

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 208 Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
агроінжинірингу

Михайло ШУЛЯК

“06” вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу
Олексію ОКСЕНЕНКУ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Впровадження цифрових систем контролю щільності ґрунту для оптимізації ґрунтозахисних технологій вирощування сільськогосподарських культур
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Сергій ХАРЧЕНКО, д.т.н., доцент
3. Строк подання здобувачем роботи: «14» __11__ 2025 року.
4. Вихідні дані до роботи: 1. Науково-технічна література. 2. Літературні джерела інформації та Інтернет ресурси. 3. Монографії, тощо за темою наукового дослідження. 4. Методичні рекомендації до виконання роботи.
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1 Загальний стан питання. 2. Комплектування МТА з урахуванням ущільнення ґрунтів 3. Розробка технологій вирощування сільськогосподарських культур із цифровим контролем твердості ґрунту. 4 Охорона праці. 5. Економічне обґрунтування роботи. Загальні висновки. Список літературних джерел.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

_____ (підпис)

Сергій ХАРЧЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Олексій ОКСЕНЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «06» вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1 Загальний стан питання»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2 Комплектування МТА з урахуванням ущільнення ґрунтів»	до 19.09.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3 Розробка технологій вирощування сільськогосподарських культур із цифровим контролем твердості ґрунту»	до 03.10.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4 Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5 Економічне обґрунтування роботи»	до 20.10.2025 р.	
10.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
11.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
12.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
13.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Сергій ХАРЧЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

(підпис)

Олексій ОКСЕНЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Олексенко О.О. Впровадження цифрових систем контролю щільності ґрунту для оптимізації ґрунтозахисних технологій вирощування сільськогосподарських культур. Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра з спеціальності 208 Агроінженерія за освітньою програмою «Системи точного землеробства». – Сумський національний аграрний університет, Суми.- 2025.

В роботі наведено аналіз дії рушіїв тракторів на ущільнення ґрунту, з'ясовано причини надмірного ущільнення ґрунтів. Розроблено заходи оптимізації цього параметру та методи контролю. Обґрунтовано ґрунтозахисні технології за критерієм мінімального ущільнення ґрунту. Розроблені ґрунтозахисні технології вирощування пшениці озимої та соняшника з цифровим контролем щільності ґрунту забезпечать зменшення величини ущільнення ґрунту. Проведені дослідження та спроектовані технологічні заходи по зменшенню ущільнення ґрунту і його контролю, що підтвердили їх ефективність.

Визначені небезпечні фактори при проведенні контролю твердості ґрунту та розроблені заходи безпеки праці при роботі з твердоміром, які враховують біль-шість імовірних виробничих ситуацій.

Економічний аналіз довів, що розроблена ґрунтозахисна технологія вирощування сільськогосподарських культур на прикладі озимої пшениці є економічно доцільнішою, оскільки забезпечує вищий рівень рентабельності в порівнянні з традиційними методами

Ключові слова: ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ, УЩІЛЬНЕННЯ ГРУНТУ, ТВЕРДІСТЬ ГРУНТУ, ЦИФРОВІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ, ЕФЕКТИВІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ

ABSTRACT

Oleksenko O.O. Implementation of Digital Soil Compaction Control Systems for Optimizing Soil-Protective Technologies in Crop Cultivation. Master's thesis for obtaining the degree of Master in specialty 208 Agricultural Engineering under the educational program "Precision Farming Systems". – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The study analyzes the effect of tractor drive wheels on soil compaction, identifying the causes of excessive soil compaction. Measures to optimize this parameter and control methods have been developed. Soil-protective technologies have been substantiated based on the criterion of minimal soil compaction. The developed soil-protective technologies for growing winter wheat and sunflower with digital soil density control will ensure a reduction in the magnitude of soil compaction. Research has been conducted and technological measures have been designed to reduce and control soil compaction, confirming their effectiveness.

Hazardous factors during soil hardness monitoring were identified, and occupational safety measures for working with a soil penetrometer were developed, taking into account most likely production scenarios.

The economic analysis demonstrated that the developed soil-protective crop cultivation technology, exemplified by winter wheat, is economically viable, as it ensures a higher level of profitability compared to traditional methods.

Keywords: CROP CULTIVATION TECHNOLOGIES, SOIL COMPACTION, SOIL HARDNESS, DIGITAL CONTROL SYSTEMS, IMPLEMENTATION EFFECTIVENESS

ЗМІСТ

Вступ.....	7
Розділ 1 Загальний стан питання	10
1.1 Сучасні енергозасоби та їх вплив на ущільнення ґрунту.....	10
1.2 Зв'язок технологій вирощування сільськогосподарських культур із ущільненням ґрунту.....	15
1.3 Методи контролю щільності ґрунту	21
1.4 Обґрунтування теми дипломної роботи.....	27
Розділ 2 Комплектування МТА з урахуванням ущільнення ґрунтів	29
2.1 Розрахунок енергії деформації ґрунту	29
2.2 Зв'язок енергії і площі ущільненого ґрунту рушіями техніки	31
2.3 Комплектування машино-тракторного агрегату	36
2.4 Проектування технологій з урахуванням ущільнення ґрунту	39
Розділ 3 Розробка технологій вирощування сільськогосподарських культур із цифровим контролем твердості ґрунту	46
3.1 Програма експерименту	46
3.2 Контроль твердості ґрунту по коліях агрегатів	47
3.3 Результати розробки технологій захисту ґрунту з використанням цифрового моніторингу щільності при вирощуванні сільськогосподарських культур	51
Розділ 4 Охорона праці.....	57
4.1 Загальні вимоги до охорони праці	57
4.2 Аналіз небезпечних факторів при проведенні контролю твердості ґрунту.....	57
4.3 Організаційні та технічні заходи по створенню безпечних умов праці працівників	58
4.4 Вимоги безпеки праці при вимірюванні твердості ґрунту.....	59

Розділ 5 Економічне обґрунтування роботи	60
5.1 Сутність економічного ефекту.....	60
5.2 Розрахунок економічної ефективності.....	60
Загальні висновки.....	68
Список використаних джерел.....	70
Додатки	

ВСТУП

Актуальність теми дипломної роботи зумовлена низкою глобальних та національних викликів, пов'язаних з ефективністю сільськогосподарського виробництва, збереженням ґрунтової родючості та адаптацією до змін клімату. Світове сільське господарство стикається зі зростаючим попитом на продовольство в умовах обмежених природних ресурсів та погіршення стану довкілля. Деградація ґрунтів, зокрема їхнє ущільнення, визнана однією з найсерйозніших проблем. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО), значні площі сільськогосподарських угідь у світі страждають від ущільнення, що призводить до зниження врожайності, оскільки ущільнений ґрунт перешкоджає розвитку кореневої системи, обмежує доступ рослин до води та поживних речовин, знижує газообмін. Крім того, ущільнені ґрунти мають меншу водопроникність, що посилює поверхневий стік та водну ерозію. Для обробітки ущільнених ґрунтів потрібно більше пального, зростає навантаження на техніку, що збільшує собівартість продукції. Також ущільнення негативно впливає на мікрофлору та мезофауну ґрунту, порушуючи його екосистемні функції.

Для України, як аграрної держави з великим потенціалом виробництва сільськогосподарської продукції, проблема ущільнення ґрунтів є особливо гострою. Інтенсивне використання важкої сільськогосподарської техніки, часті проїзди полем, порушення агротехнічних норм - все це призводить до формування так званої "плужної підшви" та інших ущільнених шарів. Це не лише знижує врожайність, але й ставить під загрозу довгострокову продуктивність наших чорноземів.

Традиційні методи контролю щільності ґрунту, такі як візуальний огляд або використання простих аналогових пенетрометрів, мають ряд суттєвих недоліків. Вони є суб'єктивними, неточними, трудомісткими та не дозволяють створювати комплексні просторові карти ущільнення. Це унеможлиблює впровадження ефективних заходів точного землеробства та диференційованої

грунтообробки, оскільки агрономи не мають об'єктивної та детальної інформації про стан ґрунту на кожній ділянці поля. Без точних даних, заходи з разушільнення ґрунту часто є "сліпими" або надмірними, що призводить до зайвих витрат та неефективності.

Зростання вимог до ефективності використання ресурсів, дотримання агроекологічних стандартів, підвищення врожайності культур в умовах зміни клімату висувають нові виклики до агровиробників. Одним із ключових напрямів, що потребує оптимізації, є контроль фізичного стану ґрунту, зокрема його щільності, як основного чинника, що визначає водопроникність, аерацію, розвиток кореневої системи та продуктивність культур.

У результаті інтенсивного механізованого обробітку, надмірного навантаження на ґрунт і неправильного підбору технологічних операцій у багатьох агроландшафтах України спостерігається ущільнення ґрунтового профілю, особливо в підорному горизонті. Це призводить до погіршення гідрофізичних властивостей ґрунту, пригнічення росту культур, ерозійних процесів та зниження ефективності добрив. Запобігти або усунути ці процеси можливо лише за умови своєчасного та точного контролю щільності ґрунту.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження цифрових систем моніторингу стану ґрунту, які дозволяють в реальному часі збирати, аналізувати та візуалізувати дані про фізичні властивості ґрунту. Сучасні електронні пенетрометри у поєднанні з програмним забезпеченням відкривають нові можливості для картування зон ущільнення, планування адаптивного обробітку та підвищення ефективності ґрунтозахисних технологій.

Зокрема, використання цифрового пенетрометра S600 та платформи Skok Agro дозволяє агровиробникам оперативно отримувати просторові дані про щільність ґрунту на різних глибинах, що дає змогу проводити диференційований обробіток: рихлення лише в тих ділянках, де це справді потрібно. Це сприяє економії ресурсів, зменшенню деградації ґрунтів та збереженню їхньої родючості.

Таким чином, дослідження, спрямоване на обґрунтування й апробацію цифрових систем контролю щільності ґрунту, є актуальним з наукової, технологічної та практичної точок зору, особливо в контексті розвитку точного та ґрунтозахисного землеробства в Україні.

Метою магістерської роботи є дослідження можливостей впровадження цифрової системи контролю щільності ґрунту з використанням пенетрометра S600 та ПЗ Skok Agro для підвищення ефективності ґрунтозахисних технологій у вирощуванні сільськогосподарських культур.

Для досягнення цієї мети у роботі поставлено ряд завдань:

- проаналізувати сучасні методи контролю щільності ґрунту;
- дослідити функціональні можливості цифрового пенетрометра S600;
- провести польові дослідження із картування щільності ґрунту;
- сформулювати рекомендації щодо адаптивного обробітку ґрунту на основі зібраних даних.

Результати дослідження мають практичну цінність для аграрних підприємств, які впроваджують технології точного землеробства, а також для науково-дослідних установ, що займаються питаннями моніторингу стану ґрунтів і сталого агровиробництва.

Таким чином, розробка та впровадження методології використання цифрових систем контролю щільності ґрунту для оптимізації ґрунтозахисних технологій є актуальним науково-практичним завданням, що має значний економічний, екологічний та соціальний потенціал для сталого розвитку агропромислового комплексу України. Ця робота відповідає сучасним тенденціям розвитку точного землеробства та є важливим кроком до більш раціонального та ефективного використання ґрунтових ресурсів.

Загальна характеристика змісту роботи: 5 розділів, 6 додатків, 73 сторінки друкованого матеріалу кількість ілюстрацій 17 шт., таблиць 21 шт., бібліографічних найменувань за переліком посилань 28 шт.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНИЙ СТАН ПИТАННЯ

1.1 Сучасні енергозасоби та їх вплив на ущільнення ґрунту

Україна володіє одними з найродючіших ґрунтів у світі - чорноземами, проте інтенсивна механізація спричиняє швидку деградацію їх потенціалу. Частина цієї деградації пов'язана саме з ущільненням ґрунту під вантажем сучасної сільськогосподарської техніки [1]. За останні десятиліття маса сільгосптехніки значно зросла: якщо в 1958 році комбайн важив близько 4 т, то до 2020-го - до 36 т. Хоча застосування великих шин знижує контактний тиск на поверхні, ущільнення на глибині зростає до потенційно критичного рівня [2]. Колісні трактори концентрують навантаження на дві осі, що створює сильні локальні тиски, тоді як гусеничні машини розподіляють масу рівномірніше. Проте широке застосування гусеничних агрегатів в Україні обмежене через економічні й технічні причини [3]. Навантаження понад 10 т на вісь на вологих ґрунтах може спричинити ущільнення до 60 см і більше - значно глибше звичайного обробітку ґрунту. Це веде до втрати врожайності до 10 % з гектара. Використання шин низького тиску, здвоєних або трійчастих шин, а також шин з технологією VF (Very high Flexion) дозволяє розподіляти навантаження та зменшувати тиск на ґрунт при збереженні вантажопідйомності - до 40 % більшої, ніж у стандартних шин; це мінімізує ущільнення, не жертвуючи продуктивністю [3].

Типовий аграрний цикл включає від 5 до 15 проходів техніки по полю, що істотно ущільнює орний і підорний горизонти ґрунту. Найбільше зміни щільності відбуваються при першому проїзді, найчастіше на глибині 20–30 см; надалі ущільнення розвивається глибше й ширше - з погіршенням аерації, гідропроникності і розвитку кореневої системи рослин [4].

Таблиця 1.1 - Коротка енергетична характеристика колісних тракторів

Модель	Маса, т	Потужність, к.с.	Тиск на ґрунт, кПа
MT3-50	3.6	55	70
MT3-80	3.8	80	80
MT3-82.1	4.0	82	85
John Deere 6155M	6.5	155	120
New Holland T7.210	7.2	210	135
CLAAS AXION 850	8.2	264	150

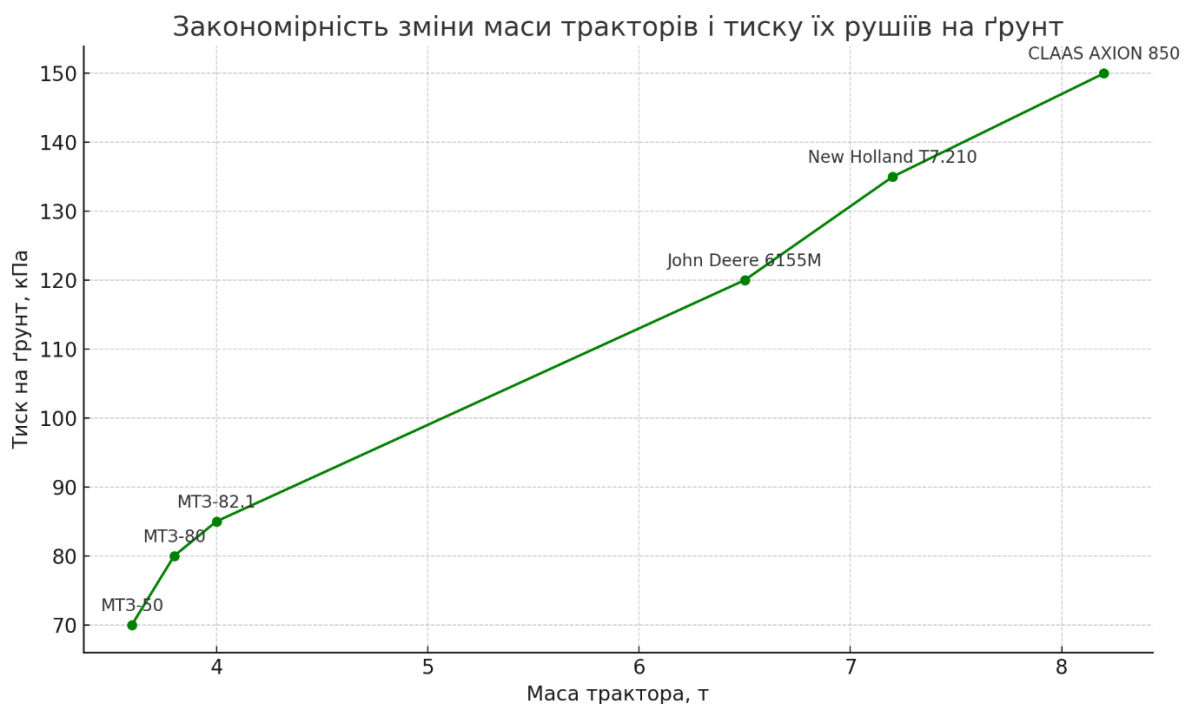


Рисунок 1.1 – Залежність маси трактора на тиск на ґрунт

Як видно з графіка:

- існує симбатна залежність між масою трактора і тиском рушіїв на ґрунт.
- зі зростанням маси техніки відбувається стале зростання тиску на ґрунт, що впливає на ступінь ущільнення ґрунтових горизонтів.
- ця закономірність є майже лінійною, що дозволяє оцінювати тиск рушіїв за масою для нових моделей.

Таблиця 1.2 - Характеристик гусеничних тракторів

Модель	Маса, т	Потужність, к.с.	Тиск на ґрунт, кПа	Питома потужність, к.с./т
DT-75	7.0	95	55	13.57
John Deere 8RT	16.0	310	42	19.38
CAT Challenger 95E	20.0	370	35	18.50
CASE IH 600 Quadtrac	25.0	600	32	24.00
CLAAS Terra Trac 960	22.0	653	34	29.68

Побудуємо графік залежності та проведемо аналіз даних в табл.1.2

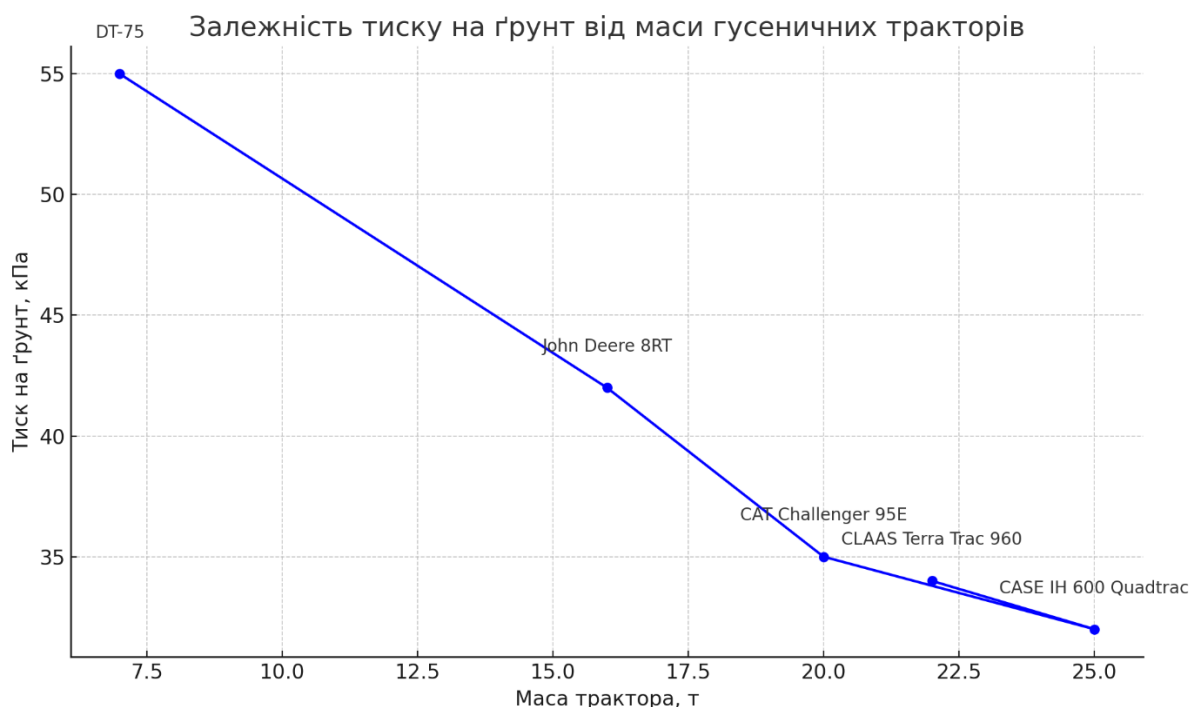


Рисунок 1.2 – Залежність навантаження на ґрунт від маси енергозасобу

Отже,

1. Із графіка видно, що з збільшенням маси гусеничних тракторів тиск на ґрунт зменшується, що є протилежною тенденцією до колісних тракторів. Це досягається завдяки:

- більшій площі контакту гусеничних рушіїв із ґрунтом;

- застосуванню гумометалевих гусениць, які рівномірно розподіляють навантаження;

- прогресивній геометрії рушіїв (розширення, низький профіль, гнучкість).

2. Значення питомої потужності для гусеничних тракторів зростає в межах 16–49 % (від DT-75 до CLAAS Terra Trac 960). У порівнянні з колісними тракторами, у яких питома потужність зростає майже на 86 % (від MT3-50 до CLAAS AXION), гусеничні моделі мають стабільніший показник, що свідчить про технологічну зрілість платформи та меншу залежність ефективності від потужності.

- Ключові технологічні рішення: CAT Challenger 95E і CASE IH 600 Quadtrac - приклади наймасивніших гусеничних тракторів із мінімальним тиском на ґрунт (32–35 кПа) завдяки застосуванню гумометалевих гусениць, які збільшують "пляму контакту" до максимуму.

- Зменшення тиску не за рахунок зменшення маси, а за рахунок удосконаленої конструкції рушіїв і використання сучасних матеріалів з амортизаційними властивостями.

Порівняємо залежності на ґрунт колісних та гусеничних енергетичних засобів.

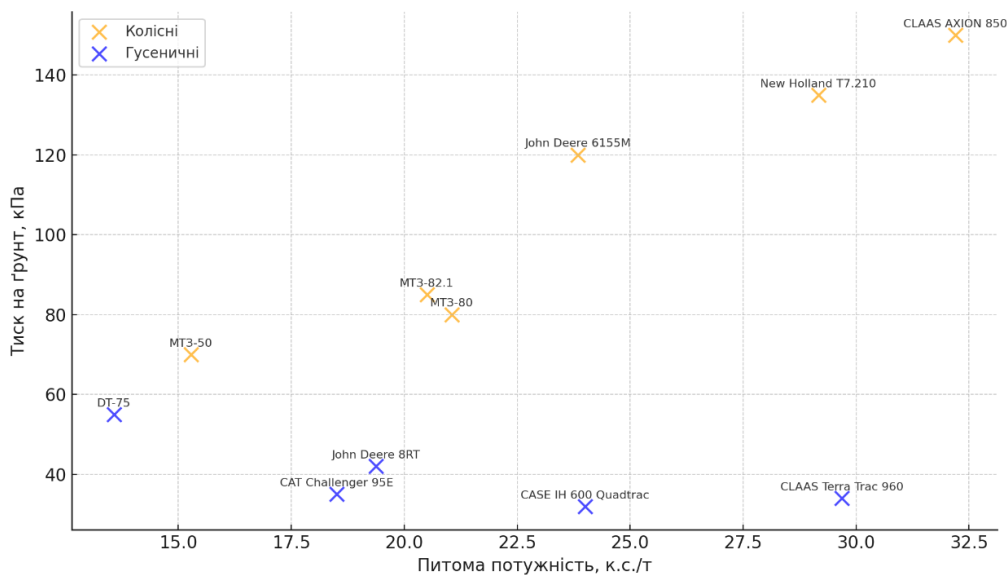


Рисунок 1.3 - Порівняння колісних і гусеничних тракторів за питомою потужністю та тиском на ґрунт

Графік демонструє ключові закономірності:

Колісні трактори:

- Розташовані у правій верхній частині графіка.
- Із зростанням питомої потужності (від ~ 15 до ~ 32 к.с./т) спостерігається різке зростання тиску на ґрунт - від 70 до 150 кПа.

- Найвища питома потужність спостерігається у CLAAS AXION 850, але з максимальним тиском серед усіх - 150 кПа.

- Спостерігається негативний ефект масштабування: підвищення енергетичної потужності супроводжується негативним агрономічним ефектом — ущільненням ґрунту.

Гусеничні трактори:

Розташовані у нижній частині графіка - при тому, що їх питома потужність не нижча, а часто навіть вища.

При питомій потужності до 30 к.с./т, тиск на ґрунт знижується до 32–35 кПа, що є удвічі меншим, ніж у порівнюваних колісних тракторів.

CLAAS Terra Trac 960 має найвищу питому потужність (~ 30 к.с./т), при цьому тиск лише 34 кПа.

Це досягнуто за рахунок: ширших і гнучкіших гусеничних рушіїв; застосування гумометалевих матеріалів; більшої площі контакту з ґрунтом.

Тоді, з графіка видно, що:

1. Колісні трактори при зростанні потужності значно підвищують тиск на ґрунт, що є небажаним для ґрунтозахисних технологій.

2. Гусеничні трактори дозволяють утримувати або зменшувати тиск на ґрунт, навіть за високої маси та потужності.

3. Це робить гусеничні енергосасоби ефективнішими з точки зору агроекології і перспективними для використання на чутливих до ущільнення ґрунтах.

Отже підсумуємо:

Колісні трактори із розвитком механізації значно збільшили масу та тиск на ґрунт, що призвело до погіршення його фізико-механічного стану.

У гусеничних енергозасобах застосовано технології, які дозволяють при зростанні маси зменшувати тиск на ґрунт.

Розвиток конструкції рушіїв, особливо гумометалевих гусениць, забезпечує максимальний контакт з ґрунтом, знижуючи ущільнення.

Питома потужність гусеничних тракторів залишається стабільною, що свідчить про їх енергетичну збалансованість.

Гусеничні енергозасоби - перспективний напрямок для адаптивних та ґрунтозахисних технологій у сільському господарстві, особливо при роботі на вологих, пухких або піщаних ґрунтах.

1.2. Зв'язок технологій вирощування сільськогосподарських культур із ущільненням ґрунту

Сучасні технології вирощування сільськогосподарських культур істотно впливають на фізичний стан ґрунту, особливо на його щільність та структуру. Традиційні агротехнології, що передбачають багатократний механічний обробіток ґрунту (до 13–15 проходів техніки за сезон), спричиняють його надмірне ущільнення. Такі зміни проявляються на глибинах до 50–70 см і навіть більше одного метра, що призводить до порушення водного, повітряного та теплового режимів ґрунту, погіршення біологічної активності, зниження рівня мікробного життя та зменшення врожайності на 15–50 % залежно від культури та ступеня ущільнення [7, 8].

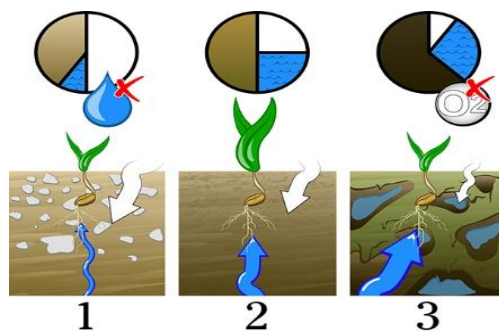


Рисунок 1.4 -Обмеження випаровування при ущільненні ґрунту [9]

Однією з основних причин ущільнення є тиск техніки на ґрунт під час проведення обробітку. Під час надмірного ущільнення до 80 % кореневої маси концентрується у верхньому шарі 7-10 см, що обмежує поглинання вологи та поживних речовин із глибших горизонтів, знижує стійкість культур до засухи, сприяє розвитку ерозійних процесів і спричиняє втрати врожайності пшениці, кукурудзи, сої та інших культур на рівні 20-40 % [9].

Альтернативою є технології мінімального та нульового обробітку ґрунту (No-Till, Strip-Till), які передбачають мінімізацію втручання в ґрунтове середовище. Такі підходи зберігають природну структуру ґрунту, сприяють накопиченню вологи та органічної речовини, однак потребують адаптації техніки до специфіки роботи на неущільненому полі. Крім того, тривале використання No-Till без ротації культур та використання структуроутворюючих рослин може спричинити ущільнення верхнього шару ґрунту [9].

Серед практичних агротехнічних методів зменшення ущільнення виділяють використання покривних культур (овес, олійна редька, конюшина), які завдяки потужній кореневій системі покращують структуру ґрунту, сприяють формуванню агрегатів та відновленню природної пористості. Водночас застосування структуроутворюючих культур, таких як гречка, еспарцет, люцерна, сприяє підвищенню вмісту гумусу, біоактивності ґрунту та його стійкості до механічного ущільнення [8.9].

Іншим важливим підходом є впровадження систем контролю руху техніки (Controlled Traffic Farming - CTF), що дозволяє зосередити проходи енергозасобів у межах визначених колій. Це забезпечує захист до 85 % площі поля від надмірного ущільнення, підвищує ефективність водного обміну та знижує витрати пального [7].

Оптимальне значення об'ємної щільності ґрунту для основних польових культур становить 1,0-1,3 г/см³, тоді як перевищення цієї межі на 0,1-0,2 г/см³ знижує схожість, ускладнює проростання насіння та істотно зменшує врожайність [8] див табл. 1.3

Таблиця 1.3 - Щільність ґрунту в посівах с.-г. культур, г/см³ [8]

Система обробітку ґрунту	Шар ґрунту, см		
	0-10	10-20	20-30
<i>Пшениця озима</i>			
Полицевий на 20-22 см	1,1	1,18	1,26
Мілкий на 10-12 см	1,13	1,21	1,3
Поверхневий на 6-8 см	1,23	1,28	1,39
<i>Кукурудза на зерно</i>			
Полицевий на 20-22 см	1,06	1,17	1,24
Мілкий на 10-12 см	1,16	1,24	1,28
Поверхневий на 6-8 см	1,18	1,26	1,32
<i>Ячмінь ярий</i>			
Полицевий на 20-22 см	1,15	1,21	1,24
Мілкий на 10-12 см	1,19	1,25	1,3
Поверхневий на 6-8 см	1,21	1,29	1,35
<i>Ріпак озимий</i>			
Полицевий на 20-22 см	1,14	1,29	1,33
Мілкий на 10-12 см	1,22	1,33	1,38
Поверхневий на 6-8 см	1,29	1,36	1,47

Крім того, ущільнення значно залежить від вологості під час обробітку - при перевищенні 60-70 % НВ ґрунт легко ущільнюється, тому агротехнічні

операції повинні проводитися в оптимальні строки, з урахуванням маси енергозасобів і допустимого навантаження (весною - не більше 0,4 кг/см², передпосівне - до 0,6, зяблева оранка - до 1,5 кг/см²) [8].

У процесі застосування поверхневого обробітку ґрунту під озимим ріпаком у сівозміні спостерігалось збільшення щільності ґрунту. Зокрема, у горизонті 10–20 см вона досягала 1,36 г/см³, а в шарі 20-30 см зростала до 1,47 г/см³. Порівняння з полицевою системою обробітку показало, що при поверхневій обробці щільність ґрунту в шарі 20-30 см була вищою на 0,14 г/см³.

Урожайність сільськогосподарських культур виступає ключовим індикатором ефективності технологій обробітку ґрунту з точки зору збереження або покращення його родючості. За умов використання полицевої системи на глибину 20-22 см та мілкої обробки на 10-12 см було зафіксовано позитивну реакцію озимої пшениці, ярого ячменю та кукурудзи на оптимальну агрофізичну структуру ґрунту у профілі 0–30 см, що сприяло підвищенню врожайності (див. табл. 1.4). [8]

Таблиця 1.4 - Урожайність с.-г. у сівозміні, т/га

Система обробітку ґрунту	Культура сівозміни			
	пшениця озима	ячмінь ярий	кукурудза	ріпак озимий
Полицевий на 20–22 см	6,8	5,19	11,25	2,97
Мілкий на 10–12 см	6,32	4,99	11,33	3,05
Поверхневий на 6–8 см	5,35	3,5	7,59	2,67
НІР ₀₂	0,21	0,18	0,17	0,12

На графіку, див. рис. 1.5 зображено характерні залежності між щільністю ґрунту та урожайністю основних зернових культур:

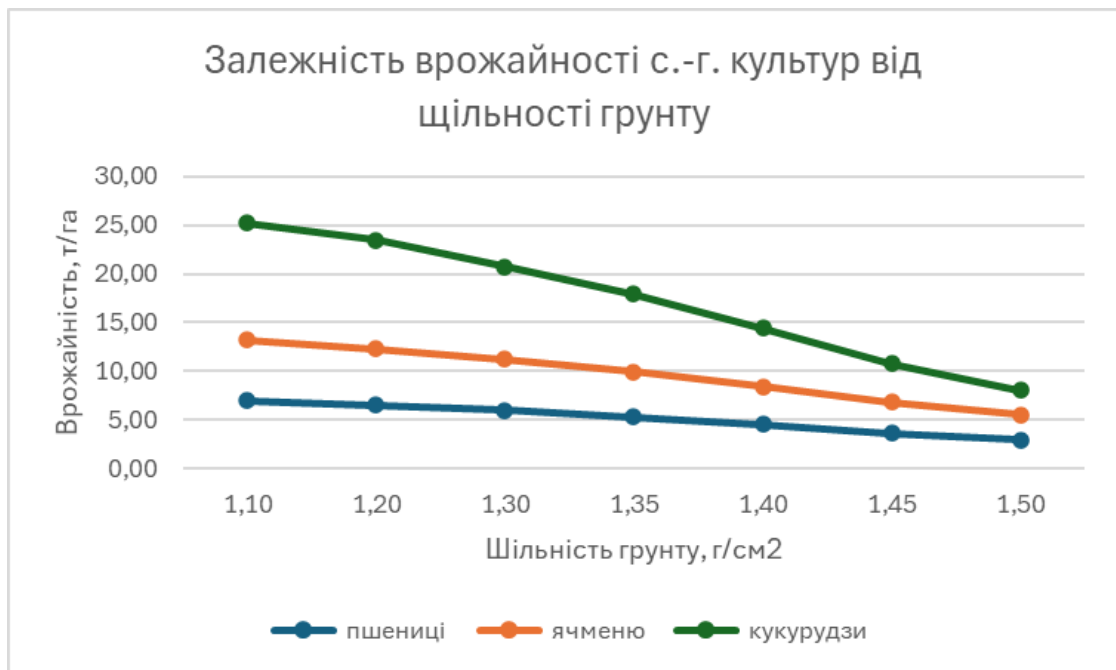


Рисунок 1.5 - Залежність між щільністю ґрунту та урожайністю основних зернових культур

Згідно залежності на рис. 1.5 , можемо зробити такий висновок:

- озима пшениця, ярий ячмінь та кукурудза показують тенденцію до зниження урожайності зі зростанням щільності ґрунту.
- максимальні врожаї досягаються при оптимальній щільності ґрунту близько 1.1-1.2 г/см³.
- При перевищенні щільності 1.4 г/см³ урожайність істотно знижується, особливо у кукурудзи (зменшення майже в 5 разів).
- це свідчить про критичну важливість регулювання фізичних властивостей ґрунту в системах обробітку та використання енергозасобів.

Універсальна формула розрахунку ущільнення ґрунту (його величину), коли вже зібрали врожай, має вигляд [16]:

$$\begin{aligned}
 \Pi_{nz} &= \Pi_{nk} \cdot K_{вщ} + \Pi_o + \Delta\Pi_z \cdot T_{nz} \times \\
 &\times \left(\frac{S_{щz,1}}{S_{зз,1}} + \frac{S_{щz,2}}{S_{зз,2}} + \dots + \frac{S_{щz,n}}{S_{зз,n}} \right) + \Delta\Pi_k \cdot T_{nk} \times \\
 &\times \left(\frac{S_{щк,1}}{S_{зк,1}} + \frac{S_{щк,2}}{S_{зк,2}} + \dots + \frac{S_{щк,n}}{S_{зк,n}} \right),
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

де - $\rho_{пз}$ - щільність ґрунту після збору попередника, г/см³. Цей показник вимірюється твердоміром. Якщо вимірювання неможливі, можна використовувати нормативне значення 1,5 г/см³; $K_{вц}$ - коефіцієнт відновлення щільності (ґрунт повертається до початкової щільності протягом 10-20 років, тому значення цього коефіцієнта становить 0,05–0,10); ρ_0 – щільність початкова (типові значення коливаються від 1,08 до 1,11 г/см³); $\Delta\rho_з$, $\Delta\rho_к$ - темпи зростання щільності (це показники впливу рушіїв на ґрунт: гусеничні машини- 0,025 г/см³, колісні машини- 0,03 г/см³); $T_{пз}$, $T_{пк}$ - кількість проходів (це кількість проходів гусеничних і колісних машин відповідно, з початку виконання польових робіт навесні до збирання восени. Ці дані беруться з технологічної карти вирощування культур); $S_{цг1}$, $S_{цг2}$,..... $S_{цгп}$ - ширина ущільнення (ширина зони ущільнення ґрунту при проході агрегату з гусеничною ($S_{цг}$) або колісною ($S_{цк}$) машиною, м; $S_{зг}$, $S_{зк}$ - ширина захвату (ширина захвату агрегату з гусеничною ($S_{зг}$) або колісною ($S_{зк}$) машиною, м.

Використання цієї формули дозволяє спрогнозувати рівень ущільнення ґрунту, що дає можливість завчасно скоригувати технологію вирощування культур для мінімізації негативного впливу на ґрунт, запобігаючи його деградації та ерозії.

Результати розрахунків, наведені в [16], показують суттєву різницю в ущільненні залежно від застосованої технології:

- Інтенсивні технології: після збирання врожаю щільність ґрунту може досягати 1,55-1,64 г/см³ і більше. Це пояснюється не тільки багаторазовими проходами техніки, а й меншою шириною захвату агрегатів.

- Нульові технології (No-till): цей показник значно зменшується до 1,28–1,32 г/см³. Графік (див. рис. 1.6) підтверджує стабільне зменшення ущільнення ґрунту при застосуванні таких технологій.

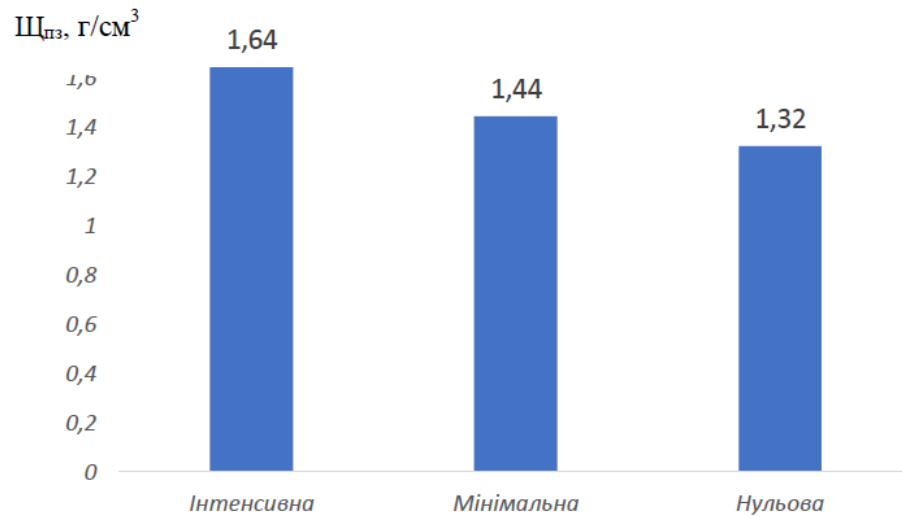


Рисунок 1.6 - Усереднені значення щільності ґрунту в залежності від технологій вирощування с.-г. культур

Надмірне ущільнення ґрунту є критичною проблемою, оскільки щільність на рівні 1,64 г/см³ і вище є непринятною і призводить до зниження врожайності. Наприклад, у джерелі [8] зазначається, що врожайність ярого ячменю на коліях трактора МТЗ-80 зменшується на 27%.

Важливо розуміти, що щільність ґрунту має бути не мінімальною чи максимальною, а оптимальною.

Таким чином, ущільнення ґрунту є ключовим обмежувальним фактором при інтенсивному веденні сільського господарства. Для реалізації ґрунтозахисних технологій вирощування сільськогосподарських культур необхідне поєднання агротехнічних, конструктивно-механічних і організаційних заходів, спрямованих на збереження агрофізичних властивостей ґрунту, підвищення його родючості та стійкості до навантаження [8].

1.3 Методи контролю щільності ґрунту

Контроль щільності ґрунту є ключовим елементом у системах управління родючістю та ефективності ґрунтозахисних технологій. Підвищення щільності ґрунту внаслідок механічного ущільнення сільськогосподарською технікою, неправильної агротехніки або природних процесів може призводити до

зниження проникності повітря і води, обмеження розвитку кореневої системи та зменшення врожайності культур. Сучасні методи контролю щільності ґрунту включають визначення його твердості за допомогою твердомірів і пенетрометрів, що у поєднанні з цифровими технологіями забезпечує високоточний і оперативний моніторинг.

Контроль щільності ґрунту є критично важливим етапом для оптимізації ґрунтозахисних технологій вирощування сільськогосподарських культур. Він дозволяє оцінити поточний стан ґрунту, ідентифікувати ущільнені шари та вчасно скоригувати агротехнічні заходи. Сучасні методи контролю можна умовно розділити на польові та лабораторні, а також за ступенем автоматизації – на ручні та цифрові.

Показник щільності (об'ємної чи масової) впливає на проникнення води, доступ кисню та розвиток кореневої системи рослин. Визначення щільності на пряму трудомістке, тому використовують тісно пов'язаний параметр - твердість ґрунту, який корелює з його щільністю [10].

Твердість - це властивість ґрунту чинити опір проникненню стороннього тіла (наприклад, наконечника пенетрометра). Існують числові кореляції: твердість близько 3 000 кПа часто відповідає граничній щільності $\approx 1,3 \text{ г/см}^3$ [11].

Твердомір (щільномір ґрунту) Wile SoilШ (див. рис.1.7, а) – це портативний аналоговий (механічний) ґрунтовий пенетрометр фінського виробництва, який є досить поширеним інструментом для швидкої та простої оцінки щільності ґрунту в польових умовах [11]. Принцип дії: Wile Soil вимірює опір ґрунту проникненню металевого конуса. Оператор вручну вдавлює щуп приладу в ґрунт, а стрілка на циферблаті показує значення опору.

Переваги механічного Wile Soil

- доступність та низька вартість порівняно з цифровими аналогами.
- простота експлуатації: не потребує спеціальних навичок або навчання.
- оперативність: дозволяє швидко провести вимірювання на місці.

Недоліки механічного Wile Soil:

- відсутність цифрових даних та автоматичної реєстрації: результати необхідно записувати вручну, що підвищує ризик помилок та унеможливорює створення точних цифрових карт ущільнення;
- відсутність GPS-прив'язки: не дозволяє автоматично прив'язувати вимірювання до географічних координат, що обмежує можливості точного землеробства;
- суб'єктивність вимірювання: результат може залежати від сили натиску оператора;
- обмежені можливості аналізу: не надає даних для глибокого аналізу та моделювання.

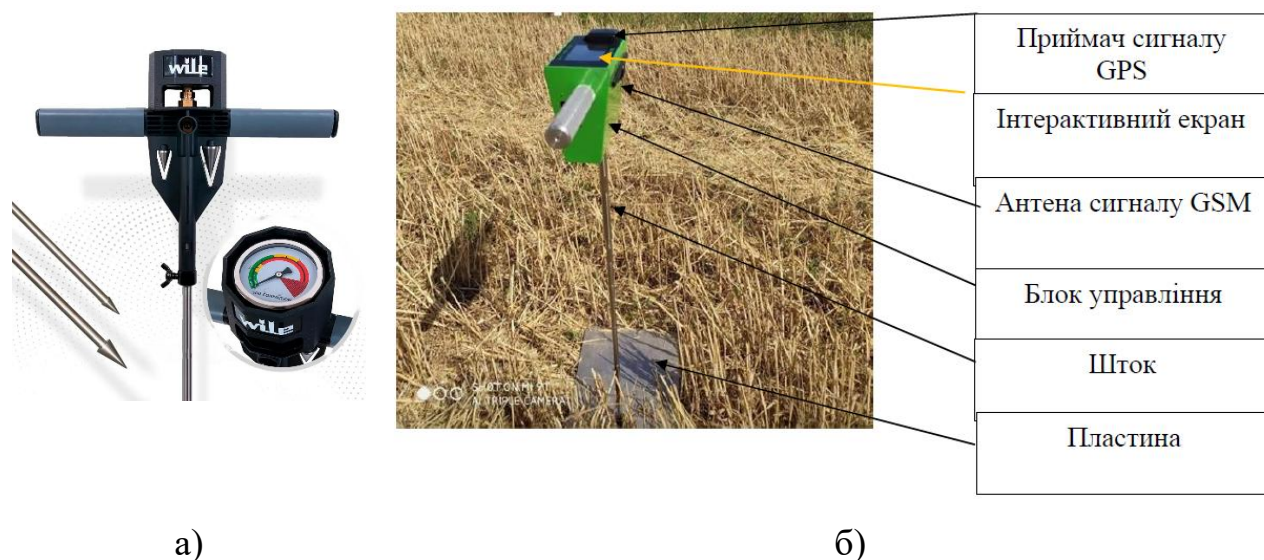


Рисунок 1.7 - Механічний Wile Soil (а) [11 та цифровий (б) пенетрометр S 600 [12]

Цифровий пенетрометр S600 виробництва компанії Скок Агро (див. рис.1.7, б) - це сучасний цифровий пенетрометр українського виробництва (компанія "Скок Агро"), розроблений для інтеграції в системи точного землеробства. Він значно розширює функціонал порівняно з аналоговими моделями. Принцип дії: S600 також вимірює опір ґрунту проникненню щупа, але замість механічного відображення даних, він оснащений електронними датчиками, які фіксують опір з високою точністю на певних глибинах. Ці дані оцифровуються та обробляються в режимі реального часу [12].

Ключові характеристики та особливості:

- Цифрова фіксація даних: вимірювання опору ґрунту реєструються в цифровому форматі (зазвичай у кПа, кг/см² або PSI) з кроком глибини 1 см.
- Максимальна глибина вимірювання: досягає 60 см, що дозволяє виявляти "плужну підшву" та інші ущільнення на значних глибинах.
- Вбудований GPS-модуль: кожне вимірювання автоматично прив'язується до точних географічних координат з похибкою близько ± 2.5 м. Це є ключовою функцією для точного землеробства.
- GSM-модуль: дані вимірювань можуть передаватися на сервер в онлайн-режимі за допомогою мобільного зв'язку, що забезпечує оперативний доступ до інформації з будь-якої точки світу.
- Внутрішня пам'ять: прилад має вбудовану пам'ять, що дозволяє зберігати до 2000 вимірювань автономно, якщо відсутній зв'язок.
- Спеціалізоване програмне забезпечення (ГІС-сайт): компанія "Скок Агро" надає власне програмне забезпечення (веб-платформу), яка дозволяє:
 - Візуалізувати дані на картах полів (інтеграція з Google Maps).
 - Будувати карти ущільнень ґрунту по глибинах, що дозволяє чітко бачити зони з різним ступенем ущільнення.
 - Формувати звіти та аналізувати динаміку змін щільності.
 - Планувати маршрути вимірювань (наприклад, автоматично генерувати точки відбору з заданою дискретністю: 1 вимір на 5, 10, 15 гектарів або довільна сітка).
 - Відстежувати, де, коли і ким було зроблено вимір.
- Надійний корпус: виготовлений зі сталі з порошковим покриттям, а вимірювальний зонд та пластина глибини – з нержавіючої сталі, що забезпечує довговічність в польових умовах.
- Автономна робота: живлення від акумулятора 5600 мАг, що забезпечує 10-14 годин безперервної роботи.

Переваги пенетрометра S600:

- Висока точність та об'єктивність: цифрові дані є більш точними та не залежать від суб'єктивного фактора оператора.

- Автоматична прив'язка до GPS-координат: фундаментальна функція для створення точних карт ущільнення та інтеграції в системи точного землеробства.

- Можливість створення карт ущільнення: дозволяє візуалізувати проблему, виділяти проблемні ділянки та планувати диференційовані заходи ґрунтообробітку.

- Оперативна передача та аналіз даних: завдяки GSM та хмарному програмному забезпеченню, агрономи можуть отримувати та аналізувати дані в реальному часі.

- Оптимізація ресурсів: точне знання про ущільнення дозволяє оптимізувати глибину обробітку ґрунту, знижуючи витрати пального та ресурсів, а також підвищуючи ефективність добрив.

- Контроль якості обробітку: дозволяє перевіряти ефективність проведених заходів по разущільненню.

Недоліки пенетрометра S600:

- Вища вартість порівняно з аналоговими пенетрометрами.
- Залежність від заряду батареї та наявності мобільного зв'язку для онлайн-передачі даних.

- Необхідність використання програмного забезпечення та, можливо, навчання персоналу для ефективного аналізу даних.

Порівняльна таблиця представлена нижче (табл 1.5)

Таблиця 1.5 – Порівняльний аналіз Wile Soil та Скок Агро S600

Характеристика	Wile Soil (аналоговий)	Скок Агро S600 (цифровий)
Тип	Механічний (аналоговий)	Електронний (цифровий)
Збір даних	Вручну, візуально з циферблата	Автоматичний, цифрова фіксація

Одиниця виміру	Кольорові сектори (зелений, жовтий, червоний)	кПа, кг/см ² , Р SI (з числовими значеннями)
Глибина вимірювання	До 70 см (залежить від моделі, відмітки на щупі)	До 60 см з кроком 1 см
GPS-прив'язка	Ні	Так, вбудований GPS-модуль
Передача даних	Ні	Так, GSM-модуль для онлайн-передачі на сервер
Пам'ять	Ні	Вбудована, до 2000 вимірювань
Програмне забезпечення	Ні	Так, власний ГІС-сайт для візуалізації та аналізу карт
Карти ущільнення	Неможливо створити автоматично	Можливість автоматичного створення карт ущільнення
Вартість	Нижча	Вища
Застосування	Швидка експрес-оцінка, точкові вимірювання	Точне землеробство, детальне планування, моніторинг

Отже, Wile Soil є простим та доступним інструментом для базової оцінки щільності ґрунту, тоді як цифровий пенетрометр Скок Агро S600 представляє собою сучасне рішення для інтеграції в цифрові системи контролю щільності ґрунту. S600, завдяки своїй GPS-інтеграції, здатності до онлайн-передачі даних та спеціалізованому програмному забезпеченню, дозволяє не лише виявляти ущільнення, а й створювати детальні карти, що є основою для прийняття обґрунтованих рішень щодо диференційованої ґрунтообробки та оптимізації ґрунтозахисних технологій. Саме такі цифрові системи є ключовим елементом у реалізації концепції точного землеробства.

На основі аналізу та інтерпретації результатів, аналізу літературних джерел [10-14] (див. табл.1.6) побудовано умовну шкалу.

Таблиця 1.6 – Шкала оцінки стану ґрунту за критерієм твердості

Опір проникненню (кПа/МПа)	Стан ґрунту	Вплив на рослини
До ~1 000 кПа (~1,0 МПа)	Дуже пухкий	Ідеальні умови для росту
~1 000–2 000 кПа	Пухкий	Добре проростання
~2 000–3 000 кПа	Помірно ущільнений	Початок пригнічення росту
~3 000–4 000 кПа	Ущільнений	Суттєво впливає на корені
>4 000 кПа	Надмірно ущільнений	Практично непроникний для коренів
>5 000 кПа	Злитий	непроникний для коренів

З таблиці видно, що при твердості > 3000 кПа ґрунт ущільнений і його потрібно розущільнювати за допомогою технологічних операцій.

1.4 Обґрунтування теми дипломної роботи

В умовах інтенсифікації сільськогосподарського виробництва, широкого застосування важкої техніки та глобальних кліматичних змін особливої актуальності набуває проблема ущільнення ґрунту. Ущільнення призводить до зниження родючості, погіршення гідрологічного режиму, аерації, пригнічення росту кореневої системи рослин і, як наслідок, до зменшення урожайності.

Для мінімізації негативних наслідків ущільнення та оптимізації агротехнічних заходів усе більшого значення набуває точний моніторинг фізичного стану ґрунту, особливо його щільності та твердості. Водночас традиційні методи контролю щільності мають низьку продуктивність, суб'єктивні похибки та не дозволяють здійснювати просторовий аналіз.

У цьому контексті впровадження цифрових систем контролю щільності ґрунту - таких як електронний пенетрометр S600 у поєднанні з програмним забезпеченням Skok Agro - створює нові можливості для впровадження ґрунтозахисних технологій обробітку, що базуються на об'єктивних даних. Це дозволяє забезпечити адаптивне та диференційоване управління обробітком,

уникати надмірного ущільнення, зменшити витрати ресурсів та сприяти сталому розвитку агровиробництва.

Мета кваліфікаційної роботи: Розробити та науково обґрунтувати впровадження цифрової системи контролю щільності ґрунту для оптимізації ґрунтозахисних технологій вирощування сільськогосподарських культур.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати загальний стан питання та сучасні методи контролю щільності та твердості ґрунту, їх ефективність і обмеження.
2. Дослідити технічні можливості пенетрометра S600 та функціональність програмного забезпечення Skok Agro.
3. Визначити вплив щільності ґрунту на ріст і розвиток культур у різних зонах ущільнення.
4. Провести польові дослідження для оцінки просторового розподілу щільності ґрунту в умовах господарства.
5. Розробити рекомендації щодо адаптивного обробітку ґрунту на основі цифрових даних.
6. Оцінити ефективність впровадження цифрової системи моніторингу з погляду підвищення продуктивності й зниження деградаційних процесів.

Об'єкт дослідження: фізичний стан ґрунту (щільність, твердість) у системі сучасного сільськогосподарського виробництва та процеси контролю на етапі проектування технології вирощування сільськогосподарських культур.

Предмет дослідження: цифрові технології контролю щільності ґрунту (пенетрометрія) та їх використання для оптимізації ґрунтозахисних технологій при вирощуванні сільськогосподарських культур.

РОЗДІЛ 2 КОМПЛЕКТУВАННЯ МТА З УРАХУВАННЯМ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТІВ

2.1 Розрахунок енергії деформації ґрунту

Надмірне ущільнення ґрунту є серйозною проблемою в сільському господарстві, що призводить до значних втрат пального (від 25% до 40%), як свідчать дослідження [4–8]. Замість того, щоб витратитися на ефективну роботу, корисна енергія машинно-тракторного агрегату (МТА) витрачається на розпушування ґрунту, а рушії, своєю чергою, знову його ущільнюють, деформуючи.

Визначити, як саме рушії трактора впливають на ґрунт, особливо на етапі проектування технологій вирощування, досить складно. Ця складність посилюється, коли один і той же енергетичний засіб використовується з різними сільськогосподарськими машинами (наприклад, культиватором, сівалкою, плугом). Наприклад, практично неможливо точно визначити рівень ущільнення ґрунту трактором John Deere 8335R, який працює з культиватором John Deere 3310, сівалкою John Deere 1895 та плугом John Deere 8310, без проведення постійних вимірювань. Для цього довелося б щоразу використовувати пенетрометр і будувати карту ущільнення, що є вкрай трудомістким процесом. Найбільша проблема полягає в тому, що ці вимірювання лише констатують вже наявний факт ущільнення, а нам потрібні ці дані ще до початку впровадження технології. Таким чином, основна умова проектування не виконується.

Одним із підходів до оцінки умовного ущільнення ґрунту під впливом машинно-тракторного агрегату (МТА) є аналіз енергетичних витрат, необхідних для деформації ґрунту під дією рушіїв. Під час руху трактора по полю частина механічної енергії витрачається на зминання і ущільнення ґрунтового шару. Відповідно, можна зробити припущення: чим більшими є ці енерговитрати, тим вищий рівень ущільнення ґрунту.

Оцінку цієї енергії можна здійснити аналітично на основі розрахунку роботи, що витрачається на утворення колії. Величина цієї роботи ($E_{уц}$, МДж/га) визначається за формулою [16]:

$$E_{уц} = \frac{10 \left[G_m \cdot f_{mp} \cdot \eta_e + G_z \cdot f_z + \sum_{i=1}^k (G_M \cdot f_M \cdot \eta_M) \right]}{B_p}, \quad (2.1)$$

де - $E_{уц}$ - робота (на утворення колії), МДж/га;

$G_{тр}$, G_m , G_z – експлуатаційна вага енергетичної машини, с.-г. машини та зчіпки відповідно (кН);

B_p -ширина захвату (робоча), м;

$f_{тр}$, f_m , f_z - коефіцієнт опору кочення трактора, сільськогосподарської машини та зчіпки відповідно (залежить від їхнього типу, див. табл. 8.3- 8.5 [16]);

η_e - коефіцієнт, що враховує витрати (внутрішні) трактора в ходовій системі (для колісних - $\eta_{вк} = 0,98$; для гусеничних - $\eta_{вг} = 0,90-0,93$);

η_M -кількість причіпних або навісних сільськогосподарських машин в агрегаті;

k – кількість типів с.-г. машин у складі агрегату.

Отримане значення $E_{уц}$ дозволяє оцінити умовну кількість енергії, яку агрегат витрачає на ущільнення ґрунту. Однак цей показник є відносним, і його використання не дає змоги визначити точні просторові характеристики ущільнення на полі, такі як площа ущільнення, глибина проникнення або ступінь його критичності для рослин.

Отже, для більш повного розуміння впливу МТА на ґрунт необхідно поєднувати результати аналітичних розрахунків із даними польових вимірювань фактичного ущільнення. Такий підхід дозволить уточнити моделі взаємодії агрегатів із ґрунтовим середовищем та підвищити точність проектування ґрунтозахисних технологій.

2.2 Зв'язок енергії і площі ущільненого ґрунту рушіями техніки

На ступінь ущільнення ґрунту впливають не лише маса трактора чи СГМ, а і такі фактори, як конструкція та профіль шин, тиск у них, а також робоча ширина захвату машинно-тракторного агрегату. Для подальшого моделювання приймемо такі вихідні припущення:

- тиск у шинах підтримується на рівні, оптимальному для виконання агротехнічних операцій;
- оброблюване поле має площу 100 га із геометричними розмірами 1000×1000 м;
- рух агрегату здійснюється за човниковою схемою.

За наведених умов кількість проходів агрегату можна визначити за формулою:

$$N_x = L_p / B_p, \quad (2.2)$$

де L_p – довжина гону (робоча), м;

B_p – ширина (робоча) захвату агрегату, м.

При човниковому способі обробітку доцільно застосовувати петльові розвороти на кінцях гону. У такому випадку ширина поворотної смуги E має бути кратна ширині захвату агрегату (конструктивній). Для прикладу, при використанні агрегату John Deere 8345 у поєднанні з ЛДГ-20 мінімальна ширина поворотної смуги становить 40 м. Враховуючи розміщення смуг з обох боків поля, робоча довжина гону буде:

$$L_p = 1000 - 2 \cdot 40 = 920 \text{ м}$$

Робоча ширина захвату агрегату обчислюється за формулою:

$$B_p = k \cdot B_k, \quad (2.3)$$

де: k - коефіцієнт перекриття між проходами, який залежить від типу агрегату (наприклад, для культиваторів, луцильників, жаток - 0,95–0,97; для плугів - 1,1);

B_k - конструктивна ширина захвату, м.

Площа ущільнення, створена рушіями трактора, залежить не тільки від геометрії поля та траєкторії руху агрегату, але й від ширини протектора шин. Шини трактора можуть бути змінені залежно від характеру виконуваної технологічної операції. Для ґрунтообробних робіт доцільно використовувати шини типу: задні - 710/75 R42, передні - 600/70 R30. У розрахунках беремо до уваги ширину задніх шин, оскільки на них припадає близько двох третин маси трактора.

Площа ущільнення визначається за формулою:

$$S_y = N_x \cdot 2b_{ш} \cdot L_p, \quad (2.4)$$

де: S_y - площа ущільнення, м²;

b - ширина профілю шини (сліду на полі), м;

N_x - кількість проходів агрегату;

L_p - робоча довжина гону, м.

Для прикладу, при роботі агрегату John Deere 8345 із ЛДГ-20 та конструктивною шириною захвату 20 м, за коефіцієнтом перекриття $k=0,96$ ефективна ширина буде:

$$B_p = 0,96 \cdot 20 = 19,2 \text{ м}$$

Однак, із застосуванням сучасних навігаційних систем типу StarFire 3000/6000, що забезпечують точне ведення агрегату з відхиленням до $\pm 2,5$ см, ефективну ширину можна прийняти рівною конструктивній, тобто $B_p = 20$ м.

Таким чином, кількість проходів по полю шириною 1000 м буде:

$$N_x = B_n / B_p = 1000 / 20 = 50 \text{ проходів}$$

Враховуючи параметри шин (задні 710 мм, тобто $b=0,71$ м), площа ущільнення для 50 проходів становитиме:

$$S_y = 50 \cdot 2 \cdot 0,710 \cdot 920 = 65320,0 \text{ м}^2 = 6,530 \text{ га}$$

Подальші обчислення виконано в програмному середовищі Microsoft Excel. Узагальнені результати подано в таблиці 2.1:

Таблиця 2.1 - Площа ущільнення трактора John Deere 8345 в агрегаті з різними сільськогосподарськими машинами

Трактор	СГМ	Робоча ширина за-хвату V_p , м	Кількість проходів	Ширина сліду $b_{ш}$, м	Довжина гону L_p , м	Площа ущільнення S , га
John Deere 8345	ЛДГ-20	20	50	0,71	920	6,53
	JD726	9,38	111	0,71	920	14,51
	JD1895	11	95	0,71	920	12,37
	JD2210	7,4	141	0,71	920	18,39
	JD3810	2,8	372	0,71	920	48,60

Як видно з таблиці, рівень ущільнення суттєво змінюється залежно від типу сільськогосподарської машини, що входить до складу агрегату. Площа ущільнення може становити від 6,5 % до 48,6 % від загальної площі поля. Найбільше ущільнення (48,6 га) спостерігається при роботі трактора з плугом JD3810.

Графічний аналіз дозволяє виявити майже лінійну залежність між площею ущільнення та обсягом енергії, витраченої на цей процес (рис. 2.1), що свідчить про прямий зв'язок між параметрами агрегату і навантаженням на ґрунт.

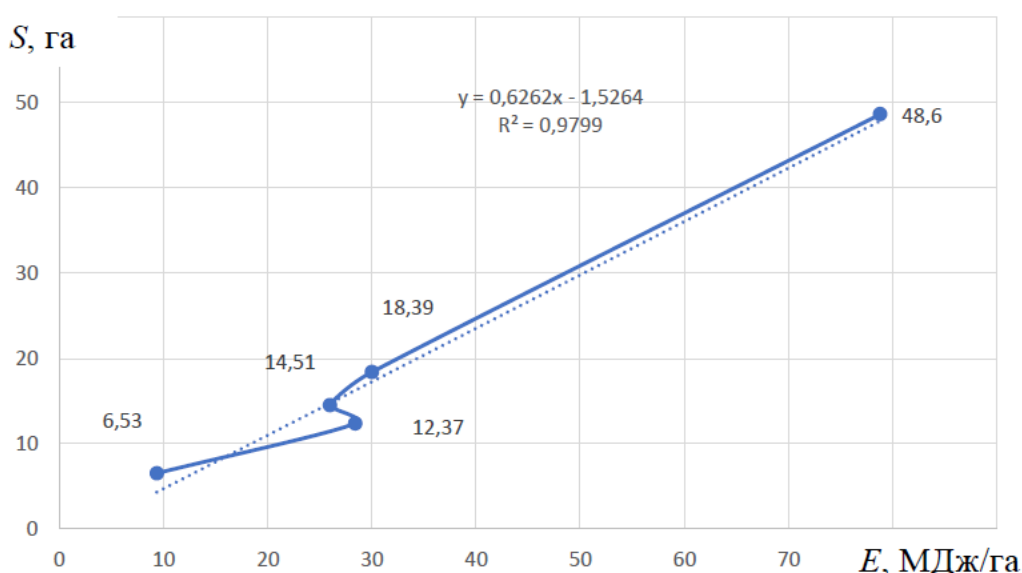


Рисунок 2.1 - Залежність площі ущільнення ґрунту рушіями трактора John Deere 8345 і енергії, затраченої на це ущільнення

Як свідчить проаналізована залежність, у діапазоні значень енерговитрат 25-30 МДж (див. рис. 2.1) спостерігається незначне відхилення від лінійного тренду, що має локально виражений нелінійний характер. Це пояснюється використанням комбінованих агрегатів, які поєднують декілька технологічних операцій в одному проході. Такі агрегати викликають локалізацію значень навколо трендової лінії, що й зумовлює вказане відхилення.

Математична модель залежності ущільненої площі S від енергії ущільнення E для тракторів John Deere 8345 описується рівнянням:

$$S=0,626 \cdot E-1,526$$

Це рівняння відображає кореляцію між параметрами з достовірністю 98 %, що дає змогу застосовувати його для аналітичних розрахунків площі ущільнення та відповідних енерговитрат у складі машинно-тракторного агрегату. Відобразимо таку залежність на графіку, рис. 2.2

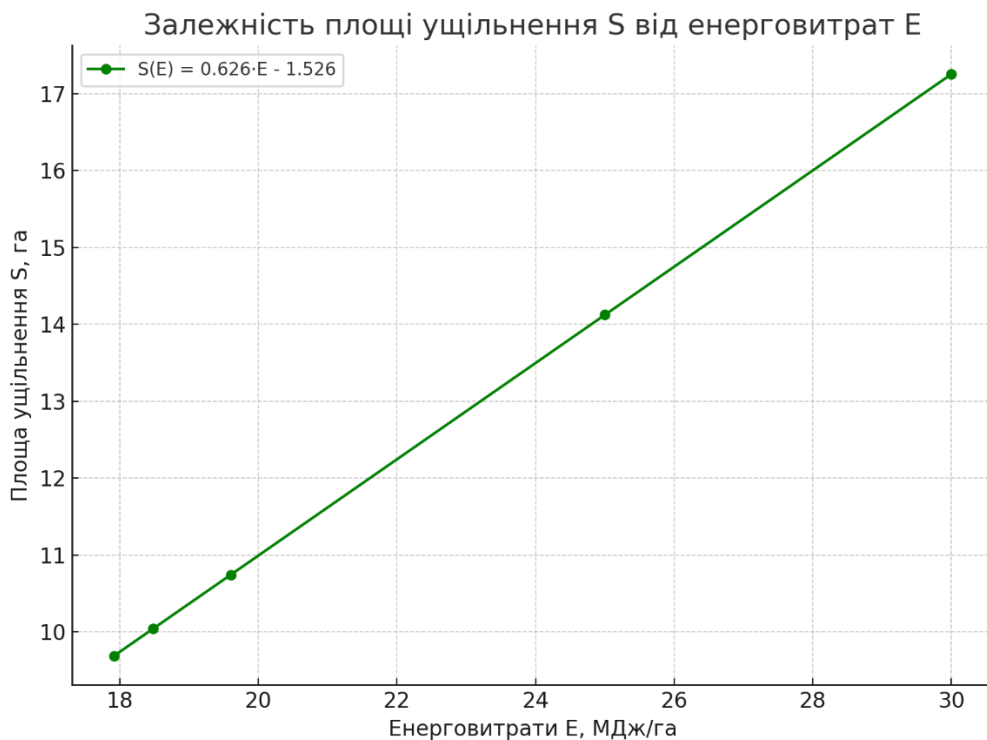


Рисунок 2.2 - Залежність площі ущільнення ґрунту S від енерговитрат E

Як бачимо, зв'язок між показниками має майже лінійний характер, що підтверджує високий рівень кореляції між параметрами.

При використанні зернозбиральних комбайнів ступінь ущільнення значно зростає: гусеничні або колісні рушії можуть спричиняти ущільнення ґрунту на глибину до 80 см [4]. Ба більше, зміни щільності без видимого порушення структури ґрунту можуть простягатися на глибину до 2 метрів.

Згідно з результатами розрахунків параметрів S та E (рис. 2.3), найменші енерговитрати на ущільнення ґрунту спостерігаються при експлуатації таких комбайнів:

КЗС-9-1 «Славутич» (19,6 МДж/га), John Deere 670i (18,48 МДж/га)
та Case IH 2388 (17,92 МДж/га).

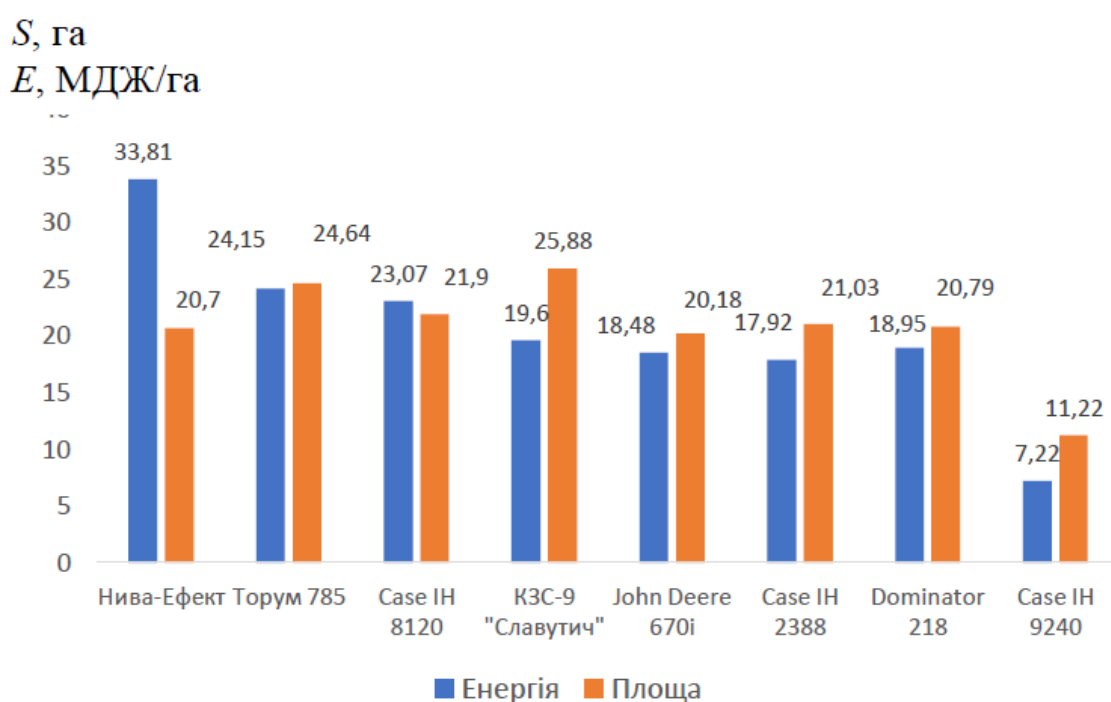


Рисунок 2.3 - Діаграма площі та енергії ущільнення ґрунтів комбайнами (зернозбиральними)

Водночас, найбільшу площу ущільнення створюють комбайни КЗС-9-1 «Славутич» і Торум 785, що свідчить про нижчий рівень їх конструктивної досконалості в аспекті ґрунтозбереження.

З огляду на ці показники, для включення в технологічні карти доцільно розглядати комбайни типу John Deere 670i як найбільш збалансовані за критеріями енергоефективності та впливу на ґрунт. Щодо Case IH 2388, незважаючи на його позитивні технічні характеристики, його використання не

планується, оскільки серійне виробництво цієї моделі припинене, хоча техніка ще присутня на вторинному ринку.

Окрему увагу привертає комбайн Case IH 9240, оснащений жаткою MacDon FD75. Його показники ущільнення (як за енерговитратами, так і за площею) є найнижчими серед усіх розглянутих варіантів. Це обумовлено використанням напівгусеничного ходу та широкозахватної жатки завширшки 13,7 м, що дозволяє суттєво зменшити кількість проходів і навантаження на ґрунт.

2.3 Комплектування машино-тракторного агрегату

З урахуванням методології, описаної раніше, та результатів, отриманих у пункті 2.2, здійснюється підбір агрегатів для виконання основних технологічних операцій, орієнтуючись на критерій мінімізації енергозатрат, пов'язаних з ущільненням ґрунту. Наприклад, обробіток ґрунту є обов'язковим етапом у більшості технологій вирощування сільськогосподарських культур, за винятком системи no-till (нульового обробітку).

Оскільки головною метою є розробка ґрунтозахисної технології з урахуванням зменшення негативного впливу агрегатів на ґрунтове середовище, до розрахункової таблиці 2.2 включено кілька варіантів технічного забезпечення - альтернативні агрегати для виконання одних і тих самих операцій.

Усі вхідні параметри, а також результати розрахунків наведено у таб. 2.2.

Таблиця 2.2 – Енергія ущільнення ґрунту ґрунтообробними МТА

Трактор	G_m , кН	f_{mp}	η_v	СГМ	G_m , кН	f_m	η_m	V_p , м	$E_{ущ}$, МДж/га
John Deere 8345	180	0,08	0,98	John Deere 2260	10,5	0,1	1	10,2	14,86
Case IH STX 535	245	0,08	0,98	Kronos 8	115	0,1	1	7,7	39,88
John Deere 6930	58	0,1	0,98	Kronos 4	36,5	0,1	1	4	23,34
ХТЗ-150К-09	87	0,1	0,98	БД-10	44,5	0,1	1	7,4	17,54
John Deere 8345	180	0,1	0,98	СТЕП АГМ 5,9П	33	0,1	1	5,9	35,49

Як показано у результатах табл. 2.2, найнижчі значення енергії ущільнення ґрунту (E_u) демонструють такі агрегати: John Deere 8345 у поєднанні з культиватором John Deere 2260 -14,86 МДж/га, а також ХТЗ-150К-09 з бороною БД-10 - 17,54 МДж/га. Подальші розрахунки площі ущільнення ґрунту (табл. 2.3) засвідчують, що між показниками $E_{уц}$ та S існує пряма кореляція.

Таблиця 2.3 – Площа ущільнення ґрунту рушіями тракторів у складі МТА на полі площею 100 га

Трактор	СГМ	$B_p, м$	Кількість проходів	Ширина сліду, м	Довжина гону, м	Площа ущільнення $S, га$
John Deere 8345	John Deere 2260	10,2	98	0,71	920	12,81
Case IH STX 535	Kronos 8	7,7	135	0,8		19,91
John Deere 6930	Kronos 4	4	260	0,6		28,75
ХТЗ-150К-09	БД-10	7,4	141	0,65		16,84
John Deere 8345	СТЕП АГМ 5,9П	5,9	177	0,71		23,06

Відтак, під час розроблення технологічних карт доцільно обирати саме ті агрегати, що наведені в табл. 2.2 та 2.3, оскільки вони забезпечують мінімальний негативний вплив на ґрунт.

При формуванні складу посівних агрегатів також варто надавати перевагу тим МТА, які придатні як для мінімального, так і для нульового обробітку ґрунту. До таких належать комплекси, оснащені сівалками прямого посіву або універсальними моделями, зокрема John Deere 1890/1895, Horsch Maestro 36.5 MW та інші.

Результати аналізу енергетичних витрат на ущільнення посівними агрегатами подані в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Енерговитрати на ущільнення ґрунту посівними МТА

Трактор	G_m , кН	f_{mp}	η_e	СГМ	G_m , кН	f_m	η_m	B_p , м	$E_{ущ}$, МДж/га
John Deere 8345	180	0,12	0,98	John Deere 1895	134	0,12	1	12,2	30,53
Case IH MX 340	130	0,12	0,98	Turbosem II 19-60,	119	0,12	1	9,3	31,79
John Deere 6930	58	0,12	0,98	СЗ-4 "НІКА"	20,5	0,12	1	4	23,21
ХТЗ-150К-09	87	0,12	0,98	АПП-6	61	0,12	1	6	29,25
Case IH MX 340	130	0,12	0,98	Horsch Maestro 36,5	152	0,12	1	18	18,64

Згідно з отриманими даними, найнижчі значення $E_{ущ}$ мають агрегати John Deere 6930 з сівалкою СЗ-4 «НІКА» - 23,21 МДж/га та Case IH MX 340 у комплекті з Horsch Maestro 36,5 - 18,64 МДж/га. Обидва варіанти можуть бути ефективно застосовані залежно від розміру господарства, площі та умов експлуатації.

Таблиця 2.5 – Площа ущільнення рушіями тракторів у складі посівних МТА на полі площею 100 га

Трактор	СГМ	B_p , м	Кіл-ть проходів	Ширина сліду, м	Довжина гону, м	Площа ущільнення S , га
John Deere 8345	John Deere 1895	12,2	82	0,71	920	10,71
Case IH MX 340	Turbosem II 19-60,	9,3	112	0,8		14,63
John Deere 6930	СЗ-4 "НІКА"	4	260	0,6	920	28,75
ХТЗ-150К-09	АПП-6	6	174	0,65		20,76
Case IH MX 340	Horsch Maestro 36,5	18	58	0,71		7,56

Аналіз результатів табл. 2.5 свідчить, що найбільш збалансованим за показниками енергії ущільнення та площі ущільненої поверхні є агрегат Case IH

МХ 340 з сівалкою точного висіву Horsch Maestro 36,5 - обидва критерії перебувають у допустимих межах і демонструють високу кореляцію. Водночас, попри низьке енергоспоживання на ущільнення, агрегат John Deere 6930 з сівалкою зерною СЗ-4 «НІКА» формує значну площу ущільнення через малу ширину захвату (4 м), що збільшує кількість проходів.

Однак, мінімальні площі ущільнення демонструють агрегати John Deere 8345 з пневматичною сівалкою John Deere 1895 (10,71 га на 100 га поля) та Case IH МХ 340 з монодисковою сівалкою Turbosem II 19-60 (14,63 га), що робить їх привабливими з позиції ґрунтозбереження.

Таким чином, агрегати, які відповідають критеріям мінімізації ущільнення ґрунту, будемо включати до складу технологічної карти вирощування сільськогосподарських культур у межах ґрунтозахисних систем. Моніторинг фактичного рівня ущільнення ґрунту під час експлуатації МТА плануємо здійснювати за допомогою цифрового твердоміра S600 виробництва компанії Skok Agro.

2.4 Проектування технологій з урахуванням ущільнення ґрунту

Технологічна карта є структурованим документом, що регламентує узгоджене у просторі й часі виконання технологічних операцій із використанням ефективно скомплектованих машинно-тракторних агрегатів. На сучасному етапі розвитку агровиробництва технології вирощування сільськогосподарських культур, на наш погляд, повинні розроблятися з урахуванням принципів сталого розвитку агроecosystem, що розглядаються як складні екотехносистеми [20].

Такі системи мають відповідати критеріям екологічної стабільності, енергетичної ефективності та мінімального антропогенного навантаження на ґрунтові ресурси, як зазначено в дослідженнях [20].

Розроблення технологічних карт виконано відповідно до методичних рекомендацій [21]. Технологічна карта оформлюється у вигляді таблиці в електронному форматі (Microsoft Excel) і представлена в додатках А і Б.

У першій колонці таблиці вказується порядковий номер технологічної операції. Далі, у графах 2-7, подається перелік робіт, агротехнічні вимоги до їх виконання, критерії якості, одиниці вимірювання, обсяг робіт, а також календарні та фактичні строки їх виконання (див. табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Частина технологічної карти (граф 1-7) вирощування озимої пшениці

№ п/п	Операції	Агротех вим	Од. виміру	Обсяг роботи	Строки виконання	
					календ.	трив. днів
1	2	3	4	5	6	7
1	Дискування	12-14см	га	110	20-26.07	7
2	Навантаження добрив	0,1 т/га	т	11	05-25.09	7
3	Транспортування добрив	0,1 т/га	т	11	05-25.09	7
4	Внесення добрив	0,1 т/га	га	110	05-25.09	7
5	Оранка	32 см	га	32	05-25.09	15
6	Ранньовесняне броронування	3 см	га	110	31.03-4.04	3
7	Культивація передпосівна	6-8см	га	110	15-30.04	6

У графах 9–11 вносяться рекомендовані агрегати, які призначені для реалізації відповідних технологічних операцій. Вибір агрегатів здійснюється як на основі попередніх техніко-економічних обґрунтувань, так і з урахуванням наявного машинно-тракторного парку конкретного підприємства (табл. 2.7). Кількість сільськогосподарських машин у складі кожного агрегату зазначається у графі 12.

Таблиця 2.7 - Частина (графи 9-15) технологічної карти вирощування озимої пшениці

Склад агрегату			К-СТЬ С.-Г.М.	Виробіток		
трактор	зчіпка	С.-Г. М.		за год	за зм.	за добу
9	10	11	12	13	14	15
John Deere 8345		ЛДГ-20	1	8,1	56,7	56,7
Maniteu			1	20	140	140
MTЗ-82.1		МВД-900	1	4,8	16,1	33,6
John Deere 8345		ЛДГ-20	1	7,1	49,6	56,7
John Deere 8345		John Deere 3310	1	2,3	16,4	16,4
John Deere 8345		БЗР-24	1	8,7	61	63,2
Maniteu			1	20	140	140

Для обраних агрегатів визначаються змінні норми виробітку, а також витрати пального. Ці показники приймаються на основі довідкових матеріалів [20-21] або даних хронометражних спостережень. Розраховані величини заносяться у відповідні графи карти - 13-15.

Після зведення в таблицю усіх розрахованих даних, визначаються ключові планові показники. Зокрема, агротехнічна тривалість операцій встановлюється згідно з нормативними обмеженнями агрономічного характеру. Наприклад, обробіток стерні не повинен перевищувати семи днів після збирання попередника [20].

Тривалість робочого дня визначається, виходячи з установленого на підприємстві режиму роботи, з урахуванням характеру операцій. Відповідно до Кодексу законів про працю України, стандартна тривалість робочої зміни становить 7 годин. При цьому можливе планування змін у форматі: 1 зміна - 7 год.; 1,5 змінна робота - 10,5 год.; 2-х змінна - 14 год.; 3-х змінна - 21 год. Кількість механізаторів залежить від обраного режиму. Наприклад, у випадку дво- або тризмінної організації роботи, доцільно планувати відповідно два або три оператори на кожний агрегат. У разі виконання операцій з підвищеним ризиком

(наприклад, внесення агрохімікатів), тривалість зміни не має перевищувати 6 годин.

Формула для розрахунку добової тривалості роботи агрегату має вигляд:

$$T_{доб} = T_{зм} \cdot K, \quad (2.5)$$

де: $T_{доб}$ - тривалість роботи МТА за добу, год.; $T_{зм}$ - одна зміна (тривалість), год.; K - коефіцієнт змінності (1,0; 1,5; 2,0; 3,0-кількість проведених змін).

Наприклад, якщо операція лушення стерні виконується агрегатом John Deere 8345 з дисковим лущильником ЛДГ-20 у три зміни, то:

$$T_{доб} = 7 \cdot 3 = 21 \text{ год.}$$

Ці дані фіксуються у графі 8.

На основі обсягу робіт, продуктивності агрегату за добу та встановленої агротехнічної тривалості виконання операції визначається необхідна кількість агрегатів (графа 16) за формулою:

$$n = \frac{Q}{W_{доб} \cdot D_p}, \quad (2.6)$$

де: n - кількість агрегатів; Q - обсяг виконаних робіт, (га) (графа 5); $W_{доб}$ - добовий виробіток агрегату, (га/добу); D_p - тривалість (агротехнічна) операції, (діб).

Таблиця 2.8 - Частина (графи 16-24) технологічної карти вирощування озимої пшениці

Потрібно для виконання роботи			Витрати палива		Затрати праці, люд-год/га		К-сть нормо-змін	Обсяг роботи, у.е.га
агрегат.	тракторис.	доп. прац.	За нормою	На весь обсяг	На одиниц. роботи	На весь обсяг		
16	17	18	19	20	21	22	23	24
1,4	1		2	800	0,09	36	7,05	228,57
1,0	1		0,18	7,2	0,05	2	0,29	
3,0	3		1,1	440	0,63	250	11,90	41,71
1,4	3		2,4	960	0,42	169,4	8,06	228,57
1,0	3		18,5	7400	1,28	512,2	24,39	228,57
2,0	2		0,75	300	0,23	91,8	6,56	228,57

Наприклад, для дискування стерні ячменю агрегатом John Deere 8345 з дисковим луцильником ЛДГ-20, щоб вкластися в агротехнічні терміни, розрахунки можуть вказувати на доцільність залучення одного агрегату.

Витрати пального на одиницю площі (1 га) приймаються за довідниками [20-21], а загальні витрати на весь обсяг обчислюються множенням значень граф 5 і 19.

Затрати праці (графа 21) розраховуються за формулою:

$$Z_n = \frac{m_{mex} + m_{доп}}{W_{год}}, \quad (2.7)$$

де:

Z_n - затрати праці, люд.-год/га(т, м³); m_m - кількість механізаторів (за 1 зміну); $m_{доп}$ - кількість допоміжних працівників (за 1 зміну); $W_{год}$ - годинна продуктивність агрегату, га(т)/год.

Розрахунок кількості нормо-змін та планування механізованих робіт

Кількість нормо-змін для кожної технологічної операції розраховується окремо за відповідною формулою:

$$H_{зм} = \frac{Q}{T_{зм} \cdot W_{год}}, \quad (2.8)$$

де $H_{зм}$ - кількість нормо-зміни

Для прикладу, визначимо нормо-зміни на операцію луцення стерні попередника на площі 100 га із застосуванням агрегату John Deere 8345 + ЛДГ- 20.

$$H_{зм} = \frac{100}{7 \cdot 8,1} = 1,76.$$

Обсяг роботи в умовних еталонних гектарах обчислюється за формулою:

$$Q_{ум.ет.га} = H_{зм} \cdot W_{зм.ет} \quad (2.9)$$

де: $Q_{ум.ет.га}$ - обсяг виконаної роботи (в умовних еталонних га),

Для агрегату John Deere 8345 цей коефіцієнт становить 4 умовно-еталонних трактори. Отже, при обробці 100 га стерні маємо:

$$Q_{ум.ет.га} = 1,76 \cdot 4 \cdot 7 = 49,28. \text{ ум.ет.га}$$

Еталонний виробіток за зміну визначається як добуток коефіцієнта переведення в умовні трактори на тривалість зміни, год. Наприклад, при 7-годинній зміні: Для порівняння, коефіцієнт переведення фізичного трактора в умовно-еталонний трактор становлять:

Т-150 - 1,6; ХТЗ-150К - 1,65; ЮМЗ-6 - 0,6; ДТ-75М - 1,1;
МТЗ-82.1 - 0,73; МТЗ-1025 - 1,3.

Для закордонної техніки ці значення, як правило, вищі:

John Deere 8345 - 4; Case IH STX 535 - 5 умовно-еталонних тракторів.

Подібні розрахунки виконуються для кожної технологічної операції, а їх результати заносяться до таблиці планування механізованих робіт.

Використовуючи вищенаведений алгоритм, було розроблено технологічні карти для вирощування кількох сільськогосподарських культур із застосуванням цифрового контролю ущільнення ґрунту.

Висновки до розділу

У розділі виконано комплексне дослідження процесу комплектування машинно-тракторних агрегатів (МТА) з урахуванням енергетичних витрат на ущільнення ґрунту та площі контакту рушіїв із ґрунтом. Основною метою було обґрунтування вибору технічних засобів, що забезпечують мінімальний вплив на фізичні властивості ґрунту, зокрема на його щільність, у контексті впровадження ґрунтозахисних і сталих агротехнологій.

Також представлено аналітичну залежність площі ущільнення S , що створюється рушіями трактора John Deere 8345, від витраченої на ущільнення енергії E . Отриману залежність описує рівняння: $S=0,626 \cdot E - 1,526$, з коефіцієнтом достовірності 98%.

Обґрунтовано вибір раціональних ґрунтообробних, посівних агрегатів та зернозбиральних комбайнів, які мають мінімальний негативний вплив на ущільнення ґрунту.

Таким чином, розроблена система вибору агрегатів і організації механізованих робіт може бути інтегрована у практику ведення землеробства, орієнтованого на збереження родючості ґрунтів та зменшення антропогенного навантаження на агроєкосистеми.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ІЗ ЦИФРОВИМ КОНТРОЛЕМ ТВЕРДОСТІ ҐРУНТУ

3.1 Програма експерименту

Польовий експеримент був організований таким чином: на дослідне поле виїжджав сільськогосподарський агрегат, після чого проводились заміри твердості ґрунту по слідах руху техніки. Отримані результати співвідносили з розрахунками енергетичних витрат, необхідних для ущільнення ґрунту, а також із фактичними значеннями його щільності.

В якості експериментальної ділянки було обране контрольне поле площею 20 гектарів. Вимірювання проводили як безпосередньо в колії, що залишалася після проходу агрегатів, так і в міжряддях. Порівнюючи показники твердості в різних зонах поля, оцінювали вплив техніки на ущільнення ґрунту.

На основі аналізу зібраних даних виконували коригування структури машинно-тракторного агрегату (МТА) з метою мінімізації енерговитрат на ущільнення. Це дало змогу адаптувати агротехнологію таким чином, щоб знизити рівень деградації ґрунтів, орієнтуючись на показник щільності як один із головних критеріїв.

Для експерименту було обрано зернозбиральний комбайн CLAAS MEGA 218 із жаткою, ширина захвату 6 метрів. У якості контрольної одиниці застосовували зернозбиральний комбайн Case IH 9240, оснащений напівгусеничним ходом, що дозволяло оцінити різницю у впливі різних типів ходових систем на ущільнення ґрунту.

Твердість ґрунту вимірювали як у слідах, що залишалися після проходу техніки, так і в проміжках між ними. Це дозволяло здійснити порівняльну оцінку ступеня ущільнення в різних зонах поля.

На основі аналізу отриманих даних проводилося оптимізування складу машинно-тракторного агрегату з урахуванням мінімальних енергетичних витрат

на ущільнення ґрунту. Завдяки внесеним змінам у технологічний процес вирощування сільськогосподарських культур вдалося сформувати адаптовану систему обробітку з мінімальним впливом на структуру ґрунту за показником його щільності.

3.2 Контроль твердості ґрунту по коліях агрегатів

Дослідження проводилися на полі з низьким вмістом гумусу (до 1,4 %), що свідчить про знижений рівень родючості та виснаженість ґрунту. У межах експерименту двічі проходив зернозбиральний комбайн CLAAS MEGA 218 (рис. 3.1), технічні характеристики якого наведено в таблиці 3.1.

Після проходу техніки твердість ґрунту оцінювали за допомогою пенетрометра S600, проводячи вимірювання по колії. Згідно з розрахунками, поданими в розділі 2, площа ущільнення для стандартного поля площею 100 га при роботі цього комбайна становить 20,79 га, а енергетичні витрати на ущільнення - 18,95 МДж/га.



Рисунок 3.1- Комбайн MEGA 218 на експериментальному полі

Комбайн виконував рух зі швидкістю 7,3 км/год при середній урожайності озимої пшениці 3,2 т/га.

Таблиця 3.1 – Коротка характеристика зернозбирального комбайна MEGA 218 [22]

Параметр	Показник
Ширина захвату, м	6
Номінальна потужність двигуна, кВт	199
Ширина молотарки, мм	1580
Кількість клавiш соломотряса	6
Площа сепарації, м ²	8,67
Площа очистки, м ²	5,65
Місткість бункера, м ³	8
Маса без жатки, кг	11060
Пропускна здатність, кг/с	14
Продуктивність по намолоченому зерну, т/год	18

Дані твердоміра показали, що після проходу комбайна значення твердості ґрунту на глибині 19 см становить 5000 кПа (рис. 3.2), що суттєво перевищує оптимальне значення 3000 кПа, необхідне для збереження сприятливої структури ґрунту.

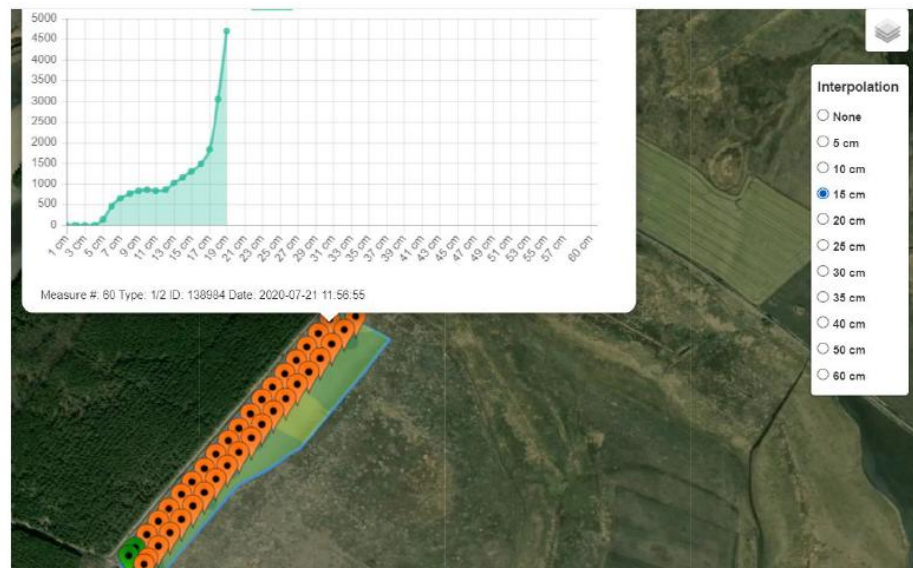


Рисунок 3.2 - Точки замірів та значення твердості ґрунту по сліду комбайна

Аналіз графіку розподілу твердості по глибині (рис. 3.3) вказує на те, що критичний рівень твердості досягається вже на глибині 13-14 см, після чого показник стрімко зростає. Це свідчить про значний ущільнюючий вплив колісної системи комбайна на ґрунт, що створює несприятливі умови для його аерації, водопроникності й подальшого розвитку кореневої системи культур.

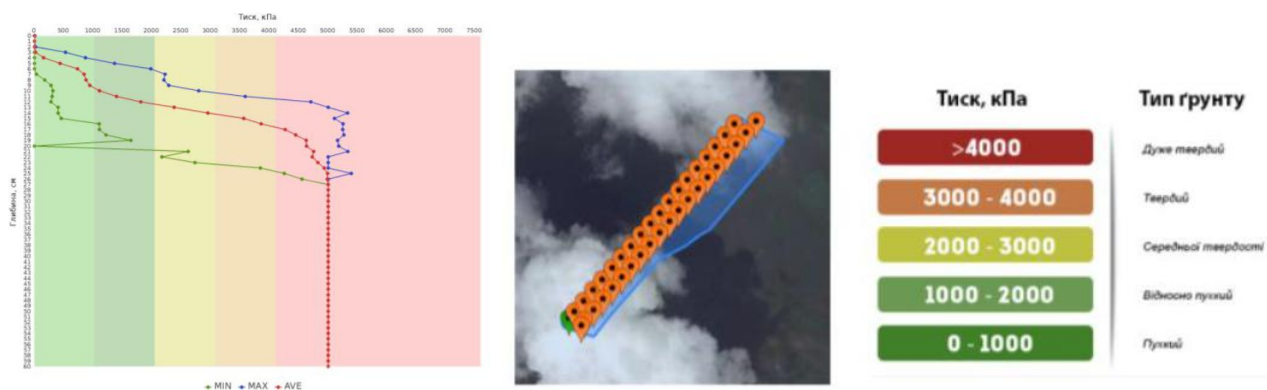


Рисунок 3.3- Статистичний набір експериментальних даних твердості ґрунту

За таких обставин виникає потреба в застосуванні глибоких обробіток - таких як оранка, глибоке рихлення або щільювання - для усунення наслідків ущільнення. Було встановлено тісний взаємозв'язок між трьома основними параметрами: S - площа ущільнення, E - витрачена енергія, T - твердість ґрунту. Цей взаємозв'язок представлено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Взаємозв'язок параметрів: S – E – T для комбайна MEGA 218

S , га	E , МДж/га	T , кПа	h^* , см
20,79	18,95	5000	19

*критична глибина початку зони переущільненого ґрунту

Виходячи з отриманих результатів, можна стверджувати, що комбайн MEGA 218, працюючи по ранніх зернових культурах, спричиняє ущільнення ґрунту до рівня 5000 кПа на площі понад 20 гектарів, із критичною глибиною ущільнення 19 см. З урахуванням наявності альтернативної техніки, доцільним є відмова від його використання в умовах підвищеного ризику деградації ґрунтів.

Такий комбайн, з точки зору збереження структури ґрунту, вважається неефективним.

Для порівняння, експериментальне дослідження комбайна Case IH 9240 (рис. 3.4), оснащеного напівгусеничним рушієм, показало значно кращі результати. Відносна площа ущільнення становила приблизно 11,2 %, що майже вдвічі менше, ніж у MEGA 218. Графік розподілу твердості (рис. 3.5) демонструє зовсім інший характер ущільнення.



Рисунок 3.4- Комбайн Case IH 9240 на експериментальному полі з шириною між суміжними проходами – 13,7 м

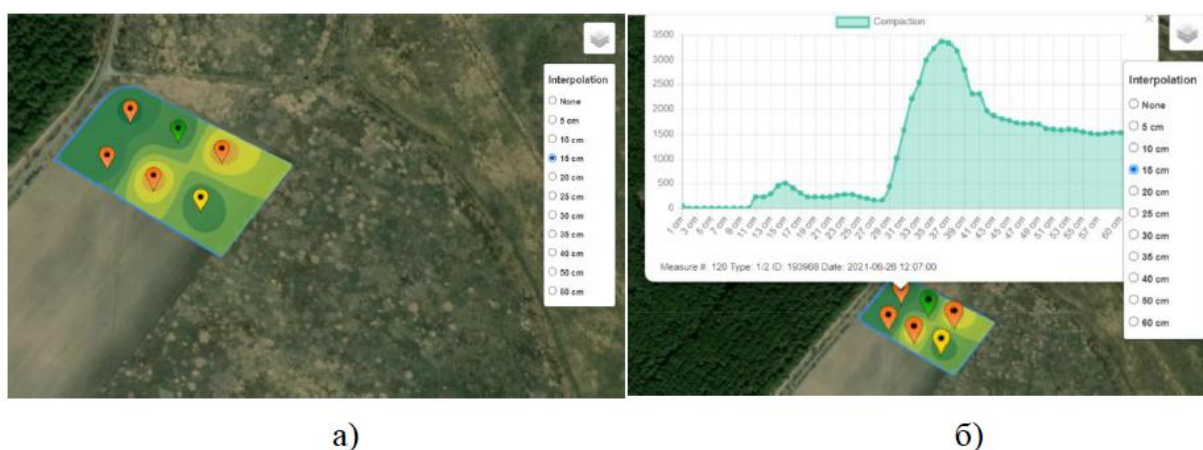


Рисунок 3.5- Ділянка, на якій працював комбайн Case IH 9240 (а) та динаміка твердості в одній з типових точок (б)

Таблиця 3.3 - Взаємозв'язок параметрів: S - E - T для комбайна Case IH 9240

S, га	E, МДж/га	T, кПа	h*, см
11,22	7,22	3368	34

На ділянці, де працював Case IH 9240, твердість ґрунту залишалась у допустимих межах у всьому орному шарі, і лише на глибинах 34-37 см спостерігалось її помітне зростання з подальшим легким спаданням. Така крива є типовою для процесу формування плужної підшви, однак ущільнення, спричинене роботою техніки, тут мінімальне (див. рис.3.5,б).

Таким чином, застосування техніки, як у випадку з Case IH 9240, дозволяє значно знизити негативний вплив на ґрунт, сприяє збереженню його структури та забезпечує більш раціональне використання технічних ресурсів у землеробстві.

3.3 Результати розробки технологій захисту ґрунту з використанням цифрового моніторингу щільності при вирощуванні сільськогосподарських культур

Використовуючи результати розрахунків, виконаних у п. 2.3, алгоритми формування технологічних карт (див. п. 2.4), а також дані, здобуті під час польових випробувань (п. 3.2), було отримано повний обсяг інформації, необхідної для розробки технологій обробітку ґрунту, орієнтованих на його збереження.

3.3.1 Технологія вирощування озимої пшениці

Проектна технологія: було підібрано агрегати, що забезпечують мінімальний рівень ущільнення ґрунту відповідно до заданих критеріїв (рис. 3.6).

Згідно зі спроектованою технологією вирощування озимої пшениці на полі площею 100 га, отримано такі результати (див. Додаток А): загальні енергозатрати на ущільнення ґрунту всіма агрегатами - 15 821 МДж; витрати

дизельного пального - 5799 кг; сумарна площа, на якій відбулося ущільнення - 109,68 га.

Це означає, що техніка залишила сліди на площі, яка на 9,6 % перевищує фактичну площу поля. Для зменшення впливу на ґрунт у технології передбачено використання двох машин на напівгусеничному ході: трактора Case IH MX340 та комбайна Case IH 9240. Їх застосування дозволило істотно знизити рівень ущільнення порівняно з традиційними колісними агрегатами.

Завдяки впровадженню цифрового твердоміра, з'явилася можливість в режимі реального часу відстежувати зміни щільності ґрунту та своєчасно коригувати технологічні операції. З цією метою передбачено контроль твердості під час виконання операцій №5 (визначення глибини оранки) та №21 (оцінка стану ґрунту після збирання врожаю та підготовка до наступного сезону).

№ п/п	Технологічна операція	Агротехнічні вимоги	Об'єкти виміру	Обсяг роботи	Строки виконання			Склад агрегату		
					календ.	трив. днів	Трив. роботи за сесу	трактор	зірка	с-г. м.
1	Навантаження добрив	0,1 м³/га	т	10	10.09.-20.09	3	14	Manitou		
2	Транспортування добрив	0,1 м³/га	т	10	10.09.-20.09	3	14	MT3-80		2ПТС-4
3	Внесення добрив	0,1 м³/га	га	100	10.09.-20.09	3	14	MT3-82.1		МВД-900
4	Луцнення стерні попередника	6-8 см	га	100	10.09-20.09	7	21	John Deere 8345		ЛДГ-20
5	Контроль твердості ґрунту	60 см	га	100	10.09-20.09	1	7	Цифровий пенетрометр S 600		
6	Оранка	32 см	га	100	15.09-25.09	5	14	John Deere 8345		John Deere 3810
7	Передпосівний обробіток	4-6 см	га	100	15.09-25.09	5	21	John Deere 8345		John Deere 2210
8	Навантажування насіння	0,21 м³/га	т	21	15.09-25.09	5	21	Manitou		
9	Навантажування добрив M16P16	0,3 м³/га	т	10	15.09-25.09	5	21	Manitou		
10	Підвезення насіння	0,21 м³/га	т	21	15.09-25.09	5	21	MT3-80		2ПТС-4
11	Підвезення мінеральних добрив	0,3 м³/га	т	10	15.09-25.09	5	21	MT3-80		2ПТС-4
12	Сієба з прикочуванням (напівгусеничний хід)	4-6 см	га	100	15.09-25.09	5	21	Case IH MX 340		Turbosem II 19-60
13	Навантаження добрив	0,1 м³/га	т	10	01.03.-20.03	3	14	Manitou		
14	Транспортування добрив	0,1 м³/га	т	10	01.03.-20.03	3	14	MT3-80		2ПТС-4
15	Внесення добрив по мерзлоталому ґрунту	0,1 м³/га	га	100	01.03.-20.03	3	14	MT3-82.1		МВД-900
16	Транспортування води	0,33 м³/га	т	11	01.-10.05	5	12	DAF		Бочка
17	Внесення гербіцидів	0,33 м³/га	т	11	01.-10.05	5	12	John Deere 4030		
18	Транспортування води	0,33 м³/га	т	11	01.-10.06	5	12	DAF		Бочка
19	Внесення фунгіцидів та інсектицидів	0,33 м³/га	т	100	01.-10.06	5	12	John Deere 4030		
20	Пряме комбайнування	5 м³/га	га	100	07.07-20.07	12	14	Case IH 9240		
21	Контроль твердості ґрунту	60 см	га	100	10.09-20.09	1	7	Цифровий пенетрометр S 600		
22	Протиоложне чергування		га	100	07.07-20.07	12	14	MT3-1025		ЛТД-3
23	Транспортування зерна на тік (розвантаження на краю поля)	6,5 м³/га	т	650	07.07-20.07	12	14	Volvo FN 13		ГБК-8527

Рисунок 3.6 - Фрагмент (скрін) технологічної карти з обґрунтованими МТА

Застосовуючи формулу (1.1), встановлено, що орієнтовна щільність ґрунту після завершення збиральних робіт за новою технологією складе $1,409 \text{ г/см}^3$, що нижче за критичне значення $1,5 \text{ г/см}^3$. Однак для забезпечення

стабільного агрофізичного стану ґрунту рекомендується здійснювати регулярний моніторинг щільності.

Для порівняння, в умовах застосування класичної технології вирощування озимої пшениці на тій самій площі (100 га) було отримано такі показники (див. Додаток Б): енерговитрати на ущільнення ґрунту має значення 16 789 МДж; загальна витрата пального - 5,859 т; на площі, що зазнала ущільнення, 202,01 га. Цей показник означає, що загальна площа слідів техніки перевищує площу поля вдвічі, що є типовим для інтенсивних класичних технологій.

Розрахована теоретична щільність ґрунту після проходу всіх агрегатів становить 1,789 г/см³, що значно перевищує допустиму межу. Згідно з літературними даними [8], урожайність зернових культур у зонах ущільнення може знижуватись до 27 %. Таким чином, очікуване зменшення врожайності може скласти до 4,75 т/га, але, враховуючи, що не вся площа ущільнена рівномірно (деякі агрегати рухаються повторно по одним і тим самим слідам), прогнозована середня врожайність може досягати 6,0 т/га.

Екологічну оцінку ущільнення ґрунту було виконано за співвідношенням:

$$K_{еиц} = \frac{Щ_{ен}}{Щ_{нз}}, \quad (3.1)$$

де $Щ_{ен}$ – значення порогу ущільнення, який дорівнює 1,5 г/см³.

Проектна технологія

$$K_{еиц}^{\text{проект}} = 1,5 / 1,409 = 1,06;$$

Класична технологія

$$K_{еиц} = 1,5 / 1,789 = 0,83.$$

Показник $K_{Еиц} < 1$ вказує на перевищення порогу екологічної безпеки за щільністю ґрунту. Відповідно, класична технологія сприяє деградації ґрунту, тоді як запропонована цифрова система контролю забезпечує кращу збереженість його структури.

Отже, проектна технологія вирощування озимої пшениці з інтегрованим цифровим контролем щільності ґрунту демонструє кращі енергетичні, агротехнічні та екологічні показники, ніж традиційні підходи. Вона дозволяє знизити ступінь ущільнення, підвищити ефективність ресурсного використання та забезпечити довгострокову стійкість ґрунтового середовища.

3.3.2 Технологія вирощування соняшника

У рамках розробки проектної технології вирощування соняшника було включено агрегати, підібрані за критерієм мінімального впливу на ущільнення ґрунту (рис. 3.7).

Результати, отримані в процесі проектування технології для умов поля, умовно приведені до площі 100 га, подано в Додатку В.

№ з/п	Операції	Агротех вим	Об. виміру	Обсяг роботи	Строки виконання		Трив. Роботи за доб	Склад агрегату		
					календ.	трив. днів		трактор	зіплка	с.-в. м.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Контроль твердості ґрунту	60 см	га	100	10.09-20.09	1	7	Цифровий пенетрометр S 600		
2	Дискування	12-14см	га	100	20-26,07	7	10	John Deere 8345	John Deere 2266	
3	Навантаження добрив	0,1 т/га	т	10	05-25,09	7	14	Manitou		
4	Транспортування добрив	0,1 т/га	т	10	05-25,09	7	14	MT3-80	2ПТС-4	
5	Внесення добрив	0,1 т/га	га	100	05-25,09	7	14	MT3-82.1	МВД-900	
6	Вирівнювання і прочісування стерні попередника	3 см	га	100	31.03-4.04	3	14	Case IH MX 340	ЗБР-24	
7	Навант. мін. добр.	0,16т/га	т	10	15-30,04	6	12	Manitou		
8	Перев мін добр	0,16т/га	т	10	15-30,04	6	12	MT3-82.1	2ПТС-4	
9	Сівба	6-8см	га	100	15-30,04	6	12	Case IH MX 340	Horsch Maestro 36,5	
10	Транспортування води	0,33 т/га	т	10	01.-10.05	5	12	ЮМЗ-6	ВР-3М	
11	Внесення гербіцидів	0,33 т/га	т	10	01.-10.05	5	12	John Deere 4030		
12	Боронув до сход	3-4см	га	100	26,04-06,05	3	14	MT3-80	КТС-4	
13	Міжряд обробіток з пригортанням	5-6см	га	100	01-10,06	3	14	MT3-80	КРН-5,6	
14	Збирання врожаю	2,7 т/га	га	100	10-20,09	8	14	Case IH 9240		
15	Контроль твердості ґрунту	60 см	га	100	10.09-20.09	1	7	Цифровий пенетрометр S 600		
16	Перевез зерна	бкм	т	270	10-20,09	8	14	Volvo FN 13		

Рисунок. 3.7- Фрагмент (скрін) технологічної карти вирощування соняшника з обґрунтованими МТА

Основні показники мають такий вигляд: сумарна енергія, витрачена машинно-тракторними агрегатами на ущільнення ґрунту - 7129,43 МДж; загальна витрата пального - 3162,9 кг; площа ущільнення ґрунту (загальна) - 65,38 га.

На рис. 3.7 показано, що у запропонованій схемі передбачено додаткове впровадження операцій із контролю твердості ґрунту. Зокрема: операція №1 - моніторинг твердості відразу після збирання попередника; операція №15 - контроль стану ґрунту на етапі підготовки до сівби.

Порівнюючи дані: проектна (Додаток В) і класична технологія (Додаток Г), встановлено значне зниження ущільнення ґрунту - з 176,08 гектарів до 65,38 гектарів, що стало можливим завдяки використанню широкозахватної техніки та агрегатів із напівгусеничними рушіями. Застосування техніки з кратною шириною захвату додатково мінімізує кількість проходів і, відповідно, негативний вплив на ґрунт.

Важливим елементом проектної технології стало виключення оранки та впровадження системи прямої сівби за допомогою агрегату Case IH MX 340 з сівалкою точного висіву Horsch Maestro 36.5, що сприяє покращенню структури ґрунту та зменшенню ущільнення у верхньому шарі. Застосування високоефективних МТА, таких як Case IH MX 340 з пружинною бороною ЗБР-24, Case IH MX 340 з сівалкою ТВ Horsch Maestro 36.5 та ін., дає підстави очікувати підвищення врожайності до рівня 2,7 тони з гектару.

Висновки до розділу

Експериментальні дані показали, що при використанні зернозбирального комбайна MEGA 218 щільність ґрунту досягала 5000 кПа вже на глибині 19 см, що істотно перевищує допустимий рівень 3000 кПа, необхідний для підтримання оптимальної структури ґрунту. Натомість комбайн Case IH 9240 виявив значно менший ущільнюючий ефект: твердість 3368 кПа фіксувалася лише на глибині 34 см, що свідчить про кращу адаптацію цієї машини до умов ґрунтозахисту.

Окрім цього, завдяки використанню техніки з менш агресивною ходовою частиною, площу ущільнення вдалося знизити з 20,79 відсотків до 11,22 відсотка від площі поля (загальної).

Розроблені технології вирощування озимої пшениці та соняшника із вбудованим цифровим моніторингом щільності продемонстрували суттєве покращення показників збереження ґрунту:

- для пшениці озимої - зниження щільності ґрунту з 1,789 г/см³ до 1,409 г/см³;
- для соняшника - з 1,642 г/см³ до 1,286 г/см³.

Таким чином, запропоновані технічні та організаційно-технологічні рішення щодо контролю та зменшення ущільнення ґрунту є дієвими та можуть бути рекомендовані до впровадження як екологічно орієнтована альтернатива традиційним підходам у землеробстві.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення

У процесі впровадження цифрових систем контролю щільності ґрунту важливу роль відіграє забезпечення безпечних умов праці працівників, які беруть участь у польових роботах. Робота з цифровими приладами, аграрною технікою та пересування по сільськогосподарських угіддях передбачає вплив як фізичних, так і техногенних факторів ризику. З метою зниження рівня професійних захворювань і травматизму необхідно дотримуватись чинних норм охорони праці, передбачених законодавством України, зокрема Законів України «Про охорону праці», «Про охорону навколишнього природного середовища», ДСТУ, ДБН та галузевих стандартів.

4.2 Аналіз небезпечних факторів при проведенні контролю твердості ґрунту

Під час вимірювання твердості ґрунту за допомогою цифрових твердомірів працівник піддається дії низки небезпечних і шкідливих факторів. Серед них – рухомі частини сільськогосподарських машин, нерівна поверхня поля, вплив погодних умов, небезпека ураження електрострумом при використанні електронного обладнання, фізичне перенапруження тощо.

Для якісного аналізу і вжиття відповідних заходів, ці фактори класифіковані та зведені в таблицю:

Таблиця 4.1 - Небезпечні та несприятливі фактори і способи їх усунення або зменшення

№ з/п	Небезпечний або шкідливий фактор	Можливі наслідки	Заходи усунення або зменшення
1	Рух техніки поблизу місця роботи	Травмування, наїзд	Організація роботи поза межами руху техніки, використання сигнального одягу

№ з/п	Небезпечний або шкідливий фактор	Можливі наслідки	Заходи усунення або зменшення
2	Нерівна поверхня поля, яри, вибоїни	Падіння, травмування	Перевірка маршруту руху, обмеження доступу до небезпечних зон
3	Висока температура, сонячне випромінювання	Перегрів, тепловий удар	Робота в ранковій або вечірній години, використання головних уборів, питний режим
4	Ураження електрострумом при використанні обладнання	Електротравми	Використання сертифікованого обладнання, заземлення, перевірка цілісності кабелів
5	Фізичне перенапруження	Втома, зниження продуктивності, травми	Раціональний режим праці й відпочинку, використання допоміжного транспорту
6	Недостатнє освітлення (робота у вечірній час)	Падіння, помилки у вимірюваннях	Застосування переносного освітлення, обмеження роботи в темний час доби

4.3 Організаційні та технічні заходи по створенню безпечних умов праці працівників

Для забезпечення безпечного виконання робіт з контролю щільності ґрунту необхідно впровадити такі організаційні та технічні заходи:

- Проведення інструктажів з охорони праці: первинного, повторного, позапланового та цільового.
- Забезпечення працівників індивідуальними засобами захисту (ІЗЗ): сигнальні жилети, каски, рукавички, захисне взуття.
- Встановлення чітких маршрутів пересування по полю, недопущення перетину з маршрутами аграрної техніки.
- Використання сертифікованих цифрових пристроїв із захистом від вологи та пилу (ІР-рівень не нижче ІР65).
- Створення умов для тимчасового відпочинку працівників під час тривалих робіт.

- Організація медичного супроводу (аптечка, телефонний зв'язок, доступ до транспортного засобу).

4.4 Вимоги безпеки праці при вимірюванні твердості ґрунту

Під час виконання робіт з вимірювання твердості ґрунту працівники повинні дотримуватися таких правил безпеки:

- Перед початком робіт перевірити справність пенетрометра, стан кабелів, батарей, елементів кріплення.

- Роботи повинні виконуватись не ближче ніж за 10 м від працюючої техніки.

- Заборонено працювати під час грози або сильного дощу.

- При проведенні замірів необхідно бути в робочому одязі з елементами світловідбивання.

- Роботи повинні припинятися у разі погіршення стану здоров'я або виявлення небезпечних умов.

- Усі результати фіксуються безпосередньо в електронному пристрої або в спеціальному журналі.

Висновки до розділу

Впровадження цифрових технологій у сільському господарстві потребує ретельного дотримання норм охорони праці. Аналіз небезпечних факторів та відповідні заходи дозволяють мінімізувати ризики для працівників під час контролю твердості ґрунту. Забезпечення безпеки праці є невід'ємною складовою сучасних ґрунтозахисних технологій, що не лише підвищує ефективність польових робіт, а й гарантує збереження життя та здоров'я персоналу.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОБОТИ

5.1 Сутність економічного ефекту

Як було зазначено раніше, ущільнення ґрунту внаслідок проходження техніки по полю призводить до істотного зниження врожайності – на коліях тракторів втрати можуть досягати 27%. Застосування цифрових систем контролю щільності ґрунту дозволяє уникнути надмірного ущільнення як локально, так і в середньому по всій площі поля. Основний економічний ефект запровадження запропонованих технологій полягає у зростанні врожайності сільськогосподарських культур за рахунок поліпшення фізико-механічного стану ґрунту.

Це досягається шляхом:

- правильного підбору машинно-тракторних агрегатів (МТА),
- використання широкозахватної техніки,
- впровадження агрегатів із кратною шириною захвату, що мінімізує кількість зайвих проходів по полю,
- застосування техніки на напівгусеничному ході, що зменшує тиск на ґрунт.

Всі ці заходи в сукупності зі впровадженням цифрових інструментів контролю щільності (твердомір S600, цифрова платформа SkokAgro) сприяють збереженню структури ґрунту, що позитивно впливає на врожайність і рентабельність господарювання.

5.2 Розрахунок економічної ефективності

Для обґрунтування ефективності запропонованих технологій вирощування озимої пшениці та соняшника з елементами цифрового контролю щільності ґрунту проведено розрахунки на площі 100 га, використовуючи вихідні дані з додатків А–Г.

Розрахуємо витрати на паливо

Обсяг витрат палива:

$$Z_{нал} = C_{нал} \cdot Q_{нал}, \quad (5.1)$$

де $C_{нал}$ - ціна 1 кг (якщо літр дизельного палива становить 51,5 грн, що еквівалентно 57,8 грн за 1 кг (з урахуванням щільності 0,83 кг/л).

$Q_{нал}$ – загальна витрата, беремо із Додатків А.Б). тобто

- за ґрунтозахисною технологією маємо 5799 кг або 57,99 кг/га,
- за традиційною технологією маємо 5859 кг або 58,59 кг/га.

Витрати загальні на ПММ:

Ґрунтозахисна технологія: $5799 \times 57,8 = 335\,182,2$ грн,

Класична технологія: $5859 \times 57,8 = 338\,650,2$ грн.

Витрати на посівний матеріал

$$Z_{нас} = C_{нас} \cdot Q_{нас} \quad (5.2)$$

де $C_{нас}$ - вартість 1 т насіння = 9500 грн.;

$Q_{нас}$ - загальна кількість посівного матеріалу для 100 гектарів 21 тонна; норма висіву для двох технологій - 210 кг/га,

Тоді загальні витрати становлять: $21 \times 9500 = 199\,500$ грн (однаково для обох технологій).

Витрати на оплату праці

$$Z_{пл} = C_{пл} \cdot Q_{пл} \quad (5.3)$$

де $C_{пл}$ – оплата 1 люд.год.;

$Q_{пл}$ – загальна затрата праці, з плану мех.роботи.

Трактористи-машиністи: тарифна ставка: 455 грн/зміну (7 годин), отже вартість однієї год. – 65 грн, з урахуванням 20% надбавки за класність: $65 \times 1,2 = 78$ грн/год., з додатковими нарахуваннями (18,0% ПДФО + 5% військовий збір): $78 \times 0,23 = 17,94$ грн, разом за 1 люд.-год: $78 + 17,94 = 95,94$ грн.

Затрати праці (виконання технологічних операцій) знаходимо в Додатках Аі Б:

Ґрунтозахисна технологія маємо 1057,7 люд.-год $\rightarrow Z_{пл} = 1057,7 \times 95,94 = 101475,74$ грн,

Класична технологія – 1284,9 люд.-год → 1284,9 × 95,94 = 123273,31 грн.

Витрати на цифровий контроль щільності ґрунту

Вартість послуги з вимірювання твердості ґрунту = 65 грн/га:

На площі 100 га: 100 × 60 = 6500 грн

Варіант самостійного вимірювання (ціна S600 + обслуговування) для такої площі є економічно недоцільним, тому враховуємо послугу в загальних витратах.

Амортизаційні витрати

Річна норма амортизації: трактори та сільськогосподарські машини – 22%, автотранспорт – 34,4%.

Загальна балансова вартість машинно-тракторного парку визначається на основі технологічних карт. Дані зведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Балансова вартість техніки, задіяної на вирощуванні пшениці озимої за ґрунтозахисною технологією

Назва	Кількість, од.	Вартість оди-ниці, грн.	Приведена вартість до 100 га*, грн.
<i>Трактори:</i>			
МТЗ-80	1	322 000	107 333
МТЗ-82.1	1	389 000	129 666
МТЗ-1025	1	925 000	154 000
John Deere 8345	1	4 175 000	139 166
Case IH MX 340	1	3 950 000	131 666
<i>Комбайни: Case IH 9240</i>			
	1	6 900 000	276 000
<i>Сівалка: Turbosem II 19-60</i>			
	1	2 100 000	42 000

Продовження табл.5.1

<i>Культиватори:</i> JD 2210	1	824 000	54 933
<i>Плуги:</i> JD 3810	1	345 000	172 500
<i>Луцильники:</i>			
ЛТД-3	1	132 000	44 000
ЛДГ-20	1	540 000	54 000
<i>Обприскувачі:</i>			
John Deere 4030	1	7 560 000	75 600
<i>Інше:</i>			
2ПТС-4	1	101 000	33 666
МВД-900	1	18 000	
<i>Навантажувач</i> Manitou	1	215 000	21 500
Всього, грн			1 358 364

*дану графу приводимо з міркувань, що техніка, викладена в технологічній карті застосовується на більших площах.

Із табл. 5.1 маємо загальну приведену (площа вирощування 100 га) вартість техніки, яка дорівнює 1 358 364 гривень.

Тоді амортизаційні витрати:

$$A = 0,22 \times 1358364 = 298840 \text{ грн}$$

Експлуатаційні (загальні) витрати

грунтозахисна технологія (із цифровим контролем щільності ґрунту) обчислимо так:

$$Z = Z_{нал} + Z_{нас} + Z_{пл} + Z_{аморт} + Z_{твердомір} \quad (5.4)$$

де $Z_{нал}$ – витрати на ПММ, грн.;

$Z_{нас}$ – затрати на насіння, грн.;

$Z_{пл}$ - затрати на зарплату, грн.;

$Z_{аморт}$ – амортизаційні витрати, ґрунтозахисної технології, грн.;

$Z_{твердомір}$ – витрати на послуги (контроль пенетрометром), проводяться 2 рази в рік, тоді $Z_{твердомір} = 13000$ грн.

Підставляємо значення, отримані вище, маємо

$Z_{техн\ грунтозахис} = 335182,2 + 199\ 500 + 101475,74 + 298840 + 13000 = 947997,94$ грн.

Зведемо дані для визначення витрат експлуатаційних та амортизації техніки класичної технології у табл.5.2.

Таблиця 5.2 – Балансова вартість техніки, задіяної на вирощуванні пшениці озимої за класичною технологією

Назва	Кількість, од.	Вартість оди- ниці, грн.	Приведена вартість до 100 га*, грн.
<i>Трактори:</i>			
МТЗ-80	1	322 000	107 333
МТЗ-82.1	1	389 000	129 666
МТЗ-1025	1	925 000	154 000
John Deere 6930	1	1 674 000	279 900
Case STX 535	1	6 453 000	215 100
<i>Комбайни:</i>			
Торум 785	1	4 200 000	280 000
<i>Сівалка:</i>			
СЗМ-4 «НІКА»	1	478 000	119500
<i>Культиватори:</i>			
КПС-3	1	80 000	40000
<i>Плуги:</i>			
ПОН-3-35	1	235 000	235000
<i>Луцильники:</i>			
ЛТД-3	1	132 000	44 000
Kronos-8	1	753 000	188 250
<i>Обприскувачі:</i>			
ОП-2000	1	393 000	39 300
АПЖ-12	1	275 000	27 500
ВР-3М	1	12000	1200
<i>Інше:</i>			
2ПТС-4	1	101 000	33 666
МВД-900	1	18 000	1800
<i>Навантажувач</i>			
Manitou	1	215 000	21 500
Всього, грн			1 382 250

*дану графу приводимо з міркувань, що техніка, викладена в технологічній карті застосовується на більших площах

Амортизаційні витрати (класична технологія)

$$A = 0,22 \times 1\,382\,250 = 304\,095 \text{ грн.}$$

Підставляємо значення, отримаємо

$$Z_{\text{техн класич}} = 338\,650,2 + 199\,500 + 123\,273,31 + 304\,095 = 965\,518,51 \text{ грн.}$$

Собівартість 1 т пшениці знайдемо з виразу

$$C = Z / U, \tag{5.5}$$

де U – валовий збір насіння пшениці, т.

Z – загальні витрати на вирощування продукції, грн.

Згідно з розробленою ґрунтозахисною технологією плановий урожай з площі 100 га повинен скласти 650 т.

Отже, собівартість 1 т врожаю буде:

$$C = 947\,997,94 / 650 = 1\,458 \text{ грн/т.}$$

Вартість пшениці 2 класу (рахунок безготівковий) ->8500 грн/т

Тоді

$$B_{np} = C_{\text{пш}} \cdot U \tag{5.6}$$

$$B_{np} = 8500 \times 650 = 5\,525\,000 \text{ грн.}$$

Знайдемо прибуток за ґрунтозахисною технологією

$$\Pi = B_{np} - Z \tag{5.7}$$

$$\Pi = 5\,525\,000 - 947\,997,94 = 4\,577\,002,6 \text{ грн.}$$

З отриманого прибутку необхідно вирахувати (аналогічно розраховані затрати на суму $\approx 900\,000$ грн) для затрат для вирощування врожаю наступного року. Отже, дохід (загальний) буде зменшений, тоді остаточно прибуток буде:

$$\Pi_{\text{ч}} = 4\,577\,002,6 - 900\,000 = 3\,677\,002,6 \text{ грн.}$$

Скорегуємо прибуток, згідно Закону України № 5600, за кожен 1 га ріллі сплачується податок до бюджету 1.2тис грн. (відрахування будуть до бюджету 120 тис. грн.)

Остаточно прибуток (плановий)

$$Пост = 3\,677\,002,6 - 120\,000 = 3\,557\,002,6 \text{ грн.}$$

Розрахуємо рівень рентабельності за ґрунтозахисною технологією по вирощуванню озимої пшениці (з пенетрометром):

$$P = П \times 100 / З = (100 \cdot 3\,557\,002,6) / 9\,479\,97,94 = 375\%.$$

Розрахуємо економічну ефективність за класичною технологією

План на врожай: 100 га-600 тон

Собівартість 1 т врожаю

$$C = 965\,518,51 / 600 = 1\,609,2 \text{ грн/т.}$$

Вартість 2 кл-8500 грн

Вартість пшениці вирощеної

$$Впр = 8500 \times 600 = 5\,100\,000 \text{ грн.}$$

Прибуток за технологією класичною

$$П = 5\,100\,000 - 965\,518,51 = 4\,134\,481,49 \text{ грн}$$

З отриманого прибутку необхідно вирахувати (аналогічно розраховані затрати на суму $\approx 920\,000$ грн) для затрат для вирощування врожаю наступного року. Отже, дохід (загальний) буде зменшений, тоді остаточно прибуток буде

$$Пч = 4\,134\,481,49 - 920\,000 = 3\,214\,481,49 \text{ грн.}$$

За мінусом податку до бюджету 120000 грн

$$Пост = 3\,214\,481,49 - 120\,000 = 3\,094\,481,49 \text{ грн}$$

Рентабельність за класичною технологією

$$P = (100 \cdot 3\,094\,481,49) / 965\,518,51 = 320\%.$$

Отримані значення вносимо в табл.5.

Класична технологія: $5859 \times 57,8 = 338\,650,2$

Таблиця 5.3 – Економічні показники технологій вирощування озимої пшениці

<i>Параметр</i>	<i>Од. вимір у</i>	<i>Технологія</i>	
		<i>Класична</i>	<i>Проектна (грунтозахисна)</i>
Площа	га		
Балансова вартість основних фондів, віднесених до 100 га	грн	100 1 382 250	100 1 358 364
Валовий збір зерна	т	600	650
Експлуатаційні витрати всього	грн	965518,51	947997,94
У тому числі:			
- пальне		338 650,2	3335 182,2
- насіння		199 500	199 500
- амортизація		304 095	298 840
- заробітна плата з нарахуванням		123273,31	101475,74
Виручка від реалізації	грн	5100 000	5525000
Прибуток	грн	3094481,49	3557002,6
Затрати праці	люд-год	1285	1058
Рівень рентабельності	%	320	375

На основі проведених розрахунків можна зробити висновок, що впровадження ґрунтозахисної технології з цифровим контролем ущільнення ґрунту дозволяє значно знизити виробничі витрати та підвищити врожайність. У порівнянні з класичною технологією, новий підхід забезпечує не лише вищу прибутковість, але і суттєво підвищує рівень рентабельності (375% проти 320%).

Крім економічної ефективності, застосування цифрових систем контролю стану ґрунту сприяє збереженню родючості земель, знижує антропогенне навантаження та відповідає принципам сталого агровиробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз сучасного стану землеробства дозволив встановити такі ключові тенденції:

- спостерігається зростання масогабаритних показників енергетичних засобів;

- встановлено пряму залежність між масою тракторів і рівнем тиску колісних рушіїв на ґрунт;

- доведено, що тиск гусеничних тракторів на ґрунт у 4-10 разів нижчий порівняно з колісними аналогами, однак їх широке використання обмежене низкою технічних та економічних чинників;

- чинні технології вирощування сільськогосподарських культур впроваджуються без комплексного врахування ущільнюючого впливу машинно-тракторних агрегатів на ґрунт.

2. Запропоновано математичну модель залежності площі ущільнення ґрунту (S), спричинену рухом трактора John Deere 8345, від обсягу витраченої енергії на ущільнення (E), яку описано рівнянням: $S = 0,626 \cdot E - 1,526$, з достовірністю 98%.

3. Обґрунтовано застосування найбільш доцільних моделей ґрунтообробних, посівних і збиральних агрегатів, що мають знижене навантаження на ґрунт і мінімізують його ущільнення.

4. Результати польових випробувань показали, що твердість ґрунту після проходу комбайна MEGA 218 становить 5000 кПа на глибині 19 см, що значно перевищує допустимі норми (до 3000 кПа). У разі використання Case IH 9240, фіксується твердість 3368 кПа на глибині 34 см, що свідчить про менший ущільнюючий ефект. Крім того, площа ущільнення під дією рушіїв зменшена з 20,79% до 1,22% від загальної площі поля. Запропоновані ґрунтозахисні технології вирощування озимої пшениці та соняшнику із застосуванням цифрового контролю щільності забезпечують зменшення ущільнення: для озимої пшениці – з 1,789 до 1,409 г/см³; для соняшнику – з 1,642 до 1,286 г/см³.

Таким чином, розроблені технічні рішення ефективно сприяють зниженню рівня ущільнення ґрунту та забезпечують його контроль.

5. Виявлено основні небезпечні фактори, що виникають під час роботи з твердоміром у польових умовах. Запропоновано комплекс заходів безпеки, що враховують ці ризики і дозволяють забезпечити належні умови праці.

6. Економічний аналіз довів, що розроблена ґрунтозахисна технологія вирощування сільськогосподарських культур на прикладі озимої пшениці є економічно доцільнішою, оскільки забезпечує вищий рівень рентабельності в порівнянні з традиційними методами.

7. Запровадження цифрового моніторингу щільності ґрунту дозволить покращити як екологічні, так і економічні характеристики сільськогосподарського виробництва, зробивши його більш сталим та ефективним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стан українських ґрунтів стає проблемою екологічної безпеки країни. Superagronom. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://superagronom.com/news/9421-stan-ukrayinskih-gruntiv-staye-problemoyu-ekologichnoyi-bezpeki-krayini>
2. Розвиток рушіїв сільськогосподарської техніки у новітньому періоді. Завод колісних систем Консіма. [Електронне джерело]. Режим доступу: <http://consima.com.ua/2018/11/04/rozvytok-rushiiv-sgt-unp/>
3. Шини та ущільнення ґрунту: у чому проблема і де її рішення? Superagronom. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://superagronom.com/articles/396-shini-ta-uschilnennya-gruntu-u-chomu-problema-i-de-yiyi-rishennya>.
4. Налобіна, О. О., Голотюк, М. В., & Пуць, В. С. (2023). Дослідження впливу ущільнення ґрунту на його основні характеристики. Сільськогосподарські машини, 49, 39- 45. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1017>
5. Rayhan Shaheb, Paula A. Misiewicz, Richard J. Godwin, Edward Dickin, David R. White, Tony E. Grift. The effect of tire inflation pressure and tillage systems on soil properties, growth and yield of maize and soybean in a silty clay loam soil. <http://www.wileyonlinelibrary.com/journal/sum> , <https://doi.org/10.1111/sum.13063>
6. A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production Rayhan Shaheb, Ramarao Venkatesh , Scott A. Shearer. Journal of Biosystems Engineering (2021) 46:417–439 <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
7. А. І. Горбатенко, В. М. Судак, В. І. Чабан. Як уникнути небезпеки переущільнення ґрунту. Журнал “Агроном”, 2023 <https://www.agronom.com.ua/yak-unyknuty-nebezpeky-pereushhilmennya-gruntu/>
8. Мирослава ФУРМАНЕЦЬ, Юрій ФУРМАНЕЦЬ. Вплив щільності ґрунту на урожайність сільськогосподарських культур за різних систем

обробітку. Агробізнес сьогодні. 2023. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/27102-vplyv-shchilnosti-gruntu-na-urozhainist-silskohospodarskykh-kultur-za-riznykh-system-obrobitku.html>

9. Аналіз і захист ґрунту. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://www.vaderstad.com/ua/know-how-agroporady/osnova-agronomii/analiz-i-zahust-grynty>

10. Як правильно визначити щільність ґрунту пенетрометром? [Електронне джерело]. Режим доступу: https://ventalab.ua/vyznachennia-shchilnosti-gruntu-penetrometrom/?utm_source=chatgpt.com

11. Вимірювач щільності ґрунту WILE SOIL (щільном ір ґрунту) [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://shop.gpsgeometer.com/ua/products/vimiryuvach-schilnosti-gruntu-wile-soil-schilnomir-gruntu>

12. Деркач О. Д., Макаренко Д. О., Мельниченко В. І Інтегрування Web та мобільних застосунків при використанні цифрового пенетрометра S600/Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2024». - с.9-17. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik_tez_2024_techenergy1.pdf?utm_source=chatgpt.com

13. Іванишин В. В., Рудь А. В., Грушецький С. М., Корчак М. М./Результати дослідження компактності ґрунтів/ Випуск 2 (47) 2025 Сільськогосподарські науки. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-2.10-c.77-86>

14. Рудь А.В. Результати дослідження щільності ґрунтів. Тенденції та виклики сучасної аграрної науки: теорія і практика : матеріали V Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції, присвяченої 125-річчю кафедри рослинництва НУБІП України (м. Київ, 25–27 жовтня 2023 року). / НУБІП України. Київ, 2023. С. 309–311. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u163/tezy_kiyiv_2023_5.11.pdf

15. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва: навч. посіб. у 2 томах: Т. 1. Сільськогосподарські машини та машиновикористання в рослинництві / А. С. Кобець, Г. В. Теслюк, А. М. Пугач, О. В. Золотовська, Є. І. Лепеть, В. Б. Бойко. Дніпро: ДДАЕУ, 2025. 259 с.
<https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/12109/1/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf>

16. Кобець А.С., Ільченко В.Ю., Бутенко В.Г. та ін. Дипломне проектування з машиновикористання в рослинництві: Навчальний посібник / За ред. А.С. Кобця. – Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2007. – 288 с.

17. ГРУНТИ. Визначення щільності ґрунтів методом заміщення об'єму ДСТУ Б В. В.2.1 – 21:2009. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 12 с

18. Zoltán Forgó, Energy, Elmira Saljnikov , Rade L. Radojević. Ferenc Tolvaly-Roşca, Consumption Evaluation of Active Tillage Machines Using Dynamic Modelling. *Appl. Sci.* 2021, 11(14), 6240; <https://doi.org/10.3390/app11146240>

19. Zoran I. Mileusnić , Soil compaction due to agricultural machinery impact. *Journal of Terramechanics*, Volume 100, April 2022, Pages 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002>

20. Технологічні карти вирощування сільськогосподарських культур: монографія /Л.М. Тіщенко, С.І. Корнієнко, В.А. Дубровін та ін.: за ред. Л.М. Тіщенка /Харк. нац. техн. ун-т с.-г. ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – 273 с

21. Гамаюнова В.В., Дробітько Ю.М. Проектування технологічних процесів у рослинництві. Методичні рекомендації. Миколаївський національний аграрний університет, 2022.-22 с.

22. Комбайн зернозбиральний CLAAS MEGA 202 – 218. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://agrodoctor.ua/uk/content/50-kombajn-zernouborochnyj-claas-mega-202-218>

23. S.K. Patel, Indra Mani, P.K. Sundaram. °Effect of subsoil compaction on rooting behavior and yields of wheat. *Journal of Terramechanics*.Volume 92, December 2020, Pages 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.09.005>

24. Peng Xiong, Zhongbin Zhang, Zichun Guo, Xinhua Peng. Macropores in a compacted soil impact maize growth at the seedling stage: Effects of pore diameter and density. Soil and Tillage Research. Volume 220, June 2022, 105370.<https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105370>

25. Krylach S., Romanchuk K. Methods of crop adaptation to unfavorable agrophysical parameters of the arable soil layer. Scientific Papers. Series A. Agronomy. 2022. Vol. LXV. Issue 1. P. 77–84 [Електронний ресурс]. URL: https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2022/issue_1/Art9.pdf

26. Svitlana KRYLACH, Kateryna. ROMANCHUK METHODS OF CROP ADAPTATION TO UNFAVORABLE AGROPHYSICAL PARAMETERS OF THE ARABLE SOIL LAYER. Scientific Papers. Series A. Agronomy, Vol. LXV, No. 1, 2022. Pp.77-84

27. Павлюк І. Вимоги охорони праці при проведенні посівних робіт [Електронний ресурс] / І. Павлюк // Охорона праці і пожежна безпека. – 57 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://oppb.com.ua/content/vymogyohorony-praci-pry-provedenni-posivnyh-robit/>

28. Петрига О. М., Яворська Т. І., Прус Ю. О. Економіка аграрного підприємства: навч. посібник / за ред. О. М. Петриги, Т. І. Яворської. – Херсон: ХДАУ, 2020. – 352 с.

ДОДАТКИ