

**В. М. Зубко**, проф, д-р техн. наук, **О.В. Тесленко**

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

e-mail: [v.zubko@snau.edu.ua](mailto:v.zubko@snau.edu.ua); [olena.vl.teslenko@gmail.com](mailto:olena.vl.teslenko@gmail.com)

## Залежність питомого опору агромашини від твердості ґрунту

У статті досліджено залежність питомого опору агротехніки від твердості ґрунту, форми робочих органів, рослинних рештків, матеріалу робочих органів. Запропоновано уніфікований метод обґрунтування питомого опору машин з різними робочими органами на основі значення твердості ґрунту з коригувальними коефіцієнтами ( $c, \lambda, z$ ).

За результатами польових дослідів обґрунтовано математичну модель та розроблено програму на Microsoft Excel 2016 прогнозування опорів машинних агрегатів, буксування, продуктивності агрегатів. Розроблена модель забезпечує проводити лабораторних досліджень щодо ефективності комплектування агрегатів за різних умов експлуатації.

**твердість ґрунту, питомий опір ґрунту, робоча швидкість, буксування, рослинні рештки, ширина захвату, питомий опір машин, робочі органи агромашин, продуктивність**

**Постановка проблеми.** З метою раціонального комплектування машинних агрегатів та обґрунтування оптимальних параметрів в межах агротехнічних вимог [1] важливо знати загальний опір робочих машин – надважливий параметр тягових машинних агрегатів. В свою чергу загальний опір машин залежить від їх питомого опору, що, в свою чергу, обґрунтовується питомим опором ґрунту. Питомий опір ґрунту залежить від типу ґрунту (пісок, суглинок, чорнозем), вологості, щільності, задернілості (кількості коріння) і визначається методом зрізання і перевертання перерізу площею  $1 \text{ м}^2$ , що приблизно відповідає роботі 9 корпусного плуга на глибину 0,3 м на швидкості 5 км/год.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У першій половині ХХ ст. та раніше питомий опір ґрунту до обробітку визначали польовими динамометричними методами [2]. Цей показник характеризує зусилля, необхідне для підрізування, перевертання скиби ґрунту та тертя по робочих поверхнях ґрунтообробних знарядь, і виражається в  $\text{кг}/\text{см}^2$  (або  $\text{кПа}$ ). Він залежить від гранулометричного складу, структури, вологості, щільності та інших фізико-механічних властивостей ґрунту [3,4].

Метод полягав у польових випробуваннях з використанням механічних (пружинних) або гідравлічних динамометрів, які встановлювали між трактором (або кінним тягачем у раніших дослідях) і ґрунтообробним знаряддям (плугом). Вимірювали горизонтальну складову тягового зусилля під час стабільної роботи на заданій глибині та ширині захвату. Потім розраховували питомий опір за формулою:

$$k = \frac{P}{a \cdot b}, \text{ кг}/\text{см}^2, \quad (1)$$

де  $k$  – питомий опір ґрунту,  $\text{кг}/\text{см}^2$ ;  $P$  – тягове зусилля,  $\text{кг}$ ;  $a$  – ширина захвату знаряддя,  $\text{см}$ ;  $b$  – глибина обробітку,  $\text{см}$

Додатково фіксували вологість ґрунту (зазвичай 13-18 %), щільність, рельєф та робочу швидкість. Випробування проводили на типових ділянках для різних ґрунтів (підзолисті піски, чорноземи, солонці тощо) з метою нормування роботи тракторів і складання енергетичних балансів агрегатів [2].

Такі випробування проводили регулярно в МТС на тракторах ХТЗ, ЧТЗ, С-60. Отримані значення для плугів марок ДК30П, ТК30П, Ч25П становили 0,31–0,47  $\text{кг}/\text{см}^2$ [2].

Відповідна методика є складною у реалізації, вимагає наявності спеціалізованого обладнання, техніки та затрат часу. Значення питомого опору ґрунту характеризується конкретними умовами роботи: типом ґрунту (пісок, суглинок, чорнозем), вологістю, щільністю, задернілістю (кількість коріння). Задачею було розробка методики, яка знизить затрати часу, зусиль, фінансових затрат, яку можна застосовувати за різних умов і отримувати актуальну інформацію, водночас буде корелювати за показником точності отримання результатів питомого опору ґрунту.

Питомий опір ґрунту – інтегральний показник фізико-механічних властивостей ґрунту, характеризує зусилля, необхідне для деформації та переміщення одиниці площі поперечного перерізу пласта при обробітку ґрунту. Визначення питомого опору ґрунту, занадто складна задача, яка потребує для кожного випадку використання машини з тензометричним обладнанням.

Питомий опір ґрунту відіграє важливу роль у розробці більш ефективних систем обробітку ґрунту шляхом вибору відповідних комбінацій робочих органів агромашин [5]. Наявність даних про вимоги до гакового зусилля трактора для ґрунтообробних машин є важливим фактором при виборі тракторів та ґрунтообробних машин для конкретної сільськогосподарської операції.

Питомий опір агромашин залежить від їх загального опору і ширини захвату і визначається як відношення загального опору машини до ширину захвату. Загальний опір машин визначається шляхом динаметрування.

Як правило, питомий опір машин визначають шляхом визначення їх загального опору з приведенням у подальшому до 1 метру ширини захвату.

З метою підбору тягового класу трактора використовують дані про питомий опір ґрунтообробних машин на конкретних типах ґрунту, щоб визначити необхідну потужність або тягової клас (розмір) трактора та розрахувати вартість та енергоспоживання різних ґрунтообробних знарядь [6].

Наявність даних про питомий опір машин є важливим фактором для обґрунтування ефективності агрегування машинних агрегатів для конкретних агротехнічних робіт. Водночас ефективна експлуатація техніки вимагає актуальних даних щодо наявного питомого опору ґрунту, а експериментальне визначення параметрів для кожного окремого поля є високовартісним процесом, що характеризується значною трудомісткістю та суттєвими часовими витратами.

Відповідно були запропоновані різні моделі визначення опору ґрунту за різних ґрунтових та експлуатаційних умов. Слід зауважити, що на величину питомого опору ґрунту впливають наступні показники: тип ґрунту та його стан, характеристики агротехніки, робоча швидкість та глибина обробітку [5,7,8]. Необхідно враховувати низку інших змінних показників під час аналізу питомого опору знарядь. Деякі з цих додаткових змінних, перераховані Glancey et al. [9], були статичними та динамічними компонентами міцності, коефіцієнтом тертя ґрунт-метал, щільністю ґрунту та геометрією знаряддя. Рядом авторів було виявлено, що зв'язок між тягою ґрунтообробних машин та швидкістю роботи на різних ґрунтах [10,11,12,13,14,15,16, 17]. Неоднозначність характеристик зумовлена інерцією, необхідною для прискорення часток ґрунту, впливом швидкості зсуву на його опір, а також впливом швидкості зсуву на тертя між ґрунтом і робочим органом, параметрами, які варіюються залежно від типу та стану ґрунту [18]. Слід зауважити, що сучасні аналітичні методи прогнозування тягового опору [11,12,13,14] є невідповідними, оскільки вони не адаптовані для складних форм сучасних робочих органів ґрунтообробних машин. Представлені методи прогнозують значення тягового опору лише у момент початку руйнування ґрунту, базуючись на механізмах руйнування, змодельованих на основі емпіричних залежностей, і спираються на теорії класичної механіки, які використовують властивості ґрунту за законом Мора-Кулона для характеристики однорідного та

ізотропного середовища [18].

Питомий опір машин залежить від питомого опору ґрунту, форми робочого органу, глибини обробітку та ширини захвату машини.

В своїх дослідженнях, Wheeler and Godwin, (1996) підтвердили, що інерційні ефекти, які впливають на питомий опір робочого органу (стійки), є незначними при швидкостях нижче  $\sqrt{5gW}$ , і обмеженими до швидкостей  $\sqrt{5g(W + 0,6d)}$ , де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $W$  – ширина робочого органу, м;  $d$  – глибина обробітку, м [19]. Відповідні дослідження підтверджують, що при визначенні питомого опору машини робоча швидкість до 5 км/год має прямий вплив, а за показника вище 5 км/год швидкість вже приймає не лінійний характер.

Саху та Рахеман провели ряд лабораторних експериментів з макетними ґрунтообробними знаряддями (відвал, культиватор та дискова ланка) у піщано-суглинковому ґрунті з вологістю 10-12%. Вони спостерігали, що на питомий опір всіх ґрунтообробних знарядь значно впливали швидкість, глибина, ширина зрізу, вологість ґрунту та індекс Cone Index (CI) (твердість ґрунту), тоді як щільність ґрунту виявилися незначними [6].

За твердженням членів Американського товариства аграрних та біологічних інженерів тягове зусилля – сила, необхідна для переміщення агромашини з урахуванням виконання технологічного процесу у горизонтальному напрямку. Тягове зусилля, необхідне для роботи аграрних машин для поверхневого обробітку ґрунту, які працюють на малих глибинах, є насамперед функцією ширини захвату знаряддя та швидкості його руху. Для ґрунтообробних знарядь, що працюють на великих глибинах, тягове зусилля також залежить від текстури ґрунту, глибини обробітку та геометрії робочого органу [21].

Водночас рівняння [20] прогнозування питомого опору використовується в більшості частин світу, і зареєстрована мінливість для цього рівняння коливається в межах 50%. Ця мінливість занадто велика, щоб використовувати її для вибору відповідної потужності тракторів [26]. Моделі не співпадають з частинами світу. У кожному окремому випадку модель треба уточнювати.

Ґрунти класифікуються як важкі (дрібнозернисті), середні або легкі (грубозернисті). Важкі за механічним складом ґрунти характеризуються високим вмістом глини, середні – це суглинки, а легкі – піщані ґрунти. Типові значення всіх параметрів наведені разом із очікуваним діапазоном відхилень, що виникають через відмінності в конструкції машин, їх налаштуванні, терміні експлуатації та специфічних умовах поля, включаючи вологість ґрунту та наявність рослинних залишків. Цей діапазон вказує на очікувану варіативність середнього тягового опору залежно від стану машини та ґрунту, які не враховані в основній моделі [21].

В роботі Glancey and Upadhyaya, були представлені кілька рівнянь регресії для прогнозування питомого опору будь-якої ґрунтообробної машини відносно питомого опору машини з еталонним ґрунтообробним інструментом у тому ж ґрунті на заданій глибині або швидкості. В своїй роботі (Glancey, 1990 [23]. розробив методику прогнозування тягового опору для знаряддя, використовуючи вимірювання, отримані за допомогою робочого органу ґрунтообробного агрегату. Дослідженням він довів необхідність визначення кількості точок даних (обсягу вибірки), необхідних для отримання репрезентативного значення тягового опору в певних ґрунтових умовах та стану ґрунту. Glancey використав два специфічні типи інструментів як «еталони» для прогнозування тягового опору складніших машин (плугів, чизелів, культиваторів):

– конусний інструмент (Cone-type reference tool): Спеціальний робочий орган, поперечний переріз якого нагадував конусний пенетрометр. Його основна функція – вимірювати динамічний опір ґрунту безпосередньо під час руху;

– стандартний лістер (Lister/Middlebuster): робочий орган для нарізання борозни.

Ці інструменти були оснащені тензометричним обладнанням для фіксації сил у режимі реального часу [23]. Водночас, щоб спрогнозувати питомий опір інших ґрунтообробних машин, потрібна велика кількість експериментів для роботи еталонної ґрунтообробної машини у бажаних ґрунтових умовах.

Водночас на ефективність роботи машинних агрегатів у польових умовах впливають обмежувальні фактори, до яких відносяться робоча швидкість машинного агрегату, буксування, глибина обробітку, наявність рослинних рештків.

Одним з показників, який характеризує ефективність комплектування машинного агрегату, є буксування рушіїв. Буксування – вкрай негативне явище, яке відбувається за рахунок часткового руйнування верхнього шару ґрунту та зсуву опорної поверхні під впливом тягового зусилля. Буксування є одним з ключових факторів, що впливає на енергоефективність та реальну швидкість  $V_p$  у розрахунках тягового опору. В таблиці 1 наведені значення показника буксування для ефективної роботи та збереження структури ґрунту [20, 24].

Таблиця 1 – Показника буксування для ефективної роботи та збереження структури ґрунту

Тип трактора	Оптимальне буксування	Максимально допустиме
Гусеничні трактори	3-5%	до 7%
Колісні (4WD)	8-12%	до 15%
Колісні (2WD)	10-15%	до 18%

Джерело: розроблено на підставі [20, 24]

Якщо буксування нижче норми – трактор перевантажений баластом; якщо вище – втрачається паливо та знищується родючий шар ґрунту.

Першопричиною виникнення явища буксування – є фізичний склад ґрунту та його питомий опір [25]. Як ми бачили у статті Roul et al. [25] та стандартах ASAE [7], буксування  $S$  не виникає саме по собі – воно є функцією від тягового зусилля  $D$ , яке безпосередньо залежить від питомого опору. Якщо питомий опір ґрунту зростає (через вологість чи щільність ґрунту) – це автоматично веде до зростання буксування, поки не буде досягнуто межі зчеплення.

Аналіз публікацій вказує, що фахівці усього світу займаються питаннями обґрунтування питомого опору агромашин. Це напряду впливає на ефективність комплектування машинних агрегатів: забезпечення якості та строків виконання механізованих технологічних операцій; витрати паливо-мастильних матеріалів; забезпечення безвідмовної роботи; прогнозування техніко-економічних показників використання техніки. Розроблюються математичні моделі прогнозування твердості ґрунту, активних систем для визначення його питомого опору та автоматичного корегування глибини або робочої швидкості машинних агрегатів. Водночас слід зауважити, що умови в кожному регіоні різні, відповідно, показники також. Тому емпіричні коефіцієнти часто мають високий ступінь похибки.

**Постановка завдання.** Завданням даного дослідження є обґрунтування залежності питомого опору агромашин від питомого опору ґрунту, типу робочих органів, їх форми, глибини обробітку та робочої швидкості.

**Виклад основного матеріалу.** Питомий опір агромашини залежить від загального опору машини і її ширини захвату. У свою чергу загальний опір машини складається із робочого опору (опору виконання технологічного процесу) та опору перекочування машини.

$$R = R_p + R_f, \text{ кН}, \quad (2)$$

де  $R$  – загальний опір машини, кН;  $R_p$  – робочий опір (опір виконання технологічного процесу), кН;  $R_f$  – опір перекочування машини, кН.

Робочий опір машини залежить від питомого опору ґрунту, його вологості, наявності рослинних решток на поверхні ґрунту, форми робочих органів, глибини обробітку, робочої швидкості машинного агрегату:

$$R_p = k_0^a \cdot b_p \cdot n \cdot a \cdot c \cdot \lambda \cdot z \cdot (1 + t(V_p^2 - V_0^2)), \text{кН}, \quad (3)$$

де  $k_0^a$  – питомий опір ґрунту на глибині обробітку,  $\text{кН/м}^2$ ;  $b_p$  – ширина захвату одного робочого органу, м;  $n$  – кількість робочих органів;  $a$  – глибина обробітку, м;  $c$  – коефіцієнт, який враховує форму робочого органу;  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує матеріал робочого органу;  $z$  – коефіцієнт, який враховує наявність рослинних решток;  $t$  – темп приросту опору від швидкості;  $V_p$  – робоча швидкість машинного агрегату,  $\text{км/год}$ ;  $V_0$  – швидкість машинного агрегату при номінальному значенні питомого опору ґрунту,  $\text{км/год}$ .

Темп приросту опору машин в основному залежить від ширини захвату машини і глибини обробітку ґрунту:

$$t = f(B_m, a), \quad (4)$$

де  $B_m$  – робоча ширина захвату машини, м.

Опір перекочування агромашини обумовлюється його масою та коефіцієнтом опору перекочування:

$$R_f = G_m \cdot g \cdot f, \text{кН}, \quad (5)$$

де  $G_m$  – маса машини, т;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $f$  – коефіцієнт опору. Підставив значення  $R_p$  і  $R_f$  у формулу (2) отримаємо загальний опір машини у розвернутому вигляді:

$$R_p = k_0^a \cdot b_p \cdot n \cdot a \cdot c \cdot \lambda \cdot z \cdot (1 + t(V_p^2 - V_0^2)) + G_m \cdot g \cdot f, \text{кН}. \quad (6)$$

Тоді питомий опір машини у залежності від робочої ширини захвату буде становити:

$$k_m = \frac{k_0^a \cdot b_p \cdot n \cdot a \cdot c \cdot \lambda \cdot z \cdot (1 + t(V_p^2 - V_0^2)) + G_m \cdot g \cdot f}{B_m}, \text{кН/м}, \quad (7)$$

де  $k_m$  – питомий опір машини,  $\text{кН/м}$ .

З метою визначення значення коефіцієнта, який враховує форму робочого органу, тобто форму поперечного перерізу борозенки, яка утворюється після проходження робочого органу, необхідно знати глибину обробітку і його ширину захвату, а також площу цієї борозенки. Тоді відношення площі поперечного перерізу борозенки до площі добутку глибини обробітку на ширину захвату у найширшому місці буде значенням даного коефіцієнта (рис. 1):

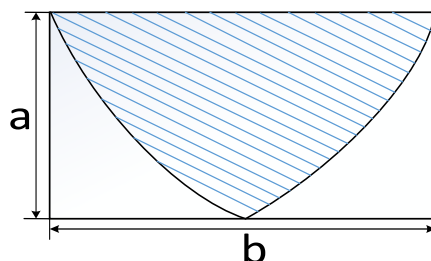


Рисунок 1 – Площа перерізу «борозенки», яку утворює робочий орган агромашини  
Джерело: розроблено автором

$$c = \frac{S_p}{S_k} \leq 1 \quad (8)$$

Площа прямокутника поперечного перерізу ґрунту у якому буде працювати робочий орган відповідного профілю для якого визначено питомий опір ґрунту становить:

$$S_k = a \cdot b, \text{ м}^2, \quad (9)$$

де  $S_k$  – площа перерізу для якого визначено питомий опір ґрунту,  $\text{м}^2$ ;  $a$  – глибину обробітку,  $\text{м}$ ;  $b$  – ширину захвату робочого органу,  $\text{м}$ .

Площа перерізу «борозенки», яку утворює один робочий орган агромашини залежить від форми робочого органу:

$$S_p = a \cdot b \cdot c, \text{ м}^2, \quad (10)$$

де  $S_p$  – площа опору робочого органу машини,  $\text{м}^2$ ;  $c$  – коефіцієнт, який враховує (уточнює) поперечну площу обробітку робочим органом машини.

Площу поперечного перерізу борозенки, яку утворює, наприклад, дисковий робочий орган, можна розрахувати шляхом знаходження площі, обмеженої у даному випадку параболою  $y = 0,31x^2$  і прямою  $y = 10$  (рис. 2) при глибині обробітку 10 см і ширині захвату диска на поверхні ґрунту 11,2 см.

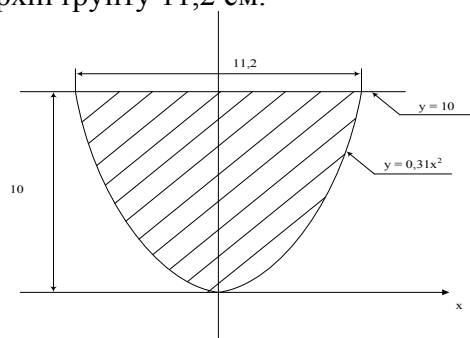


Рисунок 2 – Поперечний переріз площі борозенки, яку утворює диск борони Lemken Rubin 10 при глибині обробітку 10 см. і відповідному куті атаки.

Джерело: розроблено автором

Значення площ для заданих умов становлять:

$$S_k = 11,2 \cdot 10 = 112, \text{ см}^2, \quad (11)$$

$$S_p = \int_{x_1}^{x_2} (10 - (0,31x^2)) dx, \quad (12)$$

Після інтегрування, отримаємо:

$$S_p = 75,3. \quad (13)$$

Тоді, коефіцієнт  $c$  має значення:

$$c = \frac{112}{75,3} = 0,67. \quad (14)$$

Коефіцієнт, який враховує матеріал з якого виготовлений робочий орган машини залежить від коефіцієнта тертя ґрунту по сталі  $k_c$  і коефіцієнта тертя ґрунту по відповідному матеріалі  $k_m$ :

$$\lambda = \frac{k_m}{k_c}. \quad (15)$$

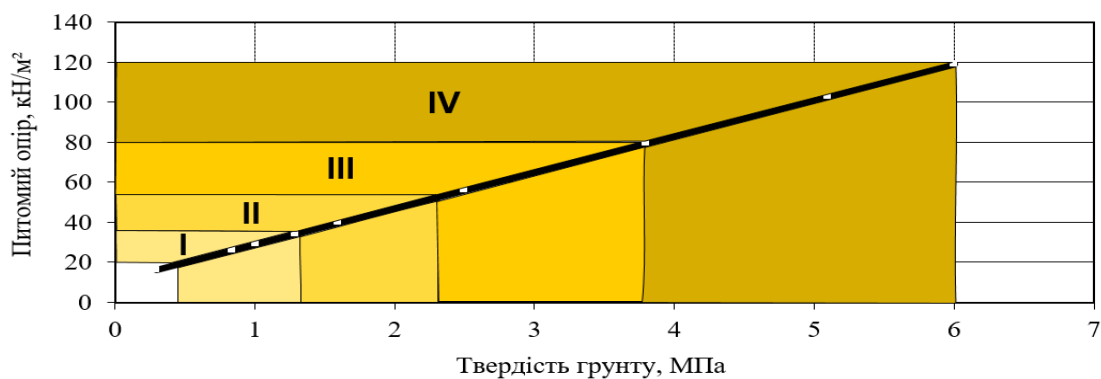
Коефіцієнт, який враховує темп приросту опору зі збільшенням швидкості для дискової борони за результатами досліджень можна описати наступним виразом:

$$t = 0,02 \cdot a + (0,0004 \cdot B_\sigma - 0,0004), \quad (16)$$

де  $B_\sigma$  – робоча ширина захвату борони,  $\text{м}$ .

Визначити питомий опір ґрунту кожного поля (тим більше пошарово) шляхом застосування орного машинного агрегату надзвичайно затратно. Проф. Зубко В. запропонував визначити питомий опір ґрунту через його твердість. Співвідношення твердості ґрунту з його питомим опором наведено у роботі [1].

Залежність значення між твердістю ґрунту та його питомим опором представлена на рисунку 3.



I – легкі ґрунти; II – середні ґрунти; III – важкі ґрунти; IV – дуже важкі ґрунти.

Рисунок 3 – Залежність між твердістю ґрунту та його питомим опором

Джерело: розроблено на підставі [1]

Залежність між твердістю ґрунту та його питомим опором описується формулою прямої:

$$k_0^a = 18 \cdot T + 11, \text{ кН/м}^2, \quad (17)$$

де  $k_0^a$  – питомий опір ґрунту на глибині обробітку,  $\text{кН/м}^2$ ;

$T$  – твердість ґрунту, МПа.

Таким чином питомий опір ґрунту замінено його твердістю. Підставивши у вираз (7) значення питомого опору ґрунту на глибині обробітку, отримуємо:

$$k_M = \frac{(18 \cdot T + 11) b_p \cdot n \cdot a \cdot c \cdot \lambda \cdot z (1 + t(V_p^2 - V_0^2)) + G_M \cdot g \cdot f}{V_M}, \text{ кН/м}. \quad (18)$$

Полюві дослідження ґрунту проводилися на базі Інституту сільського господарства Північного Сходу НААН, оскільки ґрунт дослідних ділянок є репрезентативним і максимально точно відображає середньорегіональні показники. Під час проведення експерименту використовували пенетрометр "ЛАН-М"; вологу ґрунту вимірювали, використовуючи термостатно-ваговий (прямий) метод; щільність ґрунту проводили, використовуючи метод ріжучого кільця.

*Твердість ґрунту та його питомий опір*

На основі проведених досліджень в таблиці 2 представлена характеристики агрофону на одному з полів.

Таблиця 2 – Характеристики агрофону

Шари ґрунту	Вологість, %	Щільність, $\text{г/см}^3$	Твердість, МПа	Питомий опір ґрунту, $\text{кН/м}^2$
0-10 см	23±1,20	1,06±0,02	1,38±0,05	35,84
10-20 см	21±1,40	1,14±0,02	1,51±0,05	38,18
20-30 см	14±1,70	1,26±0,03	2,41±0,05	54,38

Джерело: розроблено автором

Статистичний аналіз експериментальних даних підтверджує їх високу достовірність. Коефіцієнт варіації основних фізико-механічних показників ґрунту не перевищує 7,0%, що вказує на достатню кількість повторень та високу точність вимірювальних приладів.

Крім 3-х шарової твердості ґрунту має шар на поверхні з залишками рослинних рештків, у зв'язку з тим, що деякі машини своїми робочими органами працюють на поверхні ґрунту, треба враховувати і цей поверхневий опір ґрунту.

На основі отриманих даних будемо графік залежності твердості ґрунту та питомого опору ґрунту від глибини (рис. 4 та рис. 5).

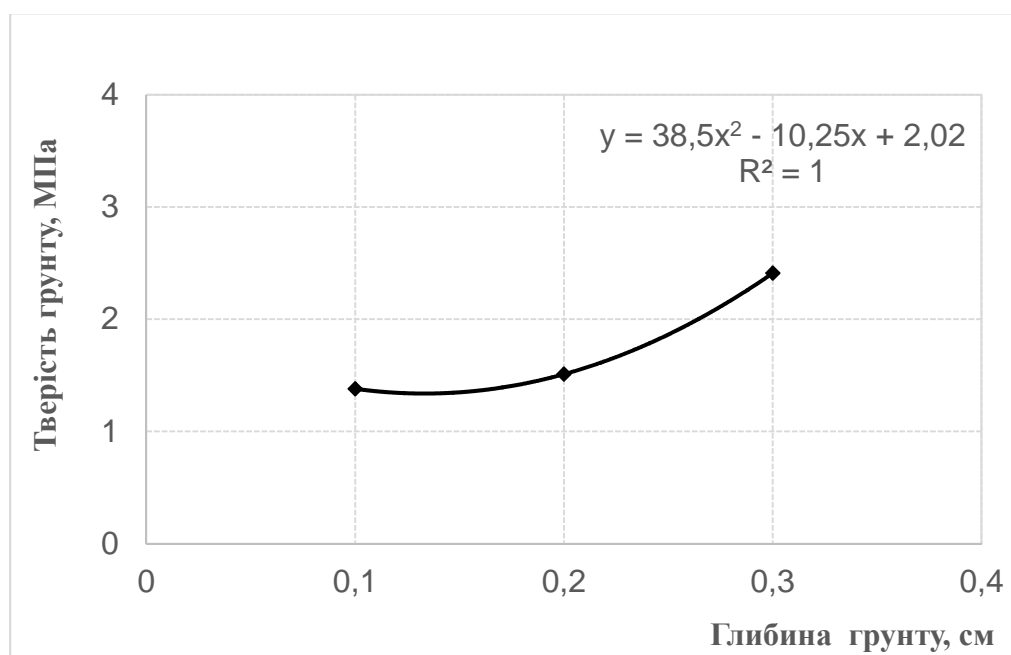


Рисунок 4 – Залежності твердості ґрунту від глибини

Джерело: розроблено автором

Аналізом рисунку 4 встановлено, що зі збільшенням глибини обробітку зростає і твердість ґрунту. Так при зміні глибини обробітку з 10 до 20 см твердість зросла на 9,4%. Водночас при збільшенні глибини з 20 до 30 см твердість зросла на 59,6%. Це пояснюється наявністю у верхніх шарах ґрунту більшої кількості рослинних рештків та інтенсивнішою роботою біоти.

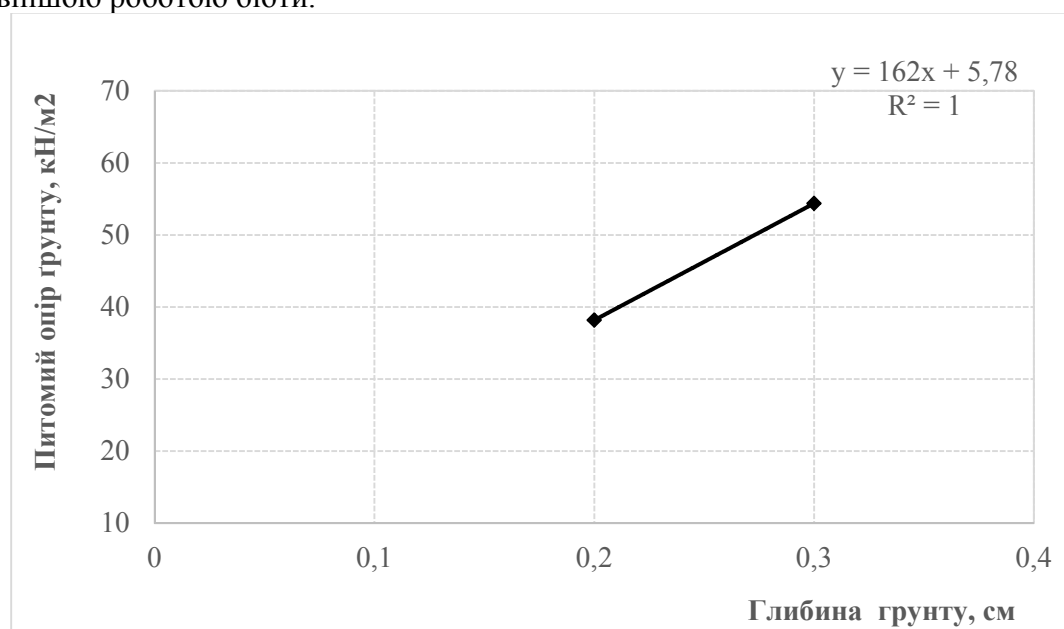


Рисунок 5 – Залежності питомого опору ґрунту від глибини

Джерело: розроблено автором

Аналізом рисунку 5 встановлено, що зі збільшенням глибини обробітку зростає і питомий опір ґрунту. Так при зміні глибини обробітку з 10 до 20 см питомий опір

грунту підвищується на 6,5%. Водночас при збільшенні глибини з 20 до 30 см питомий опір підвищується на 42,4%.

Отримані результати досліджень слід використовувати при використанні методики дослідження комплектування машинних агрегатів та ефективності їх роботи при різній та змінній глибині обробітку.

У зв'язку з тим, що робочі органи машин працюють на будь-якій глибині за цим рисунком можна визначити твердість ґрунту для любого робочого ґрунту. Маючи ці дані за рівнянням  $38.5x^2 - 10.25x + 2.02$  визначаємо питомий опір ґрунту. Таким чином ми визначили питомий опір ґрунту залежно від його твердості і залежності від його глибини обробітку.

Результати проведених досліджень закладено в загальну модель визначення експлуатаційних параметрів роботи машинних агрегатів на різних механізованих технологічних операціях, машин з різними робочими органами і за умови забезпечення якості виконання операції.

З метою практичної реалізації запропонованої методики розроблено алгоритм і створено програму в Microsoft Excel 2016. Робоче вікно представлено на рисунку 6.

Машинний агрегат

Трактор	G, кг	Nп, кВт	q, г/кВт*год												
Claas930 Ахіон	16000	221	200												
Дискова борона	G, кг	B, м	b, м	Δk	ΔV	n	c								
Lemken Rubin	3500	5,5	0,112	0,95	0,0038	48	0,67								
Умови роботи	k, кН/кв. м	a, м	f	μ	i, град	T, МПа	τ								
	83	0,1	0,06	0,77	0	4	0,8								
Результат обчислення	V, км/год	Rf, кН	Ri, кН	Rp, кН	Rarp, кН	Pf, кН	Pi, кН	Fmax, кН	Рд, кН	Рруш, кН	ρ	δ, %	Vр, км/год	Ne, кН	Gmin, кг
Робота	5	2,17	0,00	28,40	30,57	2,17	0,00	122,46	159,12	122,46	0,25	3,12	4,84	45,47	6114,23
Робота	6	2,24	0,00	29,59	31,83	2,10	0,00	118,39	132,60	118,39	0,27	3,21	5,81	56,55	6365,98
Робота	7	2,31	0,00	30,99	33,30	2,03	0,00	114,31	113,66	113,66	0,29	3,32	6,77	68,70	6660,91
Робота	8	2,38	0,00	32,61	35,00	1,95	0,00	110,23	99,45	99,45	0,32	3,48	7,72	82,11	6999,00
Робота	9	2,46	0,00	34,44	36,90	1,88	0,00	106,15	88,40	88,40	0,35	3,69	8,67	96,96	7380,27
Робота	10	2,53	0,00	36,50	39,02	1,81	0,00	102,07	79,56	79,56	0,38	4,00	9,60	113,42	7804,70
Робота	11	2,60	0,00	38,76	41,36	1,74	0,00	98,00	72,33	72,33	0,42	4,45	10,51	131,69	8272,31
Робота	12	2,67	0,00	41,24	43,92	1,66	0,00	93,92	66,30	66,30	0,47	5,13	11,38	151,93	8783,08
Робота	13	2,74	0,00	43,94	46,69	1,59	0,00	89,84	61,20	61,20	0,52	6,20	12,19	174,33	9337,03
Робота	14	2,81	0,00	46,86	49,67	1,52	0,00	85,76	56,83	56,83	0,58	7,99	12,88	199,07	9934,14
Перев.	15	2,89	0,00	49,99	52,87	1,45	0,00	81,68	53,04	53,04	0,65	11,10	13,33	226,33	10574,42
Перев.	16	2,96	0,00	53,33	56,29	1,38	0,00	77,61	49,73	49,73	0,73	16,90	13,30	256,29	11257,87
Перев.	17	3,03	0,00	56,89	59,92	1,30	0,00	73,53	46,80	46,80	0,81	28,51	12,15	289,12	11984,50

Рисунок 6 – Загальний вигляд вікна для розрахунку

Джерело: розроблено автором

*Питомий опір машин та його залежність від твердості ґрунту та робочої швидкості.*

Для визначення питомого опору машин і його залежності від деяких факторів проведемо розрахунок на прикладі машинного агрегату у складі трактора Claas Axion 930 і дискової борони Lemken Rubin 10.

За результатами моделювання отримано дані залежності питомого опору машини у залежності від твердості ґрунту і робочої швидкості (рис. 7).

Встановлено, що для твердості ґрунту 0,75 МПа при зміні інтенсивності швидкості від 5 до 8 км/год – питомий опір зріс на 12,8 %, при зміні швидкості від 8 до 12 км/год – питомий опір збільшився на 20,9 %.

При твердості ґрунту 3 МПа при зміні інтенсивності швидкості від 5 до 8 км/год – питомий опір збільшився на 14,3 %, при зміні швидкості від 8 до 12 км/год – питомий опір зріс на 24,9 %.

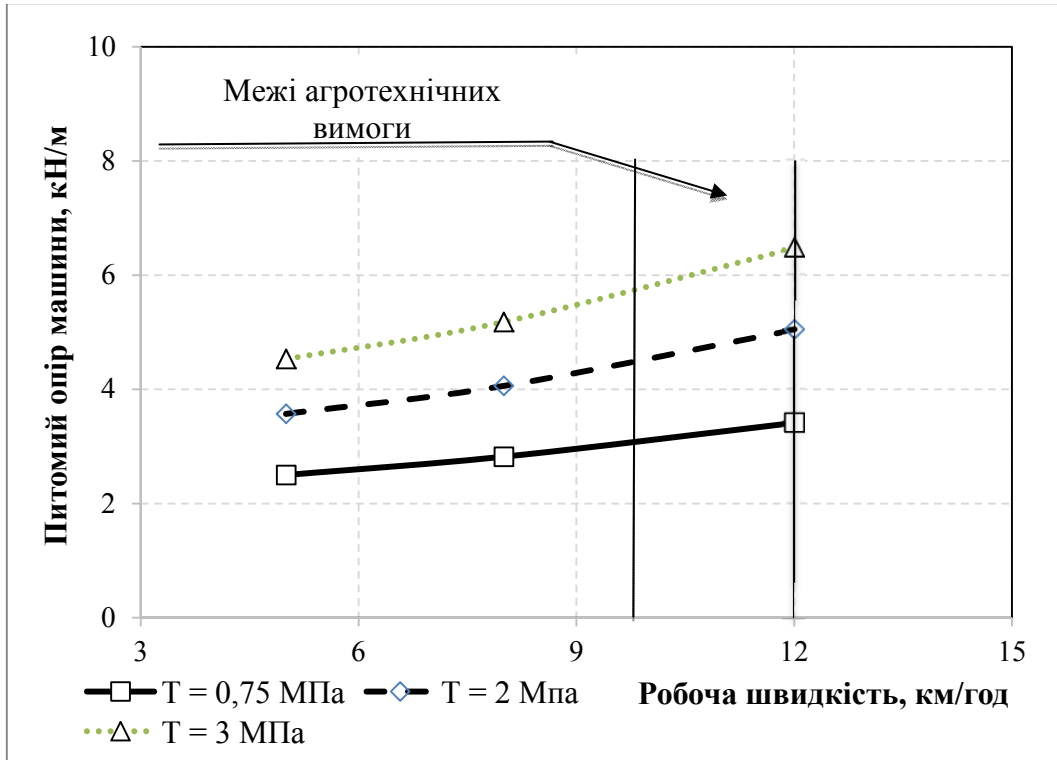


Рисунок 7– Залежність питомого опору машини від швидкості при змінній твердості ґрунту  
Джерело: розроблено автором

Таким чином зі збільшенням твердості ґрунту при збільшенні швидкості інтенсивність зростання питомого опору ґрунту зростає.

За результатами моделювання отримано дані залежності буксування у залежності від робочої швидкості для змінної твердості ґрунту (рис. 8).

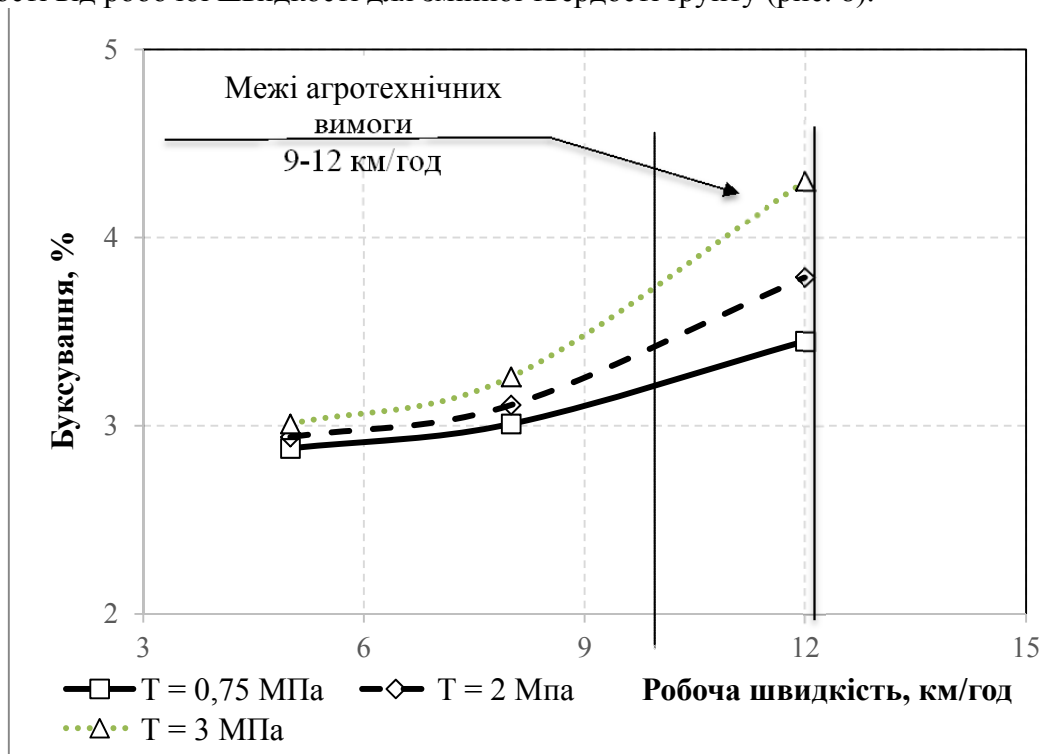


Рисунок 8 – Залежність буксування від швидкості при змінній твердості ґрунту  
Джерело: розроблено автором

Аналізуючи графік залежності буксування від швидкості при твердості ґрунту 0,75 МПа встановлено, що при зміні інтенсивності швидкості від 5 до 8 км/год – буксування зростає на 4,5 %, при зміні швидкості від 8 до 12 км/год – буксування збільшилось на 14,6 %.

При твердості ґрунту 3 МПа при зміні інтенсивність швидкості від 5 до 8 км/год – буксування збільшилось на 8,3 %, при зміні швидкості від 8 до 12 км/год – буксування зросло на 31,9 %.

Таким чином зі збільшенням твердості ґрунту при зростанні швидкості інтенсивність зростання буксування ґрунту зростає.

За результатами розрахунків отримана залежність загального опору машини від робочої швидкості (рис. 9).

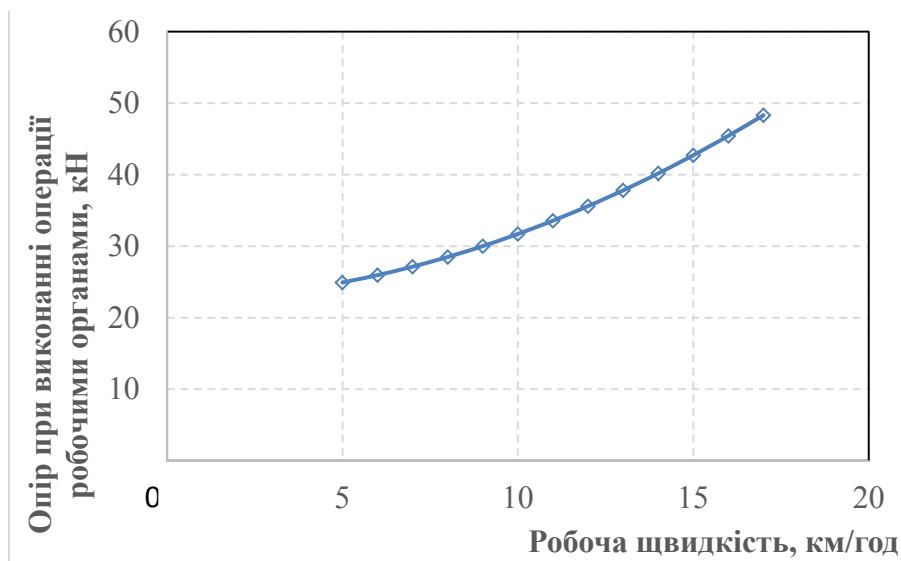


Рисунок 9 – Залежність загального опору від робочої швидкості

Джерело: розроблено автором

Аналіз залежності загального опору машини від робочої швидкості показує, що зі збільшенням швидкості опір зростає. Дану залежність можна описати наступним рівнянням:

$$R_p = 0.08V_p^2 + 0.09V_p + 22.37. \quad (19)$$

На рис. 10 представлено залежність буксування рушіїв енергетичного засобу від робочої швидкості.

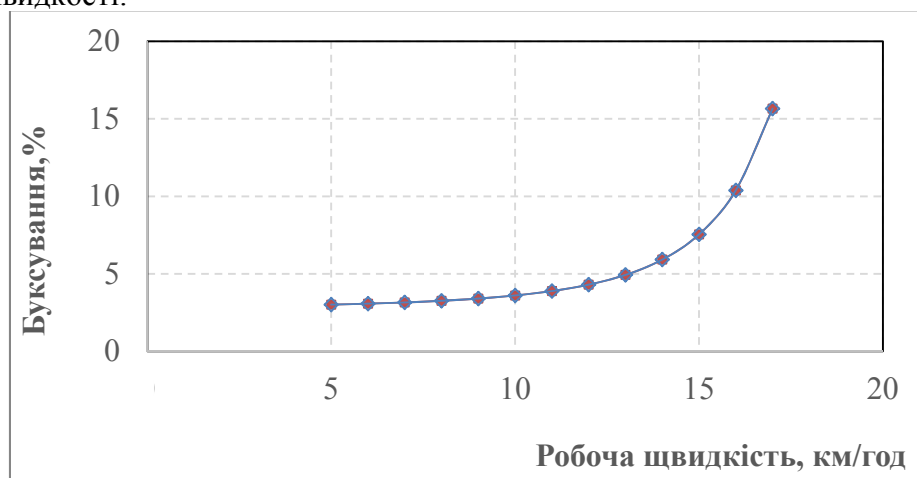


Рисунок 10 – Залежність буксування рушіїв від робочої швидкості

Джерело: розроблено автором

Аналіз залежності робочої швидкості та буксування показує, що зі збільшенням швидкості буксування зростає. Дану залежність можна описати наступним рівнянням:

$$\delta = 0.02 V_p^3 - 0.60 V_p^2 + 5.23 V_p - 11.31. \quad (20)$$

За основу для розрахунку нами взятий трактор Claas Axion 930 та дискова борона Lemken Rubin 10. Основні параметри трактора наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Основні параметри трактора Claas Axion 930

Потужність двигуна	<b>265 кВт</b>	Серія моделі	<b>Axion</b>
Задні шини	<b>710/75R42</b>	Передні шини	<b>600/70 R34</b>
Довжина транспорту	<b>5.744 м</b>	Транспортна висота	<b>2.427 м</b>
Швидкість подорожі	<b>50 км/год</b>	Тип передачі	<b>stfi</b>
Вага	<b>13.5 т</b>	Пристрій управління	<b>-/4ew/dw</b>
Рульове управління	<b>h</b>	Три-бальна категорія	<b>3</b>
Виробник двигуна	<b>FPT</b>	Тип двигуна Cursor	<b>9</b>
Робочий об'єм	<b>8.71 л</b>	Кількість циліндрів	<b>6</b>

Джерело: розроблено на підставі [26]

Основні параметри дискової борони викладено в таблиці 4:

Таблиця 4 – Основні параметри дискової борони Lemken Rubin 10

<b>Rubin 10</b>	<b>TF/600</b>
Кількість дисків	48
Діаметр диска, см	64,5
Відстань між дисками, см	12,5
Робоча ширина, см	600
Вага без котка, кг	5190
Необхідна потужність, кВт	175-300

Джерело: розроблено на підставі [27]

### Висновки.

1. В статті викладено новий метод визначення робочого опору машини, який є альтернативою методу польового динамометрування. Метод включає кілька оновлень, підвищуючи точність отримання теоретичних досліджень, є основою обґрунтування ефективності комплектування машинних агрегатів для виконання робіт у рослинництві.

Метод базується на використанні показника питомого опору ґрунту на глибині обробітку  $k_0^a$ , що дозволяє враховувати умови, в яких працює машина, а не усереднені показники питомого опору, отримані емпіричним шляхом з використання плуга. Проведеними польовими дослідженнями встановлено залежність між твердістю та питомим опором ґрунту в різних шарах ґрунту. Тим самим маючи значення показника твердості ґрунту можна визначити питомий опір ґрунту та глибину обробітку.

2. У новій методиці запропоновано коефіцієнт, який враховує форму робочого органу, тобто форму поперечного перерізу борозенки, яка утворюється після проходження робочого органу. Так, наприклад, для кута атаки диска борони Lemken Rubin 10  $10$  град  $c = 0,67$ .

Даний коефіцієнт показує, яка частина ґрунту створює опір машини з урахуванням форми робочого органу та глибини обробітку. Отриманий результат показує реальний опір робочих органів машини, тим самим визначається значення опору на всю робочу ширину машини з урахуванням реальних виробничих умов.

3. При обґрунтуванні робочого опору машини запроваджено коефіцієнт  $z$ , який враховує наявність рослинних решток. Саме наявність рослинних рештків має вплив на

робочий опір машини та якість виконання технологічного процесу, особливо на малих глибинах обробітку.

4. На підставі отриманих результатів розроблено алгоритм і створено програму в Microsoft Excel 2016 обґрунтування: робочої швидкості, опору агрегату, сили зчеплення по масі, сили зчеплення по потужності, буксування і продуктивності роботи машинного агрегату.

## Список літератури

1. Зубко В. М. Концепція забезпечення якості механізованих агротехнологій : дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Київ, 2021, 393 с..
2. За механізацію сільського господарства : зб. матеріалів Наркомзему УРСР та УНДІМ. Київ : Держ. вид-во колгосп. і радгосп. літ-ри УРСР, 1937, 112 с. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/%D0%97%D0%B0\\_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8E\\_%D1%81%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE\\_%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0.1937.pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/%D0%97%D0%B0_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8E_%D1%81%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0.1937.pdf).
3. Забродоцька Л. Ю. Основи агрономії : навч. посіб. Луцьк : ЛНТУ, 2021, 200 с. URL: <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%20%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%97.pdf>.
4. Качинський М. А. Фізика ґрунту : у 2 ч. К. : Мрія, 1996. URL: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/FIZYKA-GRUNTIV-laboratoryy-praktykum.pdf>  
[https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib\\_upload/%D0%97%D1%96%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA%20%D0%9C.%D0%86/other/lekcziya\\_11\\_fizichni\\_vlastivosti\\_gruntiv.pdf](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%97%D1%96%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA%20%D0%9C.%D0%86/other/lekcziya_11_fizichni_vlastivosti_gruntiv.pdf)
5. A I-Janobi A. A., Al-Suhaibani S. A. Draft of primary tillage implements in sandy loam soil. Applied Engineering in Agriculture. 1998. Vol. 14, no. 4. P. 343–348..
6. Sahu R. K., Raheman H. Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. Biosystems Engineering. 2006. Vol. 94, no. 2. P. 275–284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.01.015>.
7. ASAE Standard (2003). ASAE D497.4. Agricultural Machinery Management Data. ASAE, St. Joseph, MI, USA
8. Grisso R. D., Yasin M., Kocher M. F. Tillage implement forces operating in silty clay loam. Transactions of the ASAE. 1996. Vol. 39, no. 6. P. 1977–1982.
9. Glancey J L; Upadhyaya S K; Chancellor W J; Rumsey J W. An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics. Soil and Tillage Research, 14, 1989, 1–24.
10. Gupta P D; Gupta C P; Pandey K P. An analytical model for predicting draught forces on convex-type cutting blades. Soil and Tillage Research, 14, 1989. P. 131–144.
11. Swick W. C., Perumpral J. V. A model for predicting soil-tool interaction . *Journal of Terramechanics*. 1988. Vol. 25. P. 43–56
12. McKyes E. Soil cutting and tillage. Amsterdam ; New York : Elsevier, 1985. 218 p.
13. Godwin R. J., Spoor G., Soomro M. S. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbances . *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1984. Vol. 30. P. 47–56.
14. Godwin R. J., Spoor G. Soil failure with narrow tines . *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1977. Vol. 22. P. 213–228.
15. Luth H. J., Wismer R. D. Performance of plane soil cutting blades in sand // Transactions of the ASAE. 1971. Vol. 14, No. 2. P. 255–259, 262.
16. Siemens J. C., Weber J. A., Thornburn T. H. Mechanics of soil as influenced by model tillage tools // Transactions of the ASAE. 1965. Vol. 8, No. 1. P. 1–7
17. Rowe R. J., Barnes K. K. Influence of speed on elements of draft of a tillage tool // Transactions of the ASAE. 1961. Vol. 4, No. 1. P. 55–57.
18. Glancey J. L., Upadhyaya S. K. An improved technique for agricultural implement draught analysis // Soil and Tillage Research. 1995. Vol. 35. P. 175–182.
19. Wheeler P. N., Godwin R. J. Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h // Journal of Agricultural Engineering Research. 1996. Vol. 63, No. 3. P. 243–250
20. Bulgakov, V.; Aboltins, A.; Beloev, H.; Nadykto, V.; Kyurchev, V.; Adamchuk, V.; Kaminskiy, V. Maximum Admissible Slip of Tractor Wheels without Disturbing the Soil Structure. Appl. Sci. 2021, 11, 6893. doi.org/10.3390/app11156893
21. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Agricultural Machinery Management Data. Standard ASAE D497.7 MAR2011. St. Joseph, MI: ASABE; 2011
22. Glancey J. L. Prediction of tillage implement draft with a reference tillage tool : Unpublished Ph.D. Thesis.

- Davis : University of California, Agricultural Engineering Department, 1990.
23. A. J. Pradoa; F. A. Auat Cheein; S. Blazicb; M. Torres-Torriti. Probabilistic self-tuning approaches for enhancing performance of autonomous vehicles in changing terrains. *Journal of Terramechanics* 78, 2018 39-51. doi.org/10.1016/j.jterra.2018.04.001
  24. Оптимізація комплексів машин і структури машинного парку та планування технічного сервісу : навчальний посібник / І. І. Мельник, В. Д. Гречкосій, В. В. Марченко та ін.]. К. : ВВІЦ НАУ, 2004. 151с.
  25. .K. Roul; H. Raheman; M.S. Pansare; R. Machavaram. Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network. *Biosystems Engineering* 104 (2009) 476-485. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.09.004
  26. Claas Axion 950-920. URL: <https://ats.in.ua/products/claas-axion-950-920/93> (дата звернення: 28.02.2026).
  27. Борона дискова коротка Rubin 10 . ЛЕМКЕН Україна. URL: [http://lemken.com.ua/ua/harrow\\_rubin\\_10](http://lemken.com.ua/ua/harrow_rubin_10) (дата звернення: 28.02.2026).

## References

1. Zubko, V. M. (2021). *Kontseptsiiia zabezpechennia yakosti mekhanizovanykh ahrotekhnolohii* [Concept of quality assurance of mechanized agricultural technologies] [Doctoral dissertation, Kyiv]. [in Ukrainian]
2. Za mekhanizatsiiu silskoho hospodarstva: zb. materialiv Narkomzemu URSR ta UNDIM. (1937). Derzh. vyd-vo kolhosp. i radhosp. lit-ry URSR. URL:[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/%D0%97%D0%B0\\_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8E\\_%D1%81%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE\\_%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0.\\_1937.pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/%D0%97%D0%B0_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8E_%D1%81%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0._1937.pdf) [in Ukrainian]
3. Zabrodotska, L. Yu. (2021). *Osnovy ahronomii* [Fundamentals of Agronomy] [Navchalnyi posibnyk]. Lutsk: LNTU. <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%20%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%97.pdf>. [in Ukrainian]
4. Kachynskiy, M. A. (1970). *Fizyka gruntu* [Soil physics]: u 2 ch. Mria. <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/FIZYKA-GRUNTIV-laboratornyy-praktykum.pdf> [https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib\\_upload/%D0%97%D1%96%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA%20%D0%9C.%D0%86/other/lekcziya\\_11\\_fizichni\\_vlastivosti\\_gruntiv.pdf](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%97%D1%96%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA%20%D0%9C.%D0%86/other/lekcziya_11_fizichni_vlastivosti_gruntiv.pdf) [in Ukrainian]
5. Al-Janobi, A. A., & Al-Suhaibani, S. A. (1998). Draft of primary tillage implements in sandy loam soil. *Applied Engineering in Agriculture*, 14(4), 343–348.
6. Sahu, R. K., & Raheman, H. (2006). Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. *Biosystems Engineering*, 94(2), 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.01.015>
7. American Society of Agricultural Engineers. (2003). *ASAE D497.4: Agricultural machinery management data*. ASAE.
8. Grisso, R. D., Yasin, M., & Kocher, M. F. (1996). Tillage implement forces operating in silty clay loam. *Transactions of the ASAE*, 39(6), 1977–1982.
9. Glancey, J. L., Upadhyaya, S. K., Chancellor, W. J., & Rumsey, J. W. (1989). An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics. *Soil and Tillage Research*, 14(1), 1–24. Swick, W. C., & Perumpral, J. V. (1988). A model for predicting soil tool interaction. *Journal of Terramechanics*, 25(1), 43–56.
10. Gupta, P. D., Gupta, C. P., & Pandey, K. P. (1989). An analytical model for predicting draught forces on convex-type cutting blades. *Soil and Tillage Research*, 14(2), 131–144.
11. Swick, W. C., & Perumpral, J. V. (1988). A model for predicting soil tool interaction. *Journal of Terramechanics*, 25(1), 43–56.
12. McKyes, E. (1985). *Soil cutting and tillage*. Elsevier.
13. Godwin, R. J., Spoor, G., & Soomro, M. S. (1984). The effect of tine arrangement on soil forces and disturbances. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30(1), 47–56. Glancey, J. L., & Upadhyaya, S. K. (1995). An improved technique for agricultural implement draught analysis. *Soil and Tillage Research*, 35(3), 175–182.
14. Godwin, R. J., & Spoor, G. (1977). Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(4), 213–228.
15. Luth, H. J., & Wismer, R. D. (1971). Performance of plane soil cutting blades in sand. *Transactions of the ASAE*, 14(2), 255–259, 262. Glancey, J. L. (1990). *Prediction of tillage implement draft with a reference tillage tool* [Unpublished doctoral dissertation]. Agricultural Engineering Department, University of California, Davis.

16. Siemens, J. C., Weber, J. A., & Thornburn, T. H. (1965). Mechanics of soil as influenced by model tillage tools. *Transactions of the ASAE*, 8(1), 1–7.
17. Rowe, R. J., & Barnes, K. K. (1961). Influence of speed on elements of draft of a tillage tool. *Transactions of the ASAE*, 4(1), 55–57.
18. Glancey, J. L., & Upadhyaya, S. K. (1995). An improved technique for agricultural implement draught analysis. *Soil and Tillage Research*, 35(3), 175–182.
19. Wheeler, P. N., & Godwin, R. J. (1996). Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(3), 243–250.
20. Bulgakov, V., Aboltins, A., Beloiev, H., Nadykto, V., Kyurchev, V., Adamchuk, V., & Kaminskiy, V. (2021). Maximum admissible slip of tractor wheels without disturbing the soil structure. *Applied Sciences*, 11(15), 6893. <https://doi.org/10.3390/app11156893>
21. American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2011). *Agricultural machinery management data* (Standard ASABE D497.7 MAR2011). ASABE.
22. Glancey, J. L. (1990). *Prediction of tillage implement draft with a reference tillage tool* [Unpublished doctoral dissertation]. Agricultural Engineering Department, University of California, Davis.
23. Prado, A. J., Auat Cheein, F. A., Blazic, S., & Torres-Torriti, M. (2018). Probabilistic self-tuning approaches for enhancing performance of autonomous vehicles in changing terrains. *Journal of Terramechanics*, 78, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.04.001>
24. Melnyk, I. I., Hrechkosii, V. D., Marchenko, V. V., ta in. (2004). *Optymizatsiia kompleksiv mashyn i struktury mashynnoho parku ta planuvannia tekhnichnoho servisu* [Optimization of machine complexes and machine park structure and technical service planning] [Navchalnyi posibnyk]. VVTs NAU. [in Ukrainian]
25. Roul, K., Raheman, H., Pansare, M. S., & Machavaram, R. (2009). Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network. *Biosystems Engineering*, 104(4), 476–485. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.09.004>
26. Claas Axion 950-920. (n.d.). ATS. <https://ats.in.ua/products/claas-axion-950-920/93>.
27. LEMKEN Ukraine. (n.d.). Rubin 10 disc harrow. [https://lemken.com.ua/ua/harrow\\_rubin\\_10](https://lemken.com.ua/ua/harrow_rubin_10).

**Vladyslav Zubko**, Prof., Dr. Tech. Sci., **Olena Teslenko**

*Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine*

### **Dependence of Agricultural Machinery Specific Resistance on Soil Hardness**

The purpose of this study is to enhance the efficiency of machine unit assembly by developing a unified method for substantiating the specific resistance of machines equipped with various working tools, based on soil hardness values. The article investigates the dependence of the specific resistance of agricultural machinery on key factors: soil hardness, working tool shape and material, tillage depth, presence of crop residues, and operating speed.

Traditional field dynamometry is analyzed, highlighting its drawbacks (high labor intensity, requirement for specialized equipment, substantial time and financial costs). A novel approach is proposed for substantiating the specific resistance of agricultural machines with diverse working tools. This method substitutes the specific soil resistance during plowing with its hardness index (measured using a penetrometer), incorporating correction coefficients for working tool shape ( $c$ ), working surface material ( $\lambda$ ), presence of crop residues ( $z$ ), and the nonlinear effect of travel speed.

Field experiments conducted on typical soils of the Sumy region (Institute of Agriculture of the North-East of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine) established a layered dependence of soil hardness and specific resistance on depth (0–30 cm) with high reliability. Based on the obtained data, a mathematical model of the total and specific resistance of the machine was developed, accounting for both static and dynamic (inertial) components.

Using the example of the Claas Axion 930 tractor aggregated with the Lemken Rubin 10 disc harrow, the pattern of increasing resistance and slippage with rising speed (5–12 km/h) and soil hardness (0.75–3.0 MPa) is demonstrated. It is shown that at higher soil hardness levels, the rate of increase in resistance and slippage with speed rises substantially.

For practical implementation, a program was created in Microsoft Excel 2016 to facilitate laboratory analyses. The proposed approach enables a significant reduction in costs for full-scale experiments, improves the accuracy of predicting traction characteristics, and optimizes the selection of tractors and implements under varying agrotechnical conditions.

**soil hardness, soil resistivity, working speed, slippage, crop residues, working width, machine resistivity, working parts of agricultural machinery, productivity**

*Одержано (Received) 11.02.2026*

*Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2026*

*Прийнято до друку (Approved) 07.03.2026*