькі борозни в ґрунті для висіву насіння. Це дозволяє здійснювати сівбу без попереднього обробітку, зберігаючи при цьому

рослинні рештки на поверхні поля, що сприяє зменшенню ерозії та покращенню вологоутримання.

Приклади сучасних посівних комплексів для прямого висіву:

KUHN 9400NT No-Till Grain Drills. Ці зернові сівалки спеціально розроблені для прямого висіву, але можуть швидко адаптуватися до умов традиційного обробітку [2].

Great Plains Field Cultivator Air Drill. Унікальна машина, яка дозволяє одночасно здійснювати обробіток ґрунту та висів насіння, що економить час, кошти, паливо та робочу силу під час посіву [3].

Впровадження посівних комплексів для прямого висіву є перспективним напрямком розвитку сільського господарства, що сприяє підвищенню ефективності виробництва, збереженню природних ресурсів та покращенню екологічної стійкості агросистем.

1.2. Шляхи підвищення ефективності функціонування машинно-тракторних агрегатів

Машинно-тракторний агрегат (МТА) – це поєднання трактора як джерела енергії та однієї або декількох сільськогосподарських машин-споживачів енергії, що виконує технологічні операції з обробітку ґрунту, посіву, захисту та збирання врожаю.

Ефективність роботи МТА оцінюється за показниками продуктивності (га/год), питомої витрати палива (л/га) та експлуатаційних витрат на одиницю виконаної роботи.

Підвищення ефективності МТА дозволяє зменшити собівартість вирощуваної продукції, знизити негативний вплив на навколишнє середовище та підвищити рентабельність агровиробництва.

Правильний підбір трактора та знаряддя за потужністю та типом ґрунтообробних операцій критично важливий для досягнення максимальної продуктивності й мінімізації енерговитрат.

Застосування систем абсолютного контролю зчеплення трактора та оптимального навантаження робочого органа знижує непотрібне буксування та надмірний пробуксовку, що дає економію палива до 10 %.

Використання високоміцних і зносостійких матеріалів у конструкції плугів, культиваторів і дискових борін дозволяє збільшити ресурс роботи без капітальних ремонтів на 20–30 %.

Застосування композитів та легких сплавів у будові навісного обладнання знижує інерційні навантаження та покращує маневреність агрегату, що сприяє зменшенню витрати палива під час переміщення полем.

Своєчасна заміна моторних оли, фільтрів, рідин і змащування вузлів відповідно до рекомендацій виробника запобігає підвищеному зносу та знижує ризик аварій - до 15 % – 20 % за даними провідних агровиробників.

Впровадження графіків профілактичних оглядів із використанням чек-листів (“walk-around inspection”) зменшує час простою техніки на 25 % і підвищує середню готовність парку до роботи.

Інтелектуальні телематичні системи реєструють параметри роботи двигуна, витрату палива та режимів роботи вузлів у реальному часі, що дозволяє оперативно виявляти відхилення та планувати ремонти до виникнення серйозних несправностей.

Системи Fendt Connect, John Deere Operations Center та інші платформи дають змогу аналізувати продуктивність агрегатів, порівнювати параметри роботи різних машин та оптимізувати експлуатаційні цикли.

Використання GPS-керованих систем автопілоту знижує перекриття смуг обробітку на 5–8 %, що еквівалентно економії палива та посівного матеріалу до 12 %.

Сучасні трактори оснащуються RTK-GPS із точністю до 2 см, що забезпечує високу якість обробітку без промахів і повторного проходу.

Використання модульних систем VRA (Variable Rate Application) для диференційованого внесення добрив і пестицидів дозволяє оптимізувати норми витрат на різних ділянках поля, підвищуючи врожайність до 15 % і скорочуючи собівартість агрохімікатів.

Збір великих даних із поля й агрегатів і їхня обробка із застосуванням AI-алгоритмів дозволяють прогнозувати оптимальні строки та режими роботи, зменшуючи загальні виробничі витрати на 10–15 %.

Використання спеціалізованих програм (Farm Management Systems) для календарного планування агротехнічних заходів з урахуванням кліматичних умов та зайнятості техніки мінімізує простої й забезпечує рівномірне завантаження всього парку.

Аналіз причин простоїв (доставка, очікування оператора, технічний огляд) із подальшою оптимізацією логістики та внутрішньооб'єктових маршрутів дає змогу знизити непродуктивні витрати часу до 30 %.

Навчання операторів із сучасними тренажерами, сертифікація з роботи з ав- topilot-системами та телематикою підвищують кваліфікацію персоналу, що знижує ризик помилок у роботі на 25 % і покращує якість виконання технологічних операцій.

Впровадження екологічних стандартів (cross-compliance) і використання точних технологій сприяє зниженню шкідливих викидів CO₂ на 10–20 % й одночасно підвищує рентабельність виробництва.

Ефективність роботи МТА зумовлена синергетичним впливом технічних характеристик машини, якості обслуговування, рівня цифровізації та кваліфікації персоналу. Операційна ефективність безпосередньо пов'язана з рівнем навантаження трактора та робочих органів, а також із кількістю непродуктивних операцій, таких як пробуксовка чи дублювальні проходи по полю. Впровадження GPS-систем автопілоту та систем диференційованого внесення ресурсів дозволяє

мінімізувати перекриття і недозастосування агрохімікатів, що підвищує загальну ефективність до 20 %.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію блокчейну для простежуваності ланцюгів постачання, розробку моделей штучного інтелекту для адаптивного керування МТА в реальному часі та впровадження безпілотних агрегатів у змішаних системах землеробства. Оцінка ефективності призначених карт (prescription maps) показала приріст врожайності на 5 % на пілотних ділянках, що свідчить про значний потенціал VRA-технологій у подальшому масштабуванні.

1.3. Аналіз конструктивних особливостей ґрунтообробних-посівних комплексів та способів їх агрегування

Сучасне рослинництво спрямовано на збереження і збільшення родючості ґрунту, це характеризується впровадженням прогресивних і енергозберігаючих методів обробки і обробітку сільськогосподарських культур. На сьогоднішній день поєднання декількох операцій, таких як посів сільськогосподарських культур з одночасною передпосівною обробкою ґрунту, знаходить найбільше застосування. У прийнятих сівозмінах для посіву та обробки ґрунту використовуються високопродуктивні, комбіновані та універсальні машинно-тракторні агрегати (МТА), продуктивність і ширина захвату яких обґрунтовані для тракторів різного класу тяги.

Від правильного комплектування агрегатів багато в чому залежить продуктивність МТА – це, в першу чергу, пов'язано з найбільш повним використанням потужності двигуна з урахуванням призначення машин і конкретних умов експлуатації. Шляхом розвитку автоматизованих систем управління та моніторингу виконання технологічних процесів як для трактора, так і для агрегованих модулів, а також в цілому для машинно-тракторного

агрегату, досягається підвищення ефективності та максимально повне використання закладеного технічного потенціалу МТА.

У нашій країні використовуються різні типи агрегатів для посіву, які з'єднуються з енергетичними засобами за допомогою різних типів зчіпних пристроїв. Кожна з використовуваних схем має свої переваги і недоліки, які необхідно враховувати при виборі обладнання для конкретних умов.

Проблемами технічної оснащеності та експлуатації машинно-тракторних агрегатів, розробкою показників ефективності використання розроблюваної та експлуатованої техніки цілеспрямовано займалися і в даний час проводяться дослідження в провідних наукових установах країни.

При аналізі ефективності різних схем МТА враховують взаємозв'язок експлуатаційних показників, таких як: продуктивність, буксування, тиск шин на ґрунт і питомі витрати енергії.

У сучасному рослинництві широко використовуються ґрунтообробно-посівні комплекси (ГПК). Вони будуються за модульним принципом і включають в себе причіп-бункер для насіння і добрив, ґрунтообробне знаряддя, сівалку, прикочувальний орган та інші елементи. Розташування модулів в агрегаті може бути різним.

Схожу технологію роботи мають практично всі сучасні посівні комплекси зарубіжного і вітчизняного виробництва. Вони оснащені робочими органами для обробки ґрунту, бункерами для добрив і насіння, висівними апаратами. Між ними, однак, є відмінності в приводі висівного апарату і вентилятора, конструкції робочих органів, обсязі бункерів і схемі їх розміщення. Ці відмінності обумовлені роботою в різних кліматичних зонах, на різних агрофонах і на різних типах ґрунтів, а також залежать від потреб і розміру конкретного підприємства.

Залежно від розташування бункера, посівні комплекси можна розділити на фронтально навісні, встановлені безпосередньо на раму, причіпні та ґрунтообробні знаряддя (рис. 1). У свою чергу причіпні бункери можуть розташовуватися після і перед ґрунтообробним знаряддям. Високим ступенем

завантаження протягом року, а також універсальністю володіють посівні комплекси з навісним, фронтальним розташуванням бункера. Рівномірний розподіл навантаження між осями трактора забезпечує фронтальне розташування бункерів. Компаніями Maschio Gaspardo (Італія), Sulky (Франція), Amazone (Німеччина), Lemken (Німеччина), Vaderstad (Швеція), Agrisem (Франція) та ін. випускаються такі машини. Хорошою маневреністю і компактністю відрізняються посівні агрегати, у яких бункери розташовані на рамі ґрунтообробного знаряддя. Однак у міру зменшення насіння і добрив змінюється тиск на робочі органи, цей фактор можна віднести до недоліків такого розташування бункера.

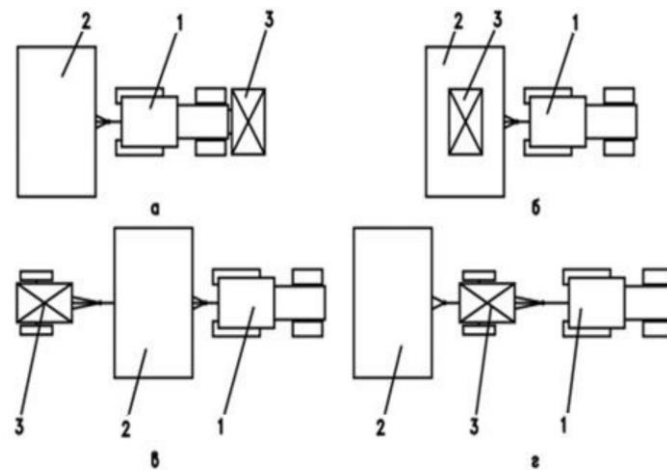


Рис. 1.1. Схема розташування бункера для насіння та (або) добрив посівних комплексів: 1 – трактор; 2 – ґрунтообробне знаряддя; 3 – бункер для насіння та (або) добрив; а – фронтальне (навісне розташування); б – розташування бункера на рамі ґрунтообробного знаряддя; в – причіпний бункер, розташований після ґрунтообробного знаряддя; г – причіпний бункер, розташований перед ґрунтообробним знаряддям.

У причіпних бункерах, які розташовані після сошників, в результаті проходження коліс зароблене насіння вдавлюється в ґрунт, це призводить до порушення глибини посіву, результатом чого є нерівномірна схожість насіння.

Так само сильно ущільнюють ґрунт бункери, розташовані перед ґрунтообробними знаряддями. Виробники посівних комплексів часто вирішують

цю проблему поглибленням робочих органів, що йдуть по сліду коліс бункера. До основних переваг причіпних бункерів можна віднести великий об'єм бункерів до 13000 л, а також можливість поділу бункерів для добрив і насіння.

Ефективність роботи посівної техніки значно впливає на врожайність сільськогосподарських культур. На ринку представлено безліч моделей посівних машин, оснащених в якості робочих органів стрілочастими лапами.

Для посіву різних сільськогосподарських культур, включаючи зернові, дрібнонасінні та бобові, підходять посівні агрегати культиваторного типу, вони, в свою чергу, універсальні, дозволяють поєднувати за один прохід кілька операцій. Вони можуть виконувати такі операції, як посів насіння з одночасним внесенням мінеральних добрив, передпосівну обробку ґрунту (культивацію, дискування) і прикочування посівів. У свою чергу така комбінація сільськогосподарських операцій, по-перше, знижує ущільнення ґрунту, по-друге, під час посіву скорочується потреба в техніці і, по-третє, призводить до економії палива.

Культиваторного типу посівні агрегати можуть бути використані як для культивації ґрунту, так і для посіву. Для одночасного знищення бур'янів і смугового посіву насіння в якості сошників використовуються стрілочасті лапи. Для використання посівного агрегату тільки для культивації необхідно від'єднати бункерний модуль. Зазвичай для посіву на мінімальній обробці ґрунту використовуються агрегати з культиваторними лапами, вони дозволяють одночасно висівати добрива і насіння. Також деякі моделі можуть виконувати операції прямого посіву.

У нашій країні найбільш поширені пневматичні агрегати культиваторного типу і використовують (рис. 1.2 – 1.4).

Багатофункціональні посівні агрегати за один прохід виконують чотири технологічні операції, одночасно проводять передпосівний обробіток ґрунту, посів з внесенням мінеральних добрив і ущільнення посівів, необхідні тільки додаткові операції дискування.



Рис. 1.2. Посівний комплекс John Deere 1890.



Рис. 1.3. Посівний комплекс FLEXI-COIL ST-820.



Рис. 1.4 Посівний комплекс KUHN ESPRO 6000 RC.

Деякі багатофункціональні посівні агрегати, такі як Bourgault 8810- 35 і John Deere 1830, за один прохід здійснюють п'ять технологічних операцій.

При застосуванні мінімальної технології в процесі обробки озимої пшениці з використанням багатофункціональних посівних агрегатів типу TUME NOVA COMBI 3000, Rapid RD300C і Компактор К/500А+Солітер 9/500КА, що поєднують в одному проході до шести операцій, дозволяють скоротити кількість проходів по полю до одного, виконуючи відразу кілька операцій одночасно: дискування стерні, передпосівна підготовка ґрунту, посів з внесенням добрив, прикочування посівів і розпушування верхнього шару ґрунту.

Принцип універсальності реалізований у конструкціях багатьох сучасних посівних агрегатів. Наприклад, з високою точністю сіяти, як дрібні (люцерна, ріпак, конюшина тощо), так і зернові культури, дозволяють дозатори, встановлені в пневматичних зернових сівалках. Як правило, практично у всіх зарубіжних посівних машинах передбачено обладнання для одночасного висіву насіння і мінеральних добрив.

З появою посівних машин з більшою робочою швидкістю і шириною захвату з'явилася можливість підвищити їх продуктивність. Заводи-виробники все частіше використовують напівнавісні сівалки (наприклад, такі компанії як «John Deere»). Застосування таких конструкцій дає можливість розміщення великого бункера (понад 2000 літрів). Однак це призводить до збільшення маси, але велика маса тут швидше є перевагою, оскільки дозволяє створити тиск на сошники до 80 кг або більше.

Принцип універсальності реалізований у конструкціях багатьох сучасних посівних агрегатів. Наприклад, з високою точністю сіяти, як дрібні (люцерна, ріпак, конюшина тощо), так і зернові культури, дозволяють дозатори, встановлені в пневматичних зернових сівалках. Як правило, практично у всіх зарубіжних посівних машинах передбачено обладнання для одночасного висіву насіння і мінеральних добрив.

З появою посівних машин з більшою робочою швидкістю і шириною захвату з'явилася можливість підвищити їх продуктивність. Заводи-виробники все частіше використовують напівнавісні сівалки (наприклад, такі компанії як «John Deere»). Застосування таких конструкцій дає можливість розміщення великого бункера (понад 2000 літрів). Однак це призводить до збільшення маси, але велика маса тут швидше є перевагою, оскільки дозволяє створити тиск на сошники до 80 кг або більше.

Таким чином, поєднання операцій передпосівної обробки ґрунту та посадки сільськогосподарських культур зараз знаходить найширше застосування. Для обробки ґрунту і посадок в прийнятих системах землеробства використовуються сучасні, високоефективні, комбіновані і універсальні пристрої, ширина захвату і продуктивність яких адаптовані для тракторів різних класів тяги. Пристрої для обробки ґрунту і посівів, як правило, будуються за модульним принципом і включають в себе причіп-бункер для насіння і добрив, знаряддя для безпосереднього впливу на ґрунт, сівалки, ущільнювальні органи та інші. Порядок розташування елементів агрегату може варіюватися.

Сучасні комплекси для посіву закордонного та вітчизняного виробництва схожі за технологічним процесом і оснащені бункерами для добрив і насіння, центральними висівними пристроями, інструментами для попередньої підготовки ґрунту і сошниками, що показує проведений аналіз їх конструкцій. За останні роки асортимент пропонуванних посівних машин значно розширився, особливо за рахунок збільшення кількості моделей комбінованих зернових агрегатів, що використовують пневматичний розподіл і транспортування насіння в сошниках, а також машин для посіву з мінімальним обробітком ґрунту.

Слід зазначити, що конструктивні особливості ГПК практично не враховують зміну маси бункерного модуля при виконанні технологічних операцій і його вплив на розподіл вертикальних навантажень по опорних колесах машини і трактора, і, як наслідок, на зміну сил опору коченню коліс МТА. Значна зміна ваги бункерного модуля призводить до перерозподілу мас, що припадають на опорні колеса і причіпний пристрій трактора, в результаті чого спостерігаються відхилення від горизонтального положення елементів МТА, що в підсумку може призвести до порушення агротехнічних вимог при проведенні технологічних операцій. У зв'язку з цим виникає необхідність у модернізації конструкцій ГПК для забезпечення стабільного горизонтального положення його модулів.

РОЗДІЛ 2

МОДЕРНІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ БУНКЕРНОГО МОДУЛЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Розроблення розрахункової схеми та моделі визначення тягово-швидкісних характеристик машинно-тракторного агрегату з ґрунтообробно-посівним комплексом.

Наведений у першому розділі аналіз роботи машинно-тракторного агрегату з ґрунтообробно-посівним комплексом показав, що продуктивність МТА протягом періоду роботи не залишається сталою і залежить від ступеня зміни швидкості. Період зміни (коливань) умовної середньої швидкості в процесі роботи визначається швидкістю спорожнення бункерів із насінням та добривами. У зв'язку з цим відповідно до плану дослідження розв'язувалося завдання зі створення математичної моделі зміни тягово-швидкісних характеристик машинно-тракторного агрегату з ґрунтообробно-посівним комплексом з урахуванням зміни сил опору коченню, нерівномірності швидкості та продуктивності МТА протягом технологічного процесу роботи [2].

На рис. 2.1 подано схему роботи МТА у складі трактора з ґрунтообробно-посівним комплексом на горизонтальній ділянці поля під час сівби. Умовно можна прийняти такі спрощення: поле має однорідний механічний склад ґрунту; коефіцієнт опору коченню на всій площі поля залишається постійним; рух усталений, а миттєві коливання робочої швидкості не враховуються (тобто середня робоча швидкість залишається сталою $V_p \approx \text{const}$ на певній робочій ділянці); не беруться до уваги витрати потужності трактора на миттєві уповільнення або прискорення МТА для подолання сил опору повітря (P_w) [2].

Основою рушійної сили МТА є силова установка трактора. У сучасних тракторах здебільшого встановлюють двигуни, які забезпечують на виході з колінчастого вала постійну потужність у широкому діапазоні частот обертання.

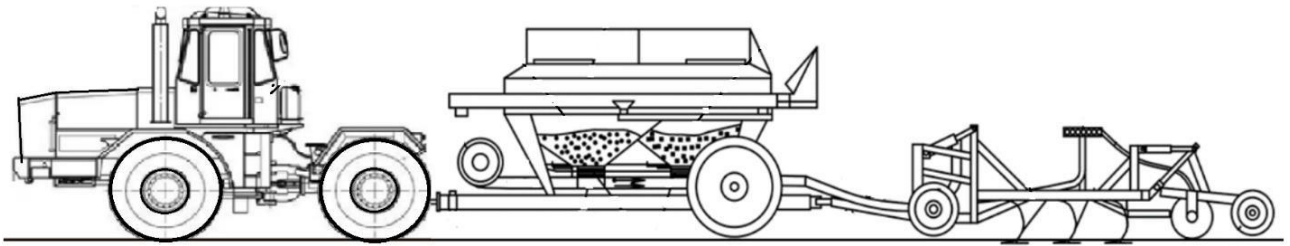


Рис. 2.1. Схема роботи машинно-тракторного агрегату у складі трактор – ґрунтообробно-посівний комплекс John Deere 1890.

На рисунку 2.3 наведено розрахункову схему сил, що діють на частини МТА під час роботи. У цьому випадку гакове зусилля $P_{кр1}$ витрачається на подолання сил опору ґрунтообробних знарядь $P_{кр2}$ та сил опору коченню ґрунтообробно-посівного комплексу.

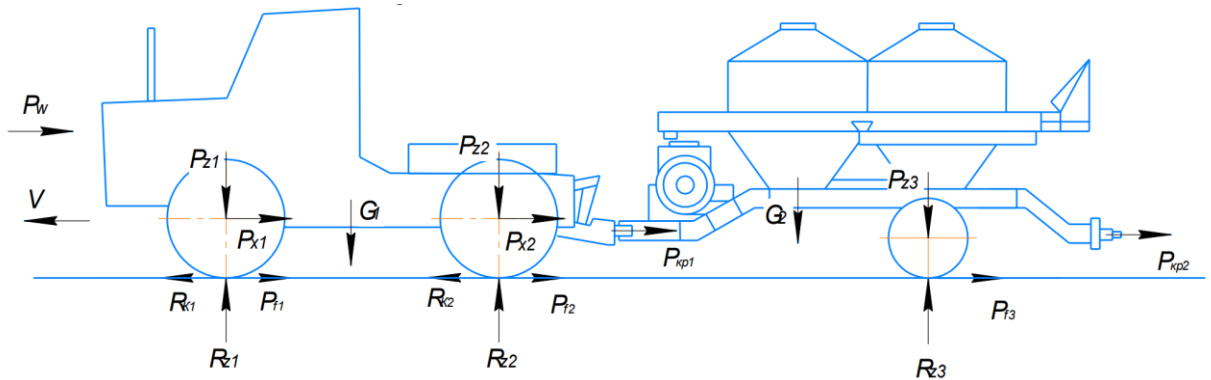


Рис. 2.2. Розрахункова схема сил, що діють на трактор і бункерний модуль John Deere 1890 під час роботи.

У процесі роботи МТА витрачається паливо, вносяться добрива та насіння, унаслідок чого зменшується маса трактора та причепа з бункерами. Звідси впливає, що протягом періоду роботи, який обмежується часом спорожнення бункерів або паливного бака, сила опору коченню ППК знижується. Враховуючи, що в процесі сівби задана глибина внесення добрив і насіння не змінюється, величину сили опору ґрунтообробних знарядь $P_{кр2}$ можна вважати сталою. У цьому контексті найбільший інтерес становить аналіз процесу зміни величини сили опору коченню трактора та ППК під час сівби [3].

Для визначення сил опору коченню МТА можна подати відповідний вираз у певний момент часу t , який минув від початку роботи після повної заправки трактора дизельним паливом і заповнення ППК насінням та добривами.

2.3 Модернізація конструкції бункерного модуля ґрунтообробно-посівного комплексу John Deere 1890

Відповідно до поставлених завдань дослідження, для забезпечення агротехнічних вимог під час виконання технологічних операцій були проведені дослідження щодо модернізації конструкції ґрунтообробно-посівного комплексу з метою забезпечення стабільного горизонтального положення його бункерного модуля [12].

Оптимальне положення роботи відповідає строго горизонтальному розташуванню поздовжньої осі машинно-тракторного агрегату (рис. 2.3). Згідно з даними випробувань і виробничої оцінки роботи ґрунтообробно-посівного комплексу, нами встановлено, що таке положення досягається за умови завантаження бункерного модуля на 40–60 % його об'єму. За такої схеми поздовжній кут нахилу бункерного модуля становить $\alpha = 0^\circ$, висота точки зчеплення ґрунтообробно-посівного модуля з бункерним модулем – $h = h_0$ м, а зміщення центра мас бункерного модуля від осі опорних коліс у поздовжньому напрямку – $a = a_0$.

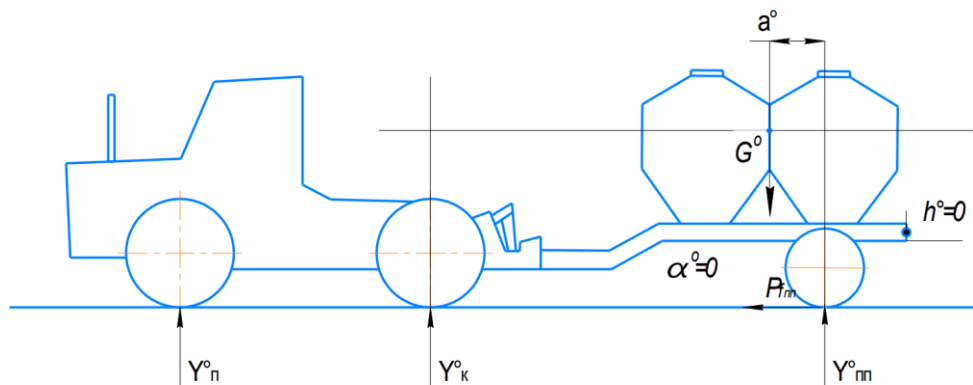


Рис. 2.3. Схема роботи посівного комплексу за умови горизонтального розташування рами.

При максимальному завантаженні (60–100 %) або за недостатнього завантаження (0–40 %) бункерів ППК та паливного бака трактора поздовжній нахил α , положення точки зчеплення h і зміщення a матимуть значення, відмінні від оптимальних (див. рис.2.4 і 2.5).

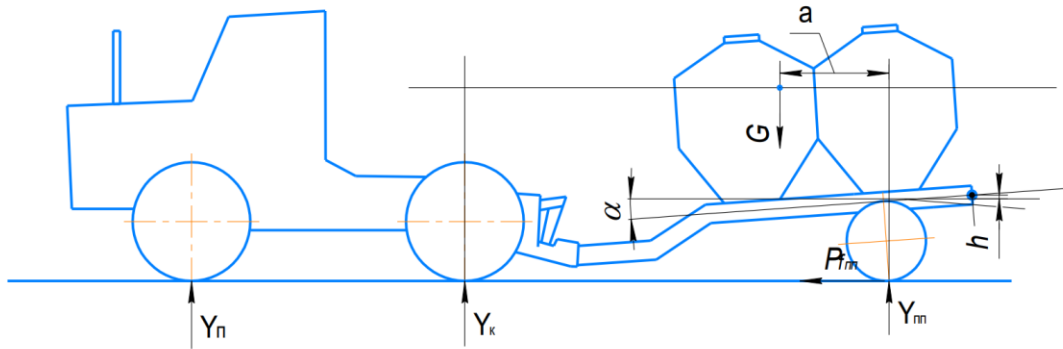


Рис. 2.4. Схема роботи МТА за завантаження бункерного модуля на 60–100 %.

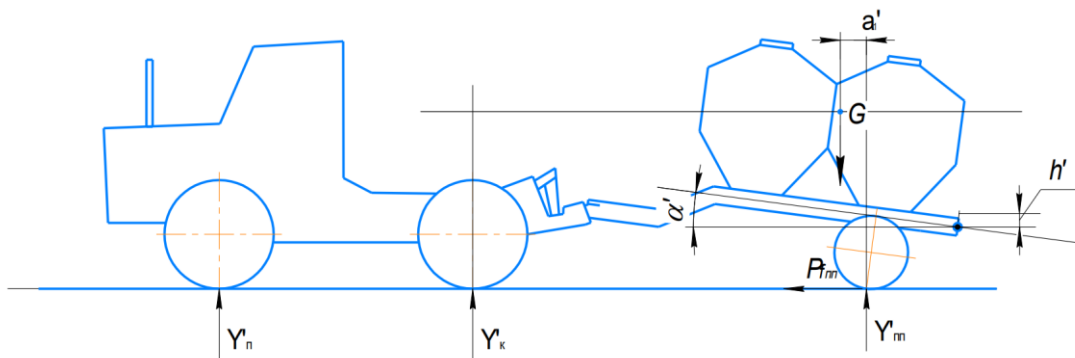


Рис. 2.5. Схема роботи МТА за завантаження бункерного модуля на 0–40 %.

Як показав досвід виробничої експлуатації МТА з ґрунтообробно-посівним комплексом, у процесі роботи оператору вкрай складно контролювати якісну роботу агрегату для дотримання агротехнічних вимог до обробітку ґрунту та сівби. Для розв'язання цієї проблеми нами розроблено конструкцію бункера з рухомою рамою (рисунки 2.6, 2.7, 2.8) [3].

Розроблений бункер для посівного агрегату містить несівну раму 1 з транспортними колесами 2, установлений на несівній рамі 1 бункер 3 із зерною секцією 5 та секцією для добрив 6, двигун 7, котушкові дозатори 8,

нагнітальний вентилятор 9, пневмомагістраль для транспортування насіння й добрив з верхніми та нижніми пневмотранспортними трубами 10.

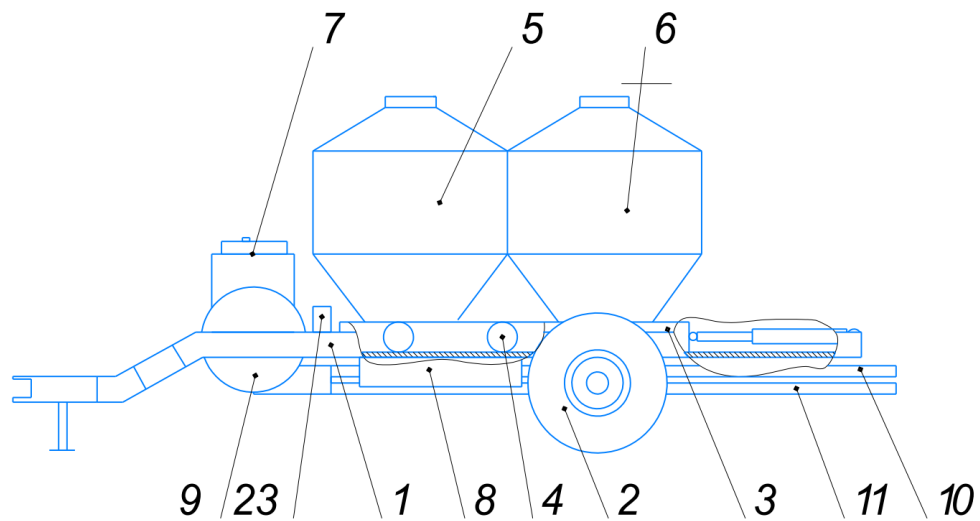


Рис.2.6. Загальний вигляд бункера

Бункер 3 установлено на рухомій рамі 11 у вигляді коробки прямокутної форми, виконаної з можливістю переміщення відносно несівної рами 1 на роликах 12 (рис.2.8) за допомогою гідравлічного приводу, показаного на рис.2.7.

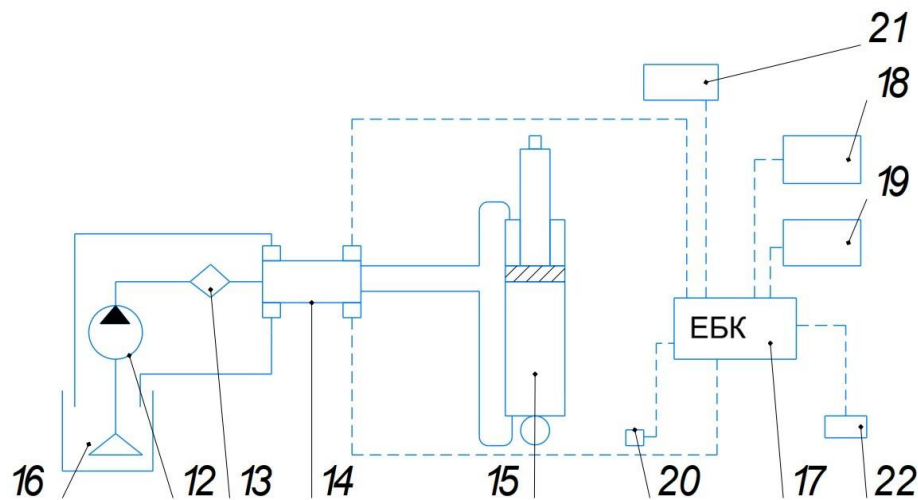


Рис. 2.7. Схема гідравлічного приводу розробленого бункера.

Гідравлічний привід бункера містить електронний блок управління (ЕБК) 17, насос 12, фільтр 16, гідророзподільник 14, гідроциліндр 15, бак, датчики секції насіння 20, датчики секції добрив 21, датчик переміщення 22, датчик рівня палива трактора 23, датчик осі причіпного пристрою трактора та датчик задньої осі трактора. На несівній рамі бункера встановлено упор [1].

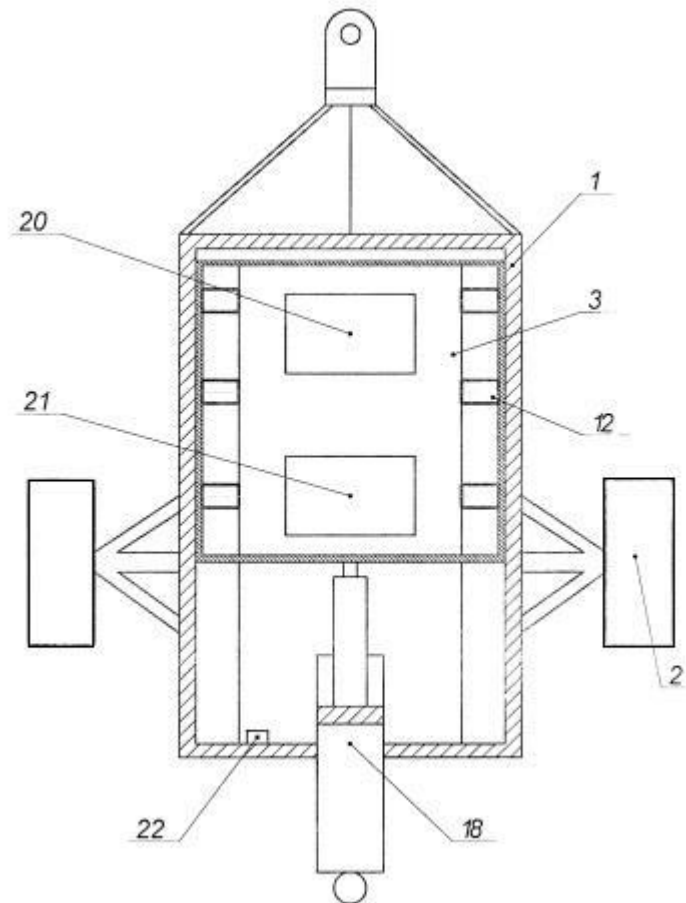


Рис. 2.8. Рама, вигляд зверху

Рухома рама виконана шарнірно з'єднаною між зерною секцією 4 та секцією для добрив 6 таким чином, щоб виключити вплив ваги зернової секції 4 на датчики 21, і навпаки – вплив ваги секції добрив 6 на датчики 20. Бункер для посівного комплексу у складі комбінованого посівного агрегату працює таким чином. Безпосередньо перед початком роботи зернова секція 5 і секція для добрив 6 заповнюються насіннєвим матеріалом та гранульованими мінеральними добривами. Далі виконується налаштування норми висіву насіння катушковими дозаторами 8 відповідно до таблиці норми висіву для обраної культури. Після цього встановлюються необхідні оберти нагнітального вентилятора 9. У процесі роботи при різній нормі висіву насіннєвого матеріалу та гранульованих добрив відбувається нерівномірне спорожнення зернової секції 4 і секції для добрив 5. Електронний блок управління 7 отримує дані від датчика секції насіння 20, датчика секції добрив 21, датчика рівня палива трактора 23,

датчика осі причіпного пристрою трактора 24 та датчика задньої осі трактора. Після обробки цих даних ЕБК 7 визначає раціональне розташування бункера і керує цим розташуванням, подаючи сигнал на гідророзподільник 15. Бункер переміщується відносно несівної рами за допомогою гідроциліндра 18 гідравлічного привода. Датчик переміщення 22 фіксує завершення етапу в системах циклової автоматики. Упор обмежує величину переміщення бункера вперед на несівній рамі 1.

Для агрегованого трактора здійснюється індивідуальне калібрування показань датчиків 20, 21, 22, 23, 24 за відомими методиками. Алгоритм керувальної дії гідравлічним приводом виконується відповідно до програми, закладеної в електронний блок управління 7 [1]. Програма визначає напрямок і величину переміщення бункера 3 відносно несівної рами 1 за допомогою гідроциліндра 15 відповідно до показань датчика 22, що забезпечує оптимальний розподіл маси бункера 3 між колесами бункера та трактора.

Бункер для посівного агрегату може використовуватися як в одноосьовому виконанні при агрегуванні за схемою трактор–бункер–культиватор, так і в двоосьовому виконанні при агрегуванні за схемою трактор–культиватор–бункер.

Використання запропонованого бункера дає змогу підвищити тягово-динамічні показники трактора й агрегату шляхом зменшення коефіцієнта перекочування, а також зменшити ущільнювальний вплив коліс бункера на ґрунт завдяки раціональному перерозподілу маси бункера з насінням і добривами між колесами бункера та трактора в процесі виконання технологічної операції.

2.3. Методика проведення дослідження

Як об'єкт дослідження розглядався процес функціонування машинно-тракторного агрегату під час сівби на базі колісного трактора John Deere та посівного комплексу John Deere 1890.



Рис. 2.9. МТА, який використовувався під час дослідження.

Ділянка, обрана для випробувань, відповідала таким умовам:

- ґрунт був однорідним;
- ділянка була однорідною за попереднім обробітком і попередньою культурою;
- розподіл бур'янів за густотою та видовим складом забезпечував однакові умови для проведення випробувань.

Розмір ділянки добирали таким чином, щоб забезпечити виконання робіт, передбачених планом і програмою випробувань. Довжина облікової ділянки становила не менше ніж 100–150 м. Повторність дослідів – щонайменше чотирикратна: два в прямому та два у зворотному напрямках.

До початку випробувань агрегат відпрацював у виробничих умовах не менше ніж 50 мотогодин чистої роботи.

Перед початком випробувань:

- виконали регулювання, передбачені технічною документацією;

- вибрали максимально можливу для даних умов швидкість руху агрегату. Під час вибору швидкості виходили з технічних характеристик та показників якості його роботи.

Основні показники енергетичної оцінки визначалися тензометричним методом.

Під час тягово-енергетичних випробувань вимірювальна апаратура ZET LAB та додаткове обладнання монтувалися в кабіні трактора. Датчики й прилади, установлені на тракторі та посівному комплексі, давали змогу реєструвати такі показники:

- тягове зусилля на гаках трактора, $P_{кр}$;
- навантаження на лівому та правому розкосах навіски, Q_1, Q_2 , кН;
- частоту обертання колінчастого вала двигуна, $n_{дв}$;
- частоту обертання коліс трактора (лівого і правого), n_k ;
- частоту обертання шляховимірювального колеса, $n_{пк}$;
- час досліду, t .

Вимірювально-реєструвальна апаратура складається з трьох модулів: модуля вимірювань силових показників; модуля вимірювань швидкісних показників; модуля реєстрації, управління та передавання інформації.

У модулі вимірювання силових показників S-подібні тензодатчики перетворюють механічну силу (розтяг/стиск) уздовж осі симетрії датчика на пропорційний електричний сигнал. Вимірювальний модуль ZET 7111 здійснює перетворення цієї напруги у значення вимірюваної величини та передає результати у цифровому вигляді. Далі результати передаються інтерфейсом CAN до перетворювача інтерфейсу ZET 7176.

У модулі вимірювання швидкісних показників безконтактні оптичні датчики обертів ZET 402 та індукційні датчики перетворюють фізичні величини в електричні сигнали й забезпечують формування імпульсів, частота яких пропорційна частоті проходження тахометричної мітки, встановленої на шківі

двигуна, болтах коліс трактора та шляховимірального колеса через зону чутливості датчика. Датчик обертів ZET 402 та індукційні датчики підключаються до універсальних цифрових модулів ZET 7180-V. Вимірвальний модуль ZET 7180-V оцифровує цей сигнал і видає значення вимірюваної величини у цифровому вигляді. Результати вимірювань передаються інтерфейсом CAN 2.0 до перетворювача інтерфейсу ZET 7176.

У модулі реєстрації, управління та передавання інформації цифрові датчики, що передають результати через інтерфейс CAN, підключаються до перетворювача інтерфейсу ZET 7176. Перетворювач інтерфейсу ZET 7176 з'єднується з роутером або безпосередньо з ноутбуком (ПК) за допомогою кабелю Ethernet. Перетворювач інтерфейсу Ethernet/Wi-Fi ↔ CAN ZET 7176 призначений для підключення вимірвальних мереж на основі цифрових датчиків з інтерфейсом CAN до ПК через Wi-Fi або Ethernet. Далі перетворювач інтерфейсу ZET 7176 збирає дані з цифрових датчиків по CAN і передає їх на ПК по Wi-Fi або Ethernet. У програмному забезпеченні ZETLAB здійснюється візуалізація вимірних параметрів, спектральний аналіз, генерування, запис і відтворення сигналів.

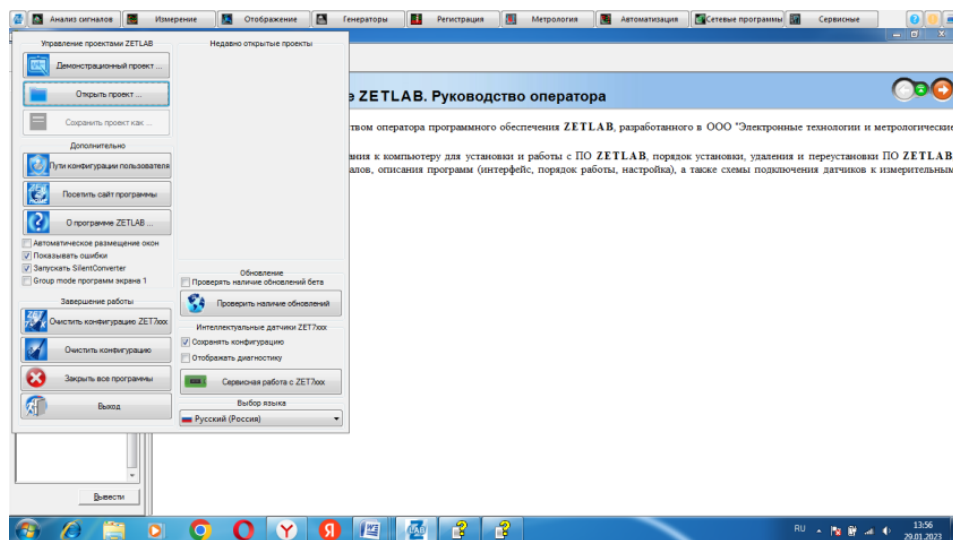


Рис. 2.10. Інтерфейс програмного забезпечення ZETLAB.

Під час енергетичної оцінки вимірювання та реєстрація показників здійснювалися на усталених режимах роботи агрегату. Для випробувань були

вибрані такі режими КПП трактора: передача 1, режим 2; передача 2, режим 2; передача 3, режим 2.

Вимірювання обертів ведучих коліс здійснювалося індукційними датчиками, встановленими на задньому мосту трактора (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Установлення індукційних датчиків на колесах

У зв'язку з тим, що під час енергетичної оцінки вимірювання та реєстрацію показників здійснюють на усталених режимах роботи агрегату, вкрай важливою є реєстрація частоти обертання колінчастого вала двигуна n , яка дає змогу за зовнішньою характеристикою визначити основні показники роботи двигуна. Вимірювання частоти обертання колінчастого вала здійснюється шляхом підрахунку кількості обертів шківів двигуна за допомогою індукційного датчика.

Для енергетичної оцінки агрегатів визначаються такі показники:

1. Ефективна потужність двигуна, споживана агрегатами, Вт
2. Коефіцієнт використання номінальної потужності двигуна
3. Питомі витрати палива, кг/га
4. Питомі енерговитрати на фізичну одиницю напруцювання, Вт·год/га

5. Умовний тяговий ККД енергетичного засобу, %
6. Тяговий опір, Н
7. Тягова потужність, Вт
8. Питоме тягове зусилля, Н/см²
9. Буксування рушіїв, %

Показники умов і режимів роботи:

1. Поступальна швидкість, м/с
2. Робоча ширина захвату, м
3. Глибина обробітку, см
4. Продуктивність за 1 годину основного часу, га/год

Якщо потрібно, може оформити це як таблицю, методику або розширений текст для розділу магістерської роботи.

Перед кожною серією дослідів виконували пробні записи всіх параметрів з метою перевірки працездатності тензодатчиків, оптичного датчика та індукційних датчиків (рис. 2.12).

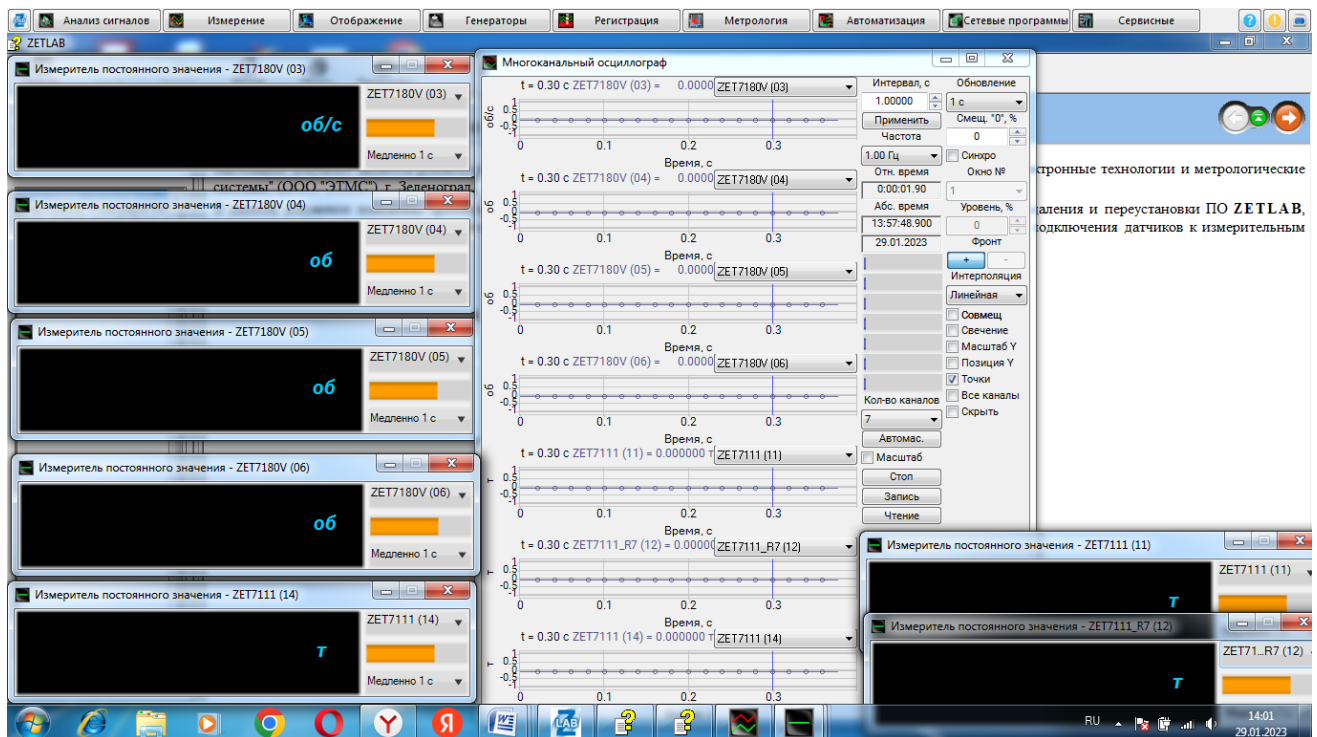


Рис. 2.12. Підготовка до пробного запису параметрів перед випробуваннями.

Висновки по розділу

Для забезпечення агротехнічних вимог під час виконання технологічних операцій були проведені роботи з модернізації конструкції ґрунтообробно-посівного комплексу, що забезпечує стабільне горизонтальне положення його бункерного модуля. Бункер для посівного агрегату може використовуватися як в одноосьовому виконанні при агрегуванні за схемою трактор–бункер–культиватор, так і у двоосьовому – у схемі трактор–культиватор–бункер. Використання запропонованого бункера дає змогу підвищити тягово-динамічні показники трактора й агрегату за рахунок зменшення ущільнювального впливу коліс бункера на ґрунт, а також зниження сил опору перекочуванню шляхом раціонального перерозподілу ваги бункера з насінням і добривами між колесами бункера та трактора в процесі виконання технологічної операції.

Удосконалена методика енергетичної оцінки машинно-тракторного агрегату в режимі реального часу та система обробки й аналізу експериментальних даних із цифровою передачею. Розроблений інформаційно-вимірювальний комплекс із набором сучасних цифрових датчиків і перетворювачів у програмному середовищі ZETLAB забезпечує в режимі реального часу візуалізацію виміряних параметрів, спектральний аналіз, генерування, запис і відтворення сигналів. Використання сучасної елементної бази та розробленого програмного забезпечення дало змогу значно знизити трудомісткість проведення випробувань і оброблення отриманих результатів.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Під час випробувань визначалися атмосферні та ґрунтові умови проведення дослідів.

Підготовка трактора до випробувань полягала у перевірці працездатності всіх вузлів і систем. Необхідні регулювання, налаштування, випробування трактора, а також експериментального обладнання та приладів проводили на тих самих ділянках, на яких визначалися показники роботи трактора та здійснювався відбір зразків ґрунту.

Під час випробувань коефіцієнт опору коченню коліс трактора становив на паровому полі 0,096, а на стерні – 0,088. Невелика різниця коефіцієнтів опору коченню трактора на паровому полі та стерні пояснюється тим, що тип ґрунту – чорнозем вилугуваний, важкосуглинкового механічного складу, оранка проводилася восени минулого року, а літо було посушливим. Саме ці фактори вплинули на величину коефіцієнта опору коченню трактора на паровому полі.

Зменшення ваги трактора та бункерів посівного комплексу з 237,40 кН до 175,40 кН у процесі висіву насіння та внесення добрив із бункерів посівного агрегату під час сівби впливає на силу опору коченню коліс трактора і бункерного модуля агрегату (рис. 3.1). У процесі роботи агрегату сила опору коченню коліс бункерного модуля на паровому полі знижується з 16,20 кН до 12,53 кН, а на стерні гречки – з 15,04 кН до 6,28 кН.

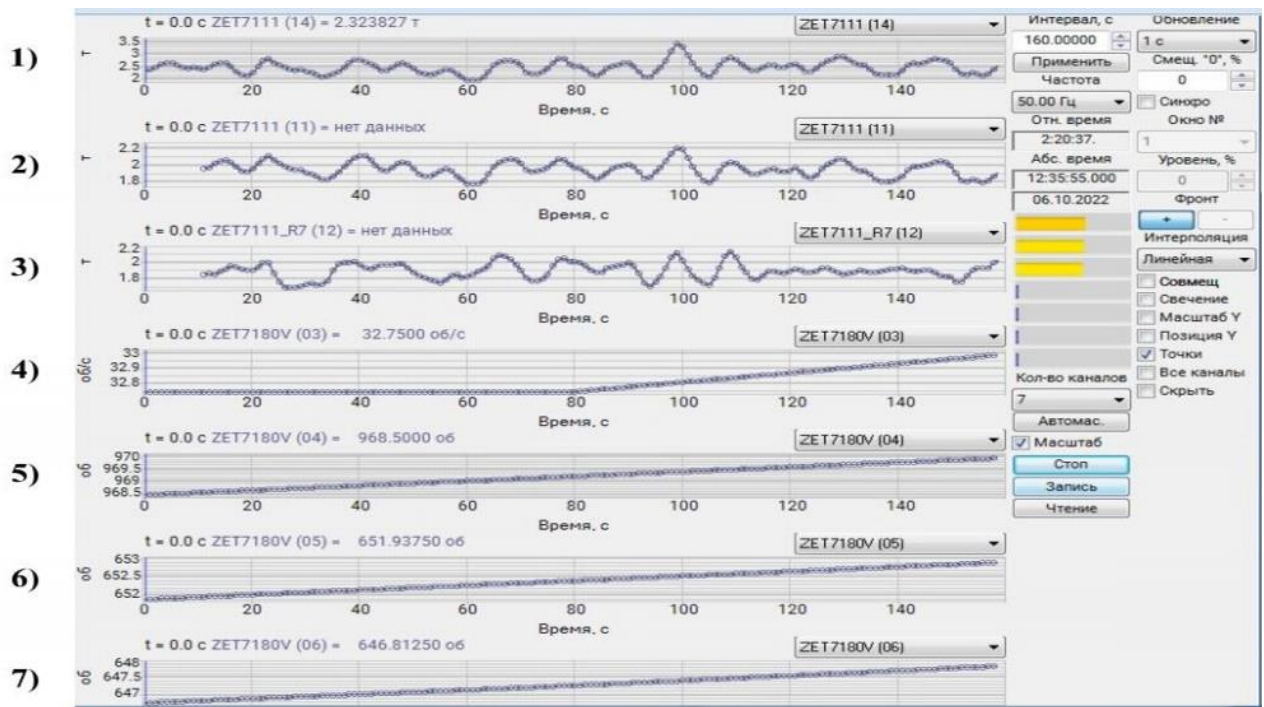


Рис. 3.1. Фрагмент осцилограми під час визначення тягово-енергетичних показників посівного агрегату трактором: 1 – горизонтальне тягове зусилля на гаку трактора, кН; 2, 3 – вертикальне тягове зусилля, кН; 4 – частота обертання двигуна, об/с; 5 – частота обертання шляховимірювального колеса, n_p ; 6, 7 – частота обертання правого та лівого коліс трактора, об.

Під час тягово-енергетичних випробувань у кабіні трактора монтували реєструвальне та додаткове обладнання. Установлені на трактор датчики давали змогу реєструвати такі показники: частоту обертання колінчастого вала двигуна $n_{дв}$; тягове зусилля на робочих органах, гаковому зусиллі трактора $P_{кр}$; частоту обертання лівого та правого коліс трактора n_k ; частоту обертання шляховимірювального колеса $n_{пк}$; час досліду t . Результати тягово-енергетичних випробувань наведено в табл. 3.1.

Графічна інтерпретація результатів розрахунків наведена на рис. 3.2–3.4. Показано експериментальні залежності тягового зусилля від швидкості роботи МТА за різного ступеня заповнення модульного бункера: за глибини посіву 5 см, 7 см і 9 см.

Таблиця 3.1 – Результати тягово-енергетичних та експлуатаційних випробувань

№	$G1$, кН	$G2$, кН	Пере- дача	a , см	$P_{кр}$, кН	v_r , м/с	v_{∂} , м/с	δ , %	$N_{кр}$, кВт	n_{∂} , хв ⁻¹	$\eta_{испмощ}$	Q , кг/га	$W_{год}$, га/год
1	0	0	II(1)	5	19	2,37	2,11	0,111	40,11	1835	0,27	15,24	3,76
2	0	0	II(1)	5	19,11	2,43	2,21	0,09	42,23	1836	0,28	14,65	3,93
3	0	0	II(2)	5	21,40	3,23	2,94	0,087	63,01	1955	0,44	11,08	5,24
4	0	0	II(3)	5	24,37	3,83	3,50	0,085	85,28	1840	0,63	8,81	6,23
5	0	0	II(4)	5	24,81	3,94	3,61	0,084	89,58	1750	0,71	7,19	6,42
6	0	0	II(1)	7	19,91	2,36	2,12	0,1	42,21	1890	0,28	15,07	3,77
7	0	0	II(1)	7	20,8	2,55	2,29	0,101	47,61	1949	0,32	14,21	4,07
8	0	0	II(2)	7	22	3,13	2,84	0,092	62,48	1956	0,44	11,30	5,05
9	0	0	II(3)	7	24,6	3,64	3,31	0,089	81,52	1835	0,60	9,04	5,89
10	0	0	II(4)	7	26,93	3,92	3,61	0,08	97,21	1750	0,77	6,87	6,42
11	0	0	II(1)	9	21,08	2,31	2,10	0,09	44,28	1910	0,29	15,03	3,74
12	0	0	II(1)	9	21,7	2,45	2,22	0,094	48,22	1937	0,32	14,41	3,95
13	0	0	II(2)	9	23,1	3,20	2,89	0,097	66,73	1955	0,46	11,13	5,14
14	0	0	II(3)	9	24,36	3,47	3,14	0,094	76,50	1921	0,56	9,33	5,59
15	0	0	II(4)	9	25,846	3,98	3,61	0,093	93,30	1750	0,74	7,11	6,42
16	18,5	12,5	II(1)	5	21,69	2,32	2,14	0,077	46,39	1956	0,31	14,72	3,80
17	18,5	12,5	II(2)	5	23,67	2,92	2,69	0,078	63,78	1769	0,44	11,46	4,79
18	18,5	12,5	II(2)	5	24,4	3,13	2,94	0,061	71,74	1800	0,50	10,75	5,23
19	18,5	12,5	II(3)	5	26,1	3,54	3,34	0,057	87,17	1955	0,64	8,67	5,94
20	18,5	12,5	II(4)	5	27,70	3,81	3,61	0,053	100,00	1740	0,79	6,56	6,42
21	18,5	12,5	II(1)	7	23,80	2,25	2,12	0,056	50,46	1850	0,33	14,51	3,77
22	18,5	12,5	II(1)	7	25,9	2,57	2,39	0,069	61,87	1798	0,41	13,32	4,25
23	18,5	12,5	II(2)	7	27	2,72	2,56	0,06	69,00	1965	0,48	11,38	4,55
24	18,5	12,5	II(3)	7	32,9	3,47	3,19	0,081	104,95	1944	0,77	8,29	5,67
25	18,5	12,5	II(3)	7	33,92	3,60	3,31	0,08	112,28	1950	0,83	8,09	5,89
26	18,5	12,5	II(1)	9	26,75	2,26	2,11	0,069	56,40	1943	0,37	14,36	3,75
27	18,5	12,5	II(1)	9	27,14	2,38	2,22	0,067	60,26	1945	0,40	13,85	3,95
28	18,5	12,5	II(2)	9	31	3,12	2,91	0,066	90,21	1958	0,63	10,34	5,18
29	18,5	12,5	II(3)	9	33,89	3,39	3,14	0,073	106,43	1915	0,79	8,16	5,59
30	18,5	12,5	II(3)	9	36,1	3,62	3,33	0,081	120,23	1936	0,89	7,88	5,92
31	37,0	25,0	II(1)	5	22,97	2,25	2,11	0,064	48,48	1905	0,32	14,68	3,75
32	37,0	25,0	II(1)	5	23,5	2,37	2,21	0,065	52,03	1943	0,35	14,16	3,94
33	37,0	25,0	II(2)	5	25,7	2,77	2,61	0,061	66,96	1697	0,47	11,39	4,63
34	37,0	25,0	II(2)	5	26,67	3,13	2,94	0,062	78,40	1915	0,55	10,59	5,23
35	37,0	25,0	II(3)	5	29,7	3,58	3,36	0,063	99,74	1943	0,74	8,34	5,97
36	37,0	25,0	II(1)	7	26,5	2,23	2,12	0,048	56,18	1683	0,37	14,21	3,77
37	37,0	25,0	II(1)	7	27,37	2,41	2,29	0,049	62,69	1900	0,42	13,46	4,07
38	37,0	25,0	II(2)	7	31,61	3,00	2,84	0,052	89,78	1930	0,63	10,31	5,05
39	37,0	25,0	II(2)	7	30,8	3,13	2,96	0,054	91,17	1954	0,63	10,19	5,27
40	37,0	25,0	II(3)	7	36	3,49	3,24	0,072	116,64	1803	0,86	7,86	5,76
41	37,0	25,0	II(1)	9	29	2,27	2,10	0,075	60,98	1919	0,41	14,22	3,74
42	37,0	25,0	II(1)	9	29,32	2,36	2,22	0,061	65,09	1870	0,43	13,63	3,95
43	37,0	25,0	II(2)	9	31,85	2,93	2,76	0,058	88,03	1914	0,61	10,46	4,92
44	37,0	25,0	II(3)	9	37,08	3,38	3,14	0,069	116,60	1809	0,86	7,77	5,59
45	37,0	25,0	II(3)	9	37,43	3,57	3,32	0,07	124,26	1900	0,92	7,664	4,91

Верхня межа допустимого діапазону швидкостей $V_{p"max} = 3,61 \text{ м/с}$, подана на рисунку, визначалася на підставі агротехнічної оцінки якості виконання операцій МТА. Подальше збільшення швидкості руху агрегату призводило до зниження якості посіву. Нижня межа швидкості $V_{p"min}$ відповідала частоті обертання дизеля $n_{\text{ена}}$ початку «полиці сталої потужності» згідно зі швидкісною характеристикою двигуна (приблизно 1600 хв^{-1}).

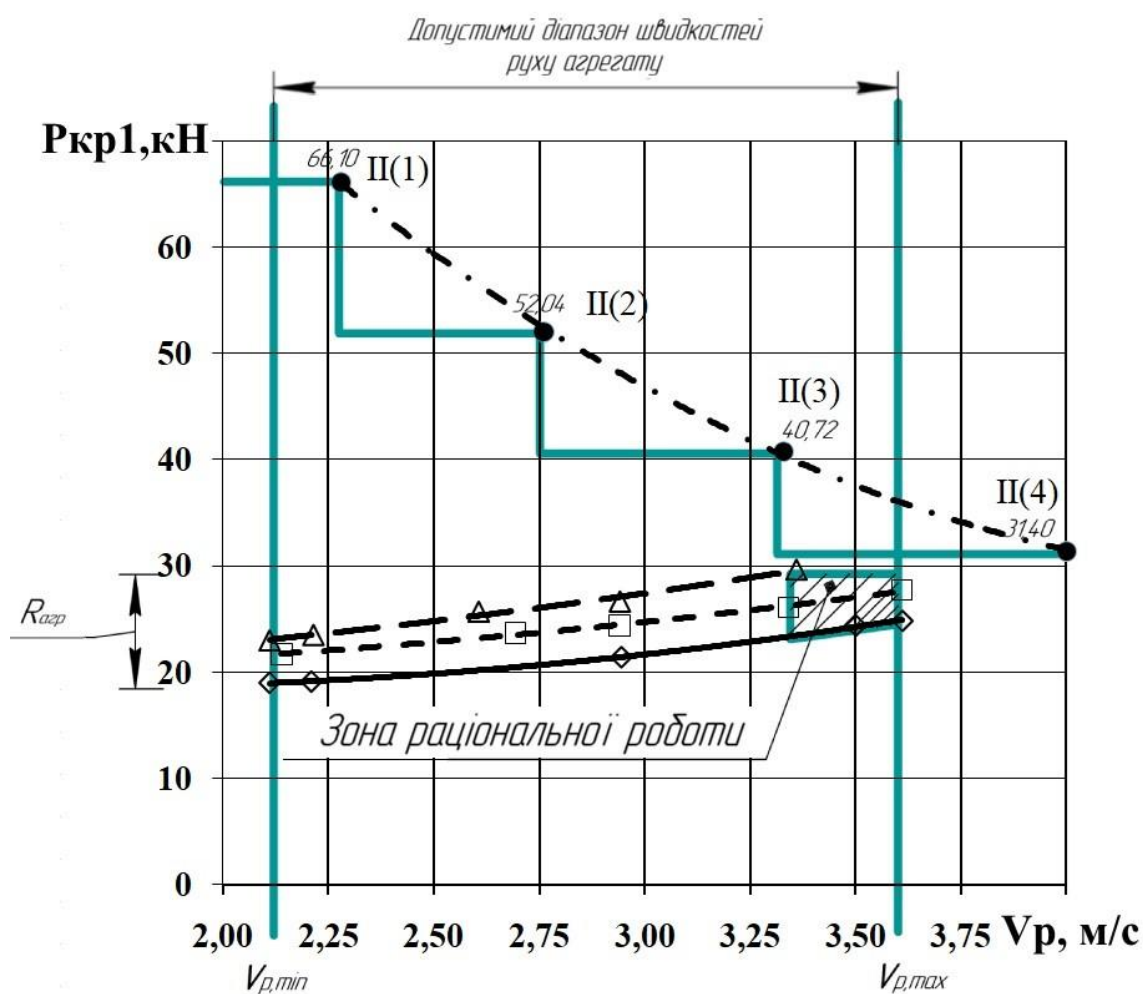


Рис. 3.2. Зміна тягового зусилля на буксирному гаку трактора та зчепі з ґрунтообробно-посівним модулем залежно від швидкості агрегату за глибини посіву 3 см.

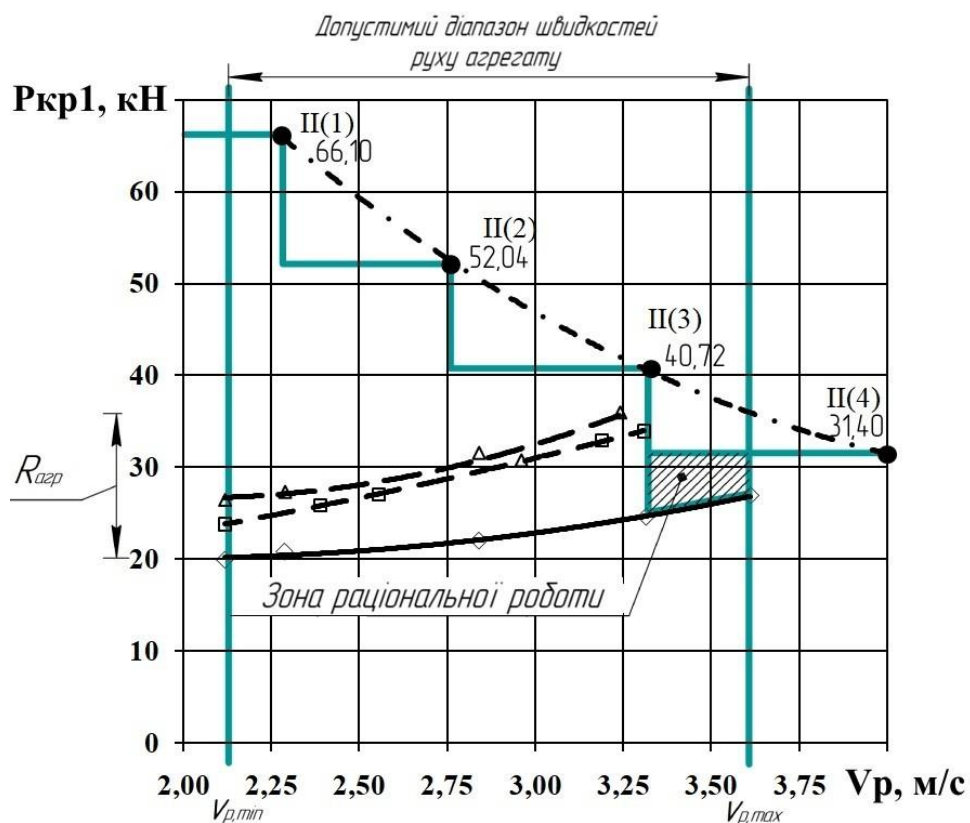


Рис. 3.3. Зміна тягового зусилля залежно від швидкості агрегату за глибини посіву 5 см.

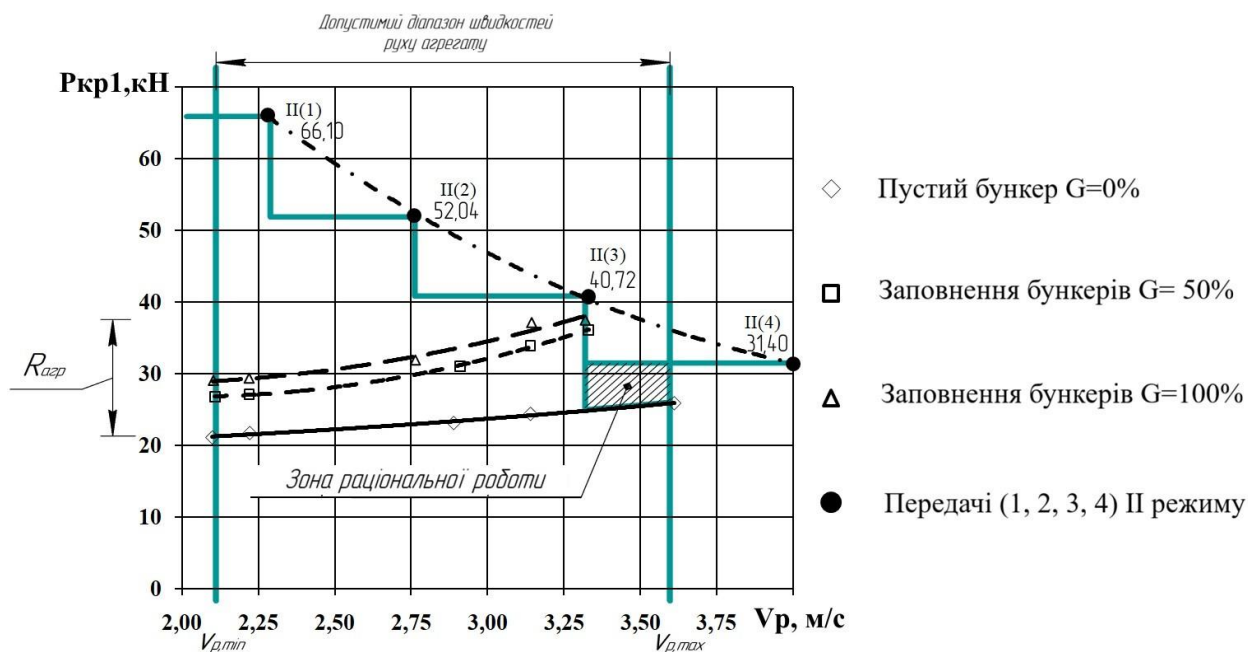


Рис. 3.4. Зміна тягового зусилля залежно від швидкості агрегату за глибини посіву 7 см.

На графіках пунктирною лінією показано теоретичну (потенційну) залежність гакового зусилля на другому режимі роботи трактора за умови постійного навантаження дизеля на номінальну потужність; точками позначено значення, що відповідають з першої по четверту передачі. Вище цієї теоретичної кривої робота МТА з $P_{кр1}$ і V_p є неможливою. На рисунку 8 також наведено теоретичну ступінчасту залежність, яка умовно обмежує верхню межу зони роботи трактора, виходячи з чотирьох швидкостей другого режиму трактора.

Як видно з графіків, на тягове зусилля посівного агрегату істотно впливають глибина посіву та швидкість агрегату. Із зростанням глибини посіву та швидкості агрегату тягове зусилля збільшується.

Під час руху агрегату зі швидкістю від 2,11 м/с до 3,61 м/с із порожніми бункерами: ...

(можу продовжити переклад наступного речення, якщо надасте продовження тексту).

- за глибини посіву $a = 3\text{см}$ тягове зусилля збільшується від 19,0 кН до 24,81 кН;
- за глибини посіву $a = 5\text{см}$ тягове зусилля збільшується від 19,91 кН до 26,93 кН;
- за глибини посіву $a = 7\text{см}$ тягове зусилля збільшується від 21,08 кН до 24,85 кН.

Під час руху агрегату зі швидкістю від 2,11 м/с до 3,36 м/с із повними бункерами:

- за глибини посіву $a = 3\text{см}$ тягове зусилля збільшується від 22,97 кН до 29,7 кН;
- за глибини посіву $a = 5\text{см}$ тягове зусилля збільшується від 26,5 кН до 36,0 кН;
- за глибини посіву $a = 7\text{см}$ тягове зусилля збільшується від 29,0 кН до 37,43 кН.

Усі отримані тягові зусилля змінюються за нелінійною залежністю рівняння. Найбільший коефіцієнт використання потужності двигуна досягається на 3-й передачі 2-го режиму. Встановлено, що максимальний коефіцієнт використання потужності двигуна $\eta_{\text{вик}} = 0,92$ спостерігається за повного завантаження бункерів насінням і добривами та глибини посіву 9 см.

У наших дослідях тяговий опір агрегату збільшується в середньому на 4,0 кН залежно від швидкості.

Визначивши основні параметри трактора, було побудовано теоретичну тягову характеристику для отримання наочного уявлення про його тягово-швидкісні показники.

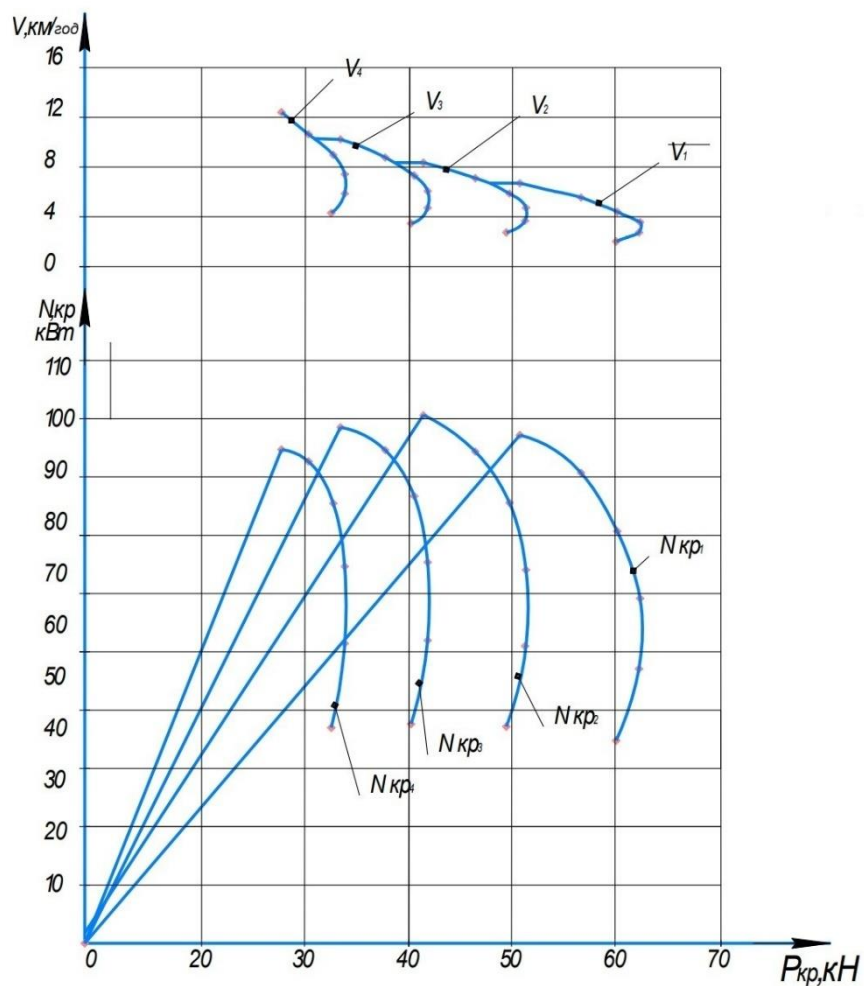


Рис. 3.5. Теоретична тягова характеристика трактора.

Аналіз теоретичної тягової характеристики трактора показує, що на другій передачі трактор розвиває максимальну тягову потужність, однак максимальна

швидкість при цьому становить лише 8,4 км/год. Якщо розглянути потенційну характеристику цього трактора, то очевидно, що за даних умов роботи повністю завантажити двигун неможливо. Отже, для досягнення найкращих техніко-економічних показників трактор має працювати на четвертій передачі при максимальній швидкості 13 км/год, що відповідає агротехнічним вимогам.

У процесі проведення експериментів значення коефіцієнта буксування протягом довжини гону не було сталим і коливалося в межах від 4,8 до 11,1%, середнє значення становило 7,4%. Тягове зусилля змінювалося від 19,0 кН до 37,43 кН і залежало від швидкості агрегату, глибини посіву та ваги бункерів.

Трактор працював на другому режимі на передачах 1, 2, 3 і 4, відповідно фактична швидкість змінювалася від 2,22 м/с до 3,61 м/с. Вихідна гакова потужність залежно від швидкості руху агрегату, глибини посіву та ваги бункерів насіння і добрив перебувала в межах від 40,11 кВт до 124,26 кВт.

Випробування показали підвищення ефективності МТА на таких режимах:

- за глибини посіву 5 см на другому режимі: при повному завантаженні — робота на 3-й передачі при робочій швидкості 3,36 м/с і частоті обертання 1900 хв^{-1} ; після 50% спорожнення бункерного модуля – перехід на 4-ту передачу зі швидкістю 3,61 м/с і частотою обертання колінчастого вала $1730\text{--}1750 \text{ хв}^{-1}$; питомі витрати палива на 1 га зменшуються від 7,77 до 7,17 кг/га.
- за глибини 7 і 9 см на другому режимі: при повному завантаженні – робота на 3-й передачі при робочій швидкості 3,36 м/с і частоті обертання двигуна 1900 хв^{-1} ; після 75% спорожнення бункерного модуля – перехід на 4-ту передачу при швидкості 3,61 м/с і частоті обертання колінчастого вала $1730\text{--}1750 \text{ хв}^{-1}$; питомі витрати палива на 1 га зменшуються від 7,66 до 7,19 кг/га.

На підставі експериментальних даних були обчислені тягові зусилля $\Delta P_{\text{кр1}}$, що встановлюють різницю між максимальними та мінімальними значеннями тягового зусилля на одній і тій самій глибині обробітку ґрунту та робочій швидкості.

У подальшому було проведено статистичну обробку отриманих експериментальних даних у програмі Excel за допомогою надбудови «Пакет аналізу». Отриманий множинний коефіцієнт кореляції становив досить високе значення – 0,89. Перевірка значущості коефіцієнтів регресії математичної моделі здійснювалася за t-критерієм Стюдента при прийнятому рівні значущості 0,1.

$$\Delta P_{кр1} = -0,58666 + 0,2681 \cdot a \cdot V_p + 0,04863 \cdot a^2. \quad (3.1)$$

a – глибина посіву, м;

V_p – швидкість посівного агрегату, м/с.

На рис. 3.6 представлено графік зміни тягового зусилля трактора (різниця між максимальною та мінімальною величинами) $\Delta P_{кр1}$ залежно від робочої швидкості під час виконання технологічного процесу сівби зернових за різної глибини обробітку ґрунту та посіву.

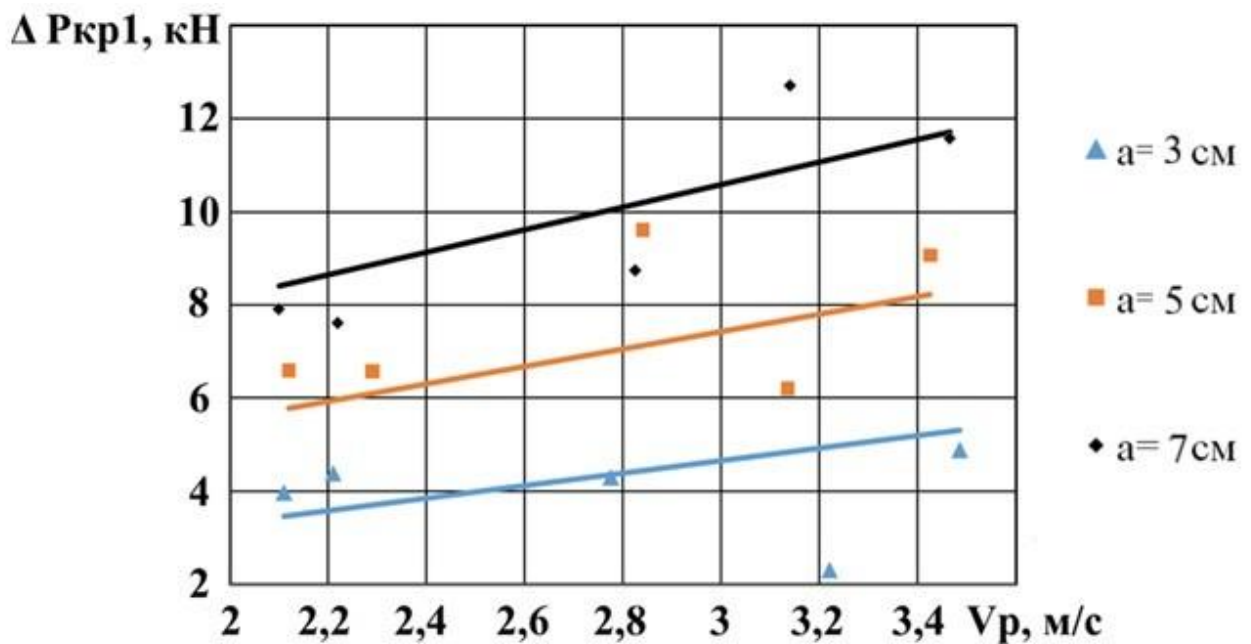


Рис. 3.6. Зміна тягового зусилля трактора (різниця між величинами при заповненні бункерів $G = 0\%$ і $G = 100\%$) $\Delta P_{кр1}$ залежно від робочої швидкості (V_p) за різної глибини обробітку та посіву.

Зі збільшенням робочої швидкості V_p спостерігається зростання тягового зусилля $P_{кр1}$ і, відповідно, сил опору ППК. Так, при заповненому бункерному модулі та посіві на глибину 5 см підвищення робочої швидкості з 2,11 м/с до 3,5

м/с призвело до зростання різниці сили опору ППК з 3,97 кН до 4,89 кН (на 23,1%).

При зменшенні ваги бункерного модуля величина різниці сили опору розташовується нижче зазначеної кривої. Водночас слід зазначити значно суттєвіше зростання різниці сил опору ППК при збільшенні глибини обробки ґрунту до 9 см: з 7,92 кН до 11,58 кН (на 46,2%). Подібний характер зростання сили опору ППК зі збільшенням робочої швидкості пояснюється й узгоджується з класичною теорією землеробської механіки.

У зв'язку з виявленою залежністю зміни сил опору ППК під час роботи (при зменшенні ваги бункерів) можна відзначити, що зі збільшенням робочої швидкості у потужнісному балансі трактора зменшується частка потужності, яка витрачається на подолання сил опору коченню, і спостерігається зростання потужності, що витрачається на подолання сил опору ґрунтообробних знарядь.

Під час експлуатаційних випробувань визначалась годинна продуктивність залежно від глибини посіву та швидкості руху агрегату (рис. 3.7).

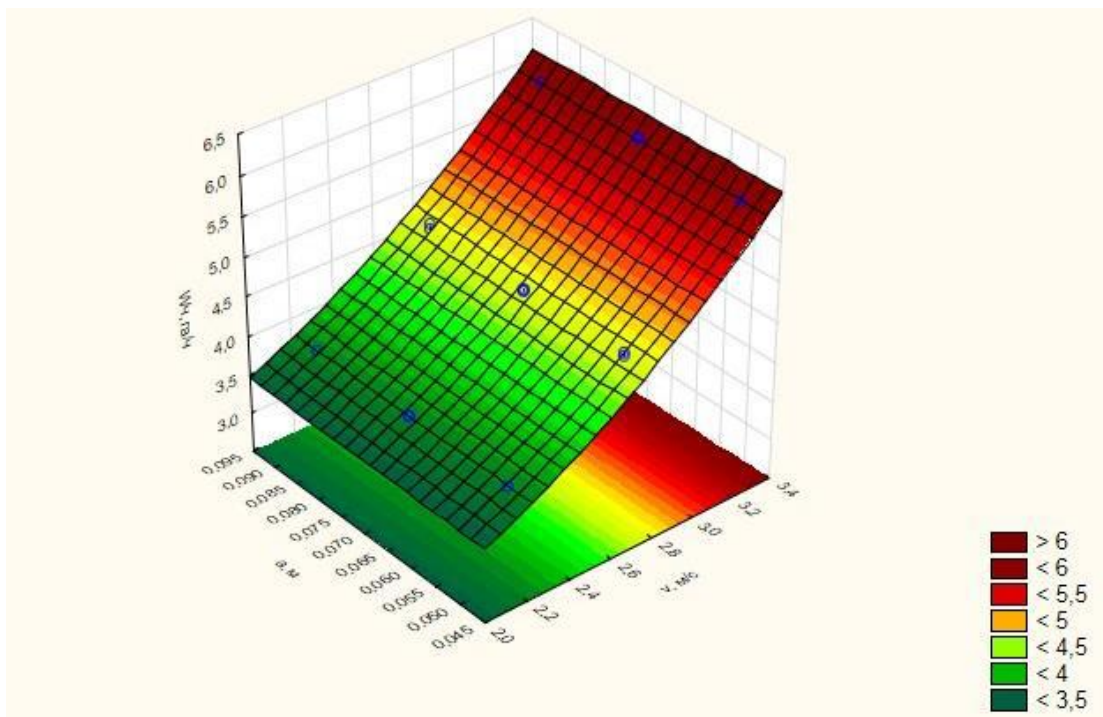


Рис. 3.7. Зміна годинної продуктивності посівного агрегату залежно від глибини посіву та швидкості руху.

Досліди (трифакторний, трирівневий) проводилися за планом Бокса—Бенкена з обробкою даних у програмі Statistica. Установлено, що продуктивність агрегату за одну годину основного часу збільшилася з 5,97 га/год до 6,20 га/год при коефіцієнті використання змінного часу 0,81. Підвищення продуктивності досягається шляхом збільшення робочої швидкості агрегату внаслідок зменшення сили опору перекочуванню агрегату в процесі витрати насіння та добрив із бункерів посівного комплексу.

Спільний аналіз даних показав, що розрахункові значення продуктивності дещо вищі за експериментальні. Це може бути пояснено не врахованими втратами часу, пов'язаними з нерегламентованими перервами. Відносне відхилення теоретичних та експериментальних значень продуктивності агрегату не перевищує 2,5–5,9%. Приріст показників забезпечується за рахунок зниження сили опору перекочуванню агрегату в процесі розвантаження насіння та добрив із бункерів посівного агрегату та відповідного збільшення середньої швидкості агрегату.

Таким чином, отримана математична модель адекватно описує залежність продуктивності й тягової потужності від експлуатаційних параметрів і режимів роботи агрегату, що підтверджує правильність теоретичних досліджень.

Лабораторно-польові досліді проводилися на полях Житомирського району.

Поле, підготовлене для проведення випробувань, мало такі характеристики: попередня культура – озима пшениця; рельєф – рівний; тип ґрунту – чорнозем вилугуваний, механічний склад – важкосуглинковий. Методом хронометрування визначали продуктивність за одну годину змінного та основного часу.

Агротехнічні вимоги враховувалися під час вибору глибини обробітку ґрунту та швидкості руху агрегату. Щільність і твердість ґрунту визначали на глибині до 25 см. Вологість ґрунту при цьому становила в межах 13,1...15,2 %.

У таблиці 4.6 наведено результати експлуатаційних випробувань за таких параметрів:

- щільність ґрунту $1,11 \dots 1,25 \text{ г/см}^3$,
- твердість ґрунту $0,26 \dots 0,4 \text{ МПа}$,
- вологість ґрунту $W = 12 \dots 14 \%$.

Таблиця 3.1 – Результати експлуатаційних випробувань

№ п/п	Показники	для базової моделі	с обґрунтованим режимом
1	Частота обертання колінчастого валу дизеля, хв^{-1}	1800 -1900	1720 -1900
2	Середня швидкість робочого ходу, км/гол	12,1	12,55
3	Робоча ширина захвату, м	6,1	
4	Глибина обробки, см	7 ± 1	
5	Продуктивність за 1 год основного часу, га/год	5,98	6,21
6	Коефіцієнт використання часу зміни, т	0,81	
7	Питомі витрати палива на один гектар обробленого поля, кг/га	8,49	7,94

З аналізу результатів експериментальних досліджень можна зробити висновок, що за одну годину основного часу продуктивність агрегату збільшилася до 6,21 га/год при коефіцієнті використання змінного часу 0,81. На один гектар обробленого поля питомі витрати палива становили 7,94 кг/га. Висока продуктивність досягається завдяки підвищенню робочої швидкості агрегату внаслідок зменшення опору коченню. Дизель працює ближче до зони номінальних параметрів своєї швидкісної характеристики – 1900 об/хв, що сприяє зниженню питомих витрат палива.

Висновки по розділу

Модернізація бункерного модуля дає змогу підвищити тягово-динамічні показники МТА шляхом зменшення ущільнювального впливу коліс на ґрунт

завдяки раціональному перерозподілу ваги бункера з насінням і добривами між колесами бункера та трактора в процесі виконання технологічної операції.

Бункер для посівного агрегату може використовуватися як в одноосьовому виконанні при агрегуванні за схемою трактор – бункер – культиватор, так і в двоосьовому виконанні при агрегуванні за схемою трактор – культиватор – бункер.

Тягово-енергетичні випробування машинно-тракторного агрегату підтвердили зниження сили опору перекочуванню в процесі витрати насіння та добрив із бункерів посівного агрегату. Випробування під час роботи трактора на другому режимі на 1-й, 2-й, 3-й і 4-й передачах та за зміни робочої швидкості від 2,22 м/с до 3,61 м/с показали, що тягова потужність залежить від швидкості руху агрегату, глибини посіву та ваги бункерів із насінням і добривами та перебувала в діапазоні від 40,11 кВт до 124,26 кВт.

Визначено раціональні режими роботи з урахуванням зміни маси бункерного модуля та зчіпної ваги трактора в процесі виконання посіву зернових культур, що показали підвищення ефективності МТА на таких режимах:

за глибини 3 см на другому режимі: при повному завантаженні — робота на 3-й передачі зі швидкістю 3,36 м/с і частотою обертання дизеля 1900 хв^{-1} ; після 50 % спорожнення бункерного модуля — перехід на 4-ту передачу зі швидкістю 3,61 м/с і частотою обертання колінчастого вала дизеля $1730\text{--}1750 \text{ хв}^{-1}$;

за глибини 5 і 7 см на другому режимі: при повному завантаженні — робота на 3-й передачі зі швидкістю 3,36 м/с і частотою обертання 1900 хв^{-1} ; після 75 % спорожнення бункера — перехід на 4-ту передачу зі швидкістю 3,61 м/с і частотою обертання дизеля $1730\text{--}1750 \text{ хв}^{-1}$.

Продуктивність агрегату за одну годину основного часу становила 5,98 га/год, а після обґрунтування режиму роботи посівного агрегату збільшилася до 6,21 га/год при коефіцієнті використання змінного часу 0,81.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Модернізація бункерного модуля дає змогу підвищити тягово-динамічні показники МТА шляхом зменшення ущільнювального впливу коліс на ґрунт завдяки раціональному перерозподілу ваги бункера з насінням і добривами між колесами бункера та трактора в процесі виконання технологічної операції. Бункер для посівного агрегату може використовуватися як в одноосьовому виконанні при агрегуванні за схемою трактор – бункер – культиватор, так і в двоосьовому виконанні при агрегуванні за схемою трактор – культиватор – бункер.

Розроблений інформаційно-вимірювальний комплекс із сучасними цифровими датчиками та перетворювачами в програмному середовищі ZETLAB забезпечує під час тягово-енергетичної оцінки машинно-тракторного агрегату в режимі реального часу візуалізацію вимірюваних параметрів, спектральний аналіз, генерування, запис і відтворення сигналів. Використання сучасної елементної бази та розробленого програмного забезпечення дає змогу у багато разів знизити трудомісткість проведення випробувань і оброблення отриманих результатів.

Тягово-енергетичні випробування машинно-тракторного агрегату підтвердили зниження сили опору перекочуванню в процесі витрати насіння та добрив із бункерів посівного агрегату. Випробування під час роботи трактора на другому режимі на 1-й, 2-й, 3-й і 4-й передачах та за зміни робочої швидкості від 2,22 м/с до 3,61 м/с показали, що тягова потужність залежить від швидкості руху агрегату, глибини посіву та ваги бункерів із насінням і добривами та перебувала в діапазоні від 40,11 кВт до 124,26 кВт.

Визначено раціональні режими роботи з урахуванням зміни маси бункерного модуля та зчіпної ваги трактора в процесі виконання посіву зернових культур, що показали підвищення ефективності МТА на таких режимах:

за глибини 3 см на другому режимі: при повному завантаженні — робота на 3-й передачі зі швидкістю 3,36 м/с і частотою обертання дизеля 1900 хв^{-1} ; після 50 % спорожнення бункерного модуля — перехід на 4-ту передачу зі швидкістю 3,61 м/с і частотою обертання колінчастого вала дизеля 1730–1750 хв^{-1} ;

за глибини 5 і 7 см на другому режимі: при повному завантаженні — робота на 3-й передачі зі швидкістю 3,36 м/с і частотою обертання 1900 хв^{-1} ; після 75 % спорожнення бункера — перехід на 4-ту передачу зі швидкістю 3,61 м/с і частотою обертання дизеля 1730–1750 хв^{-1} .

Продуктивність агрегату за одну годину основного часу становила 5,98 га/год, а після обґрунтування режиму роботи посівного агрегату збільшилася до 6,21 га/год при коефіцієнті використання змінного часу 0,81.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білоусов О. В. Перспективні напрямки розвитку посівних комплексів Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 8-9 травня 2025 року. Рівне : НУВГП, 2025. С. 11-12.
2. Дерев'янка Д.А., Бродовський Д.О., Білоусов О.В. Розрахункова схема динамічної коливальної системи мобільного енергетичного засобу. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.
3. Білоусов О.В. Шляхи підвищення ефективності функціонування машинно-тракторних агрегатів. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 3-5.
4. Дерев'янка Д.А., Білоусов О.В. Аналіз конструктивних особливостей ґрунтообробних-посівних комплексів та способів їх агрегування. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. С. 111-116
5. Офіційний сайт John Deere. URL: <https://www.deere.com/> (дата звернення: 06.04.2025).
6. Офіційний сайт KUHN. URL: <https://www.kuhn-usa.com/> (дата звернення: 06.04.2025).
7. Офіційний сайт Great Plains. <https://www.greatplainsag.com/en-gb/> (дата звернення: 06.04.2025).
8. Kepner R.A., Bainer R., Barger E.L. Principles of Farm Machinery. 3rd ed. AVI Publishing, 1987. 527 p.

9. Srivastava A.K., Goering C.E., Rohrbach R.P. Engineering Principles of Agricultural Machines. 2nd ed. ASABE, 2006. 588 p.
10. Kyes E. Soil Cutting and Tillage Mechanics. Elsevier Science, 1985. 337 p.
11. Witney B. Choosing and Using Farm Machines. Longman Scientific & Technical, 1988. 412 p.
12. Grisso R.D., Perumpral J.V., Vaughan D.H. Predicting Tractor Fuel Consumption. Virginia Cooperative Extension, 2014. 36 p.
13. Bernhardt H., Renius K. Landmaschinen und Traktoren: Grundlagen, Technologie, Sachverstand. 7. Aufl. BLV Verlag, 2017. 464 S.
14. Renius K.T. Traktoren: Technik – Märkte – Einsatz. Springer Vieweg, 2019. 598 S.
15. Götz S., Weber J. Maschineneinsatz in der Landwirtschaft: Arbeitswirtschaft, Kosten, Planung. Deutscher Landwirtschaftsverlag, 2016. 352 S.
16. Müller J., Bernhardt H. Landtechnik: Grundlagen, Anwendungen, Perspektiven. Ulmer Verlag, 2014. 544 S.
17. Finnern H. Bodenbearbeitung und Sätechnik: Maschinen, Verfahren und Wirkungsweise. Beuth Verlag, 2018. 268 S.
18. Гриценко В.П., Бабічев Ф.С. Сільськогосподарські машини. Київ: Урожай, 2019. 456 с.
19. Гладкий В.М., Марчук В.П. Механізація сільськогосподарського виробництва. Київ: Центр учбової літератури, 2020. 384 с.
20. Сидоренко О.В., Крижанівський В.Я. Трактори і автомобілі. Харків: ХНАУ, 2021. 420 с.
21. Борисенко В.І., Погорілий В.О. Технічний сервіс і діагностика машинно-тракторних агрегатів. Київ: Аграрна наука, 2020. 310 с.
22. Погорілий В.О. Теорія і конструкція сільськогосподарських машин. Київ: Аграрна освіта, 2017. 512 с.