

## МАШИНИ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 621.891:631.31

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).3-16](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).3-16)

**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук, **С.О. Карпушин** доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: AulinVV@gmail.com*

**Д.А. Дерев'янку**, проф., д-р техн. наук

*Житомирський національний агроекологічний університет, м. Житомир, Україна*

### Підвищення енергоефективності обробітку ґрунту зменшенням процесів його налипання на поверхні робочих органів

Розглянуто фізичну сутність процесу взаємодії системи "робочий орган ґрунтообробної машини - ґрунт" в різних умовах її роботи, що дає можливість з'ясувати методи зниження енергозатрат при обробітку ґрунту. Виявлено залежність тягового опору робочих органів ґрунтообробних машин від умов їх роботи. Визначено, що процес налипання ґрунту на їх робочі поверхні є однією з причин підвищення тягового опору. Проведено аналіз сучасних методів та методик щодо зменшення величини налипання ґрунту на робочі поверхні розпушувачів. Врахована природа налипання частинок ґрунту на різальні елементи та поверхню робочих поверхонь розпушувача з точки зору дослідження на макро - та мікрорівні. Для дослідження налипання ґрунту обрано серійний робочий орган з матеріалу сталь Hardox 400, з покриттям Kocetal K300 та з покриттям в складі композиції на основі високомолекулярного поліетилену та базальтового волокна. Отримані залежності горизонтальної складової сили тягового опору розпушувача від швидкості його руху, абсолютної вологості ґрунту, від розміру частинок суглинного ґрунту та від глибини обробітку.

**робочий орган ґрунтообробної машини, тяговий опір, вологість, налипання ґрунту, коефіцієнт тертя ґрунту, гідрофобні покриття**

**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук, **С.А. Карпушин**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

**Д.А. Дерев'янку**, проф., д-р техн. наук

*Житомирський національний агроекологічний університет, м. Житомир, Україна*

### Повышение энергоэффективности обработки почвы уменьшением процессов ее налипания на поверхности рабочих органов

Рассмотрена физическая суть процесса взаимодействия системы "рабочий орган почвообрабатывающей машины - почва" в разных условиях ее работы, что дает возможность определить методы снижения энергозатрат при обработке почвы. Выявлена зависимость тягового сопротивления рабочих органов почвообрабатывающих машин от условий их работы. Определено, что процесс налипания почвы на их рабочие поверхности является одной из причин повышения тягового сопротивления. Проведен анализ современных методов и методик по уменьшению величины налипания почвы на рабочие поверхности рыхлителей. Учтена природа налипания частиц почвы на режущие элементы и поверхность рабочих поверхностей рыхлителя с точки зрения исследования на макро - и микроуровне. Для исследования налипания почвы выбран серийный рабочий орган из материала сталь Hardox 400, с покрытием Kocetal K300 и с покрытием в составе композиции на основе высокомолекулярного полиэтилена и базальтового волокна. Полученные зависимости горизонтальной составляющей силы тягового сопротивления рыхлителя от скорости его движения, абсолютной влажности почвы, от размера частиц суглинистой почвы и от глубины обработки.

**робочий орган почвообрабатывающей машини, тягове опір, вологість, налипання ґрунту, коефіцієнт тертя ґрунту, гідрофобні покриття**

**Постановка проблеми.** Створення ресурсозберігаючих та енергоощадних технологій залишається одним з пріоритетних напрямків сучасних наукових досліджень технологій ґрунтообробних та землерийних машин. Тяговий опір робочих органів ґрунтообробних машин (РОГМ) є важливим енергетичним показником їх роботи, який обмежує продуктивність агрегату і визначає витрати енергії на обробіток ґрунту. Виявлено, що тяговий опір РОГМ істотно залежить як від швидкості руху, так і від глибини обробітку ґрунту. Особливо суттєвим цей вплив спостерігається при роботі глибокорозпушувачів ґрунту, їх тяговий опір на глибині 0,25...0,30 становить 10 кН, що є перешкодою досягнення високої продуктивності агрегату. Тому пошук шляхів розв'язання проблеми спрямованої на зниження тягового опору РОГМ, є безумовно актуальним, особливо при розробці їх нових енергоефективних конструкцій РОГМ.

Аналіз експериментальних досліджень сучасних провідних вітчизняних та зарубіжних науковців можна прийти до висновку, що недостатньо уваги приділяється фізичній сутності процесу взаємодії системи "РОГМ-ґрунт" в різних умовах її роботи. Врахування цих умов дає можливість зниження енергозатрат при обробітку ґрунту, необхідно розглянути залежність тягового опору РОГМ від умов їх роботи. Особливо це стосується передусім налипання ґрунту на робочі поверхні РОГМ (Рис.1), як однією з причин підвищення їх тягового опору. Недостатньо враховується природа налипання частинок ґрунту на різальні елементи (РЕ) та поверхню РОГМ з точки зору дослідження на макро - та мікрорівні.



Рисунок 1 – Налипання ґрунту на поверхню розпушувача

*Джерело: розроблено авторами*

Механічні способи усунення налипання ґрунту на робочі поверхні РОГМ, розроблені в різні часи в Україні та за кордоном свідчать, що кожен з них має свої переваги і недоліки. Зазначимо, що дослідження проведені в даному напрямку стосувалися передусім боротьби з процесом налипання ґрунту на робочі поверхні глибокорозпушувачів. Виявлено, що серед численних спроб знизити тертя в системі "РОГМ-ґрунт" можна відзначити наступні: змащення водою з зовнішнього джерела; змащення водою, отриманої з ґрунту в результаті електроосмосу; зменшення налипання ґрунту в результаті видалення води електроосмосом; повітряне мастило; застосування вібрації; заміна пасивних робочих поверхонь активними; зміна геометричної форми поверхні робочого органу; застосування різних матеріалів в якості покриттів на робочі поверхні.

Для усунення процесу налипання ґрунту на РОГМ різними дослідниками пропонувалася велика кількість різноманітних пластичних матеріалів, переважно для

плугів. Запропоновано наносити покриття на робочі поверхні РОГМ, в місцях найбільшого налипання ґрунту, такими полімерними матеріалами, як поліетилен (високого і низького тиску), капрон, поліамід, різного роду смоли, полімерні композиційні матеріали на основі високомолекулярного поліетилену та базальтового волокна.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У середовищі ґрунту, що містить полярні і неполярні молекули, виникає взаємодія, обумовлена електростатичним притяганням між диполями полярних молекул і наведеними (індукованими) диполями неполярних молекул. Останні виникають в результаті поляризації під дією електричних полів диполів, що оточують полярну молекулу. Це ефект виникнення індукційної складової сил Ван-дер-Ваальса. Енергія індукційної взаємодії зростає зі збільшенням електричного моменту диполя, але не залежить від температури, оскільки наведення диполів визначається напруженістю всього електричного поля і відбувається при будь-якій просторовій орієнтації молекул.

Водяне мастило, електроосмос, аеродинамічне змащення обумовлює створення граничних плівок. Відомо, що один з найбільш поширених способів змащення частинок ґрунту - це змащення водою. Для зниження тягового опору РОГМ і поліпшення його роботи французька фірма "Kuhn" запропонувала подавати воду на робочу поверхню РОГМ. За даними фірми, застосування цього способу при роботі плуга на зволжених ґрунтах, знижується тяговий опір на 35% [1]. Крім подачі в зону контакту ґрунту з лемішно-відвальною поверхнею чистої води, досліджували також подачу водополімерної суміші, що поліпшувало оборот пласта [2,3]. В окремих випадках зниження тягового опору становило 30% і більше, а в середньому - на 20%, при витраті суміші 110 ... 115 л/га. Аналіз ґрунту після випробувань показав, що застосовувані полімери нешкідливі, біодеградують в ґрунті, розчиняючись у воді.

Зазначені технічні рішення схожі між собою і полягають в подачі води або спеціальних водних розчинів в зону контакту ґрунту з лемішно-відвальною поверхнею, або через отвори в відвалі і лемеші, розташовані в області їх стику [4]. Проведена економічна оцінка доводить, що обробка плугами з водяним мащенням великих земельних масивів є недоцільною, оскільки вимагає підвезення великої кількості води і великих витрат часу.

Крім безпосереднього введення води між пластом ґрунту і відвалом, отримати мащення можна і за допомогою електроосмосу. Г.С. Беліком [5] досліджені можливості використання електроосмосу ґрунту при оранці для усунення налипання ґрунту на плужних відвалах шляхом створення тонкошарової водяної плівки перенесенням води з ґрунту на поверхню відвалу. Виявлено, що застосування електроосмосу дає ефект при високій вологості ґрунту 24 ... 26% і швидкостях руху плуга, що не перевищують 0,2 ... 0,3 м/с. За даних умов спостерігалось зниження тягового опору плуга на 14% і зменшення в 20 ... 60 разів по вазі, налиплого шару ґрунту. В роботі [6,11] досліджували вплив електроосмосу на зниження коефіцієнта тертя ґрунту по сталі, при різних показниках вологості. Польові випробування оранки з використанням електроосмосу при напрузі на електродах 120 В і вологості 25,5% дали зниження тягового опору плуга на 14,3%. Налипання ґрунту на сталь зменшується в кілька десятків разів, а при напрузі на електродах 500 В - взагалі не спостерігалось. Проте складність апаратури перетворення струму та потужність генератора постійного струму для створення електроосмосу на корпусах плуга практично компенсує результат зниження тягового опору.

Розглянуто і спосіб аеродинамічного змащення, коли повітря під тиском подається на робочі поверхні через отвори в відвалі і лемеші. Газовий прошарок, що при цьому утворюється, повинен усунути тертя ковзання ґрунту по металу, в результаті

чого істотно зменшується тяговий опір [7]. Проте аеродинамічне змащення не знайшло масового застосування в силу конструктивної складності виготовлення робочих органів з аеродинамічним змащенням та великої трудомісткості при постановці і знятті додаткового обладнання в процесі експлуатації.

Для протидії налипанню і зниження тягового опору РОГМ використовували і вібраційні явища [8]. Встановлено, що вібрація знижує тяговий опір на 40 ... 65% при амплітуді коливання 5 мм і частоті 20 Гц і малою поступальною швидкістю до 0,6 м / сек. Зменшення частоти коливань до 10 Гц викликає менший ефект в зниженні тягового опору 10 ... 30%, по відношенню до тягового опору невіброуючого РОГМ, та вимагає додаткової потужності на вібропривід корпусів.

Для зниження тягового опору та зменшення процесу налипання ґрунту були випробувані РОГМ з гальванічними покриттями - нікелювання, хромування [9]. Запропоновані покриття знижують налипання поверхонь до 30% за рахунок гідрофобних властивостей, але недостатня їх зносостійкість, мала товщина та висока вартість технології нанесення не дозволяє їх широко використовувати. Аналізуючи існуючі способи боротьби з налипанням, найбільш перспективним є застосування полімерних композиційних матеріалів в якості покриття робочих органів.

В роботі [10] наведено результати проведених досліджень по використанню пластмас в якості покриттів робочих поверхонь РОГМ. Лабораторні дослідження в середовищі глини показали, що при вологості 21,1%, тефлон має коефіцієнт тертя 0,25, рулон (чотирифтористий етилен з наповнювачем) - 0,44, поліетилен високого тиску - 0,78, сталь - 2. Тяговий опір корпусу плугу з пластмасовим покриттям на 23% менший від сталевого, а налипання глини взагалі відсутнє. Корпус плуга з поліетиленовим покриттям теж не залипає.

Покриття РОГМ синтетичним матеріалом марки Worblex-PE 7473 (поліетилен низького тиску фірми Gulrid – Worbla AG) [11] дало зниження тягового опору плуга на пухких піщаних ґрунтах на 5,6 ... 12,7%, на середніх - 2,7 ... 5,4%. Це спостерігалось в інтервалі швидкостей руху 1,67...2,77м/с. Витрата палива при цьому також знижується на 9,9...11% (піщаний ґрунт), та на 6,1 ... 7,0% (середньосуглинистий ґрунт). Дані отримані для плугів зі сталевими корпусами. Визначено зниження експлуатаційних витрати на 2%, а витрати палива - на 7%. Напрацювання плуга з пластмасовими покриттями становить близько 120 га.

В роботі [12] висвітлені результати проведених експериментальних досліджень по оранці липких ґрунтів за допомогою плугів, на відвали яких нанесена тонка пластмасова плівка. Налипання ґрунту при цьому не спостерігали. Виявлено, що з числа випробуваних матеріалів найбільшу довговічність мають тефлон (90 ... 120 га) і суміш келона - С з деякими похідними тефлону (150 га).

Тяговий опір відвалів плужних корпусів з Kocetal K300 покриттям, згідно досліджень проведених в роботі [2,13], у порівнянні зі звичайними сталевими відвалами знижується приблизно на 23% на корпус і приблизно на 20% на плуг в цілому. Крім того відзначаються більш високі агротехнічні показники (на 10 ... 15%) по кришенню ґрунту, глибині закладення рослинних залишків та за поверхневою брилісткістю ріллі. Чотирикорпусний навісний плуг загального призначення з Kocetal K300 покриттями на відвалах виробляє до моменту наскрізного протирання покриттів 120 га. Відвал корпусу плуга, при цьому виготовлений з поліетилену низького тиску марки П4009. Випробування показали, що корпус плуга ПН-8-35 з таким відвалом дозволяє підвищити продуктивність на 0,1 га/год і знизити витрату палива на 0,8 кг/га у порівнянні зі звичайними металевими корпусами.

**Постановка завдання.** Метою роботи є підвищення показників енергоефективності робочих органів ґрунтообробних машин за рахунок покращення

гідрофобних характеристик поверхні та зменшення величини тягового опору від налипання ґрунту.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження проводили на дослідних ділянках поля ТОВ "Екосем" с. Новопавлівка Кіровоградського району Кіровоградської області та в лабораторії Центральноукраїнського національного технічного університету згідно ДСТУ ISO 8947:2012 "Сільськогосподарські машини". Дослідженню підлягали РОГМ глибокорозпушувача Alrego Super Cracker KF 7-400 з наступними параметрами: кількість робочих органів 7; відстань між ними 570 мм; робоча глибина обробітку до 650 мм; робоча ширина захвату 3900 мм; транспортна ширина 3770 мм; вага 1650. Під час випробувань використовувався трактор New Holland T8-390 з максимальною потужністю 286 кВт. Для визначення величини тягового опору вибрано S-подібний тензодатчик "Тензо М С2" (рис. 2а). Синхронізація по часу роботи вимірювальних каналів тензодатчика здійснюється за допомогою модуля ME-020. В якості реєструючої апаратури використовували вимірювальний комплекс МІС 400D, встановлений в кабіні трактора (рис. 2б.), що призначений для перетворення різниці тисків між трактором та розпушувачем ґрунту у вихідний уніфікований сигнал взаємної індуктивності з лінійною залежністю з можливістю передачі вимірюваних величин на ПК.



а



б

Рисунок 2 – Пристрій для вимірювання тягового опору: а - Тензо М С2; б- МІС 400D

*Джерело: розроблено авторами*

Для порівняння зміни величини тягового опору розпушувача було обрано серійний робочий орган з матеріалу сталь Hardox 400, з покриттям Kocetal K300 та з покриттям в складі композиції на основі високомолекулярного поліетилену та базальтового волокна (ВПБВ) (рис.3).



а)



б)

Рисунок 3 – Матеріали для покриття РОГМ: а- Kocetal K300; б- ВПБВ

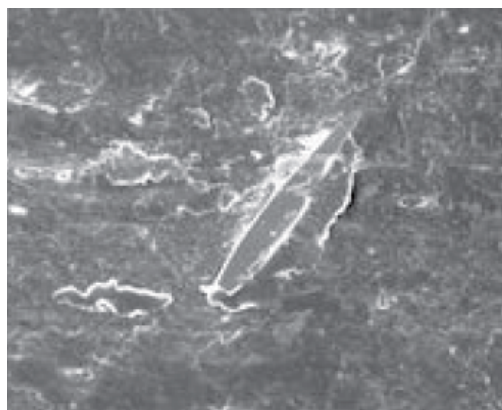
*Джерело: розроблено авторами*

Визначення величини налиплого ґрунту (середньосуглинистий чорнозем *Naрlіс Chernozems* за міжнародною класифікацією WRB) проводили ваговим методом. Вологість ґрунту по горизонтах 0...10, 10...20 і 20...30 см контролювали електронним аналізатором вологості "Sartorius MA30-000V3".

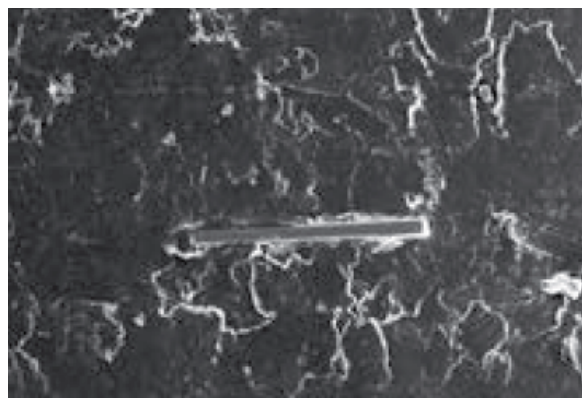
**Результати досліджень.** За результатами досліджень були визначені адгезійні властивості ґрунту (центральноукраїнський середньосуглинистий чорнозем, *Naрlіс Chernozems* за міжнародною класифікацією WRB) при взаємодії з різними матеріалами робочого органу розпушувача. В результаті встановлено, що питома сила зчеплення полімерних та сталевих з різною чистотою поверхні з ґрунтом, в міру збільшення його вологості, зростає досягаючи максимуму при вологості  $W = 30 \dots 32\%$ , а потім спадає. З досліджених матеріалів найбільш інтенсивно спостерігається налипання на сталі з чистотою поверхні  $\nabla 4$ , а найменше – на матеріал *Kocetal K300*.

Встановлено, що абсолютна величина сили прилипання ґрунту досягає максимального значення у необробленій сталевій поверхні, а мінімального – у поліетилену, зменшення у 2,0 рази. Для матеріалу *Kocetal K300*, група коцеталів з додаванням скловолокна, ця сила зменшується у 2,25 рази. Виявлено, що сила прилипання з підвищенням вологості поступово збільшується, потім переходить через максимум, при вологості 30 ... 36%, а після чого зменшується. Виявлено, що матеріал *Kocetal K300* має вологовідштовхувальні (гідрофобні) властивості, що є основним чинником для усунення процесу налипання ґрунту. Визначення відносної зносостійкості пластмас, проведене на базі лабораторії зносостійкості та надійності машин Центральноукраїнського національного технічного університету показало, що матеріал *Kocetal K300* – в 4 рази більш стійкий, ніж поліетилен, а створена композиція на основі високомолекулярного поліетилену та базальтового волокна (ВПБВ), має зносостійкість у 1,5 ... 2,0 рази вищу ніж *Kocetal K300*.

При використанні в якості покриття *Kocetal K300*, полімерна матриця менш пов'язана з волокном і при терті йде відшарування волокон разом з прилеглим полімером, приводячи до зниження зносостійкості такого композиту. Зазначимо, що у випадку використання ВПБВ процес тертя протікає на поверхні волокон, локалізованих по шляху тертя, а тому в результаті посилення адгезійної взаємодії між матеріалом базальтового волокна і полімером практично не зареєстровано частинок зносу (рис. 4а і 4б).



а



б

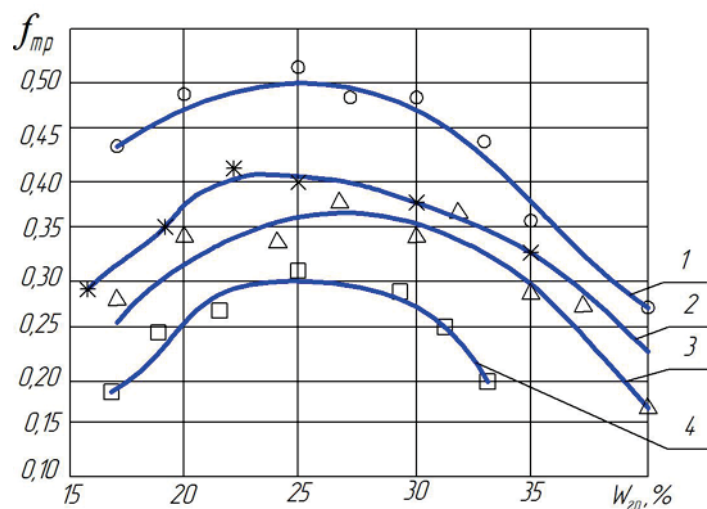
Рисунок 4 – Адгезійні випробування покриттів, нанесених на поверхнях зразків:  
а- *Kocetal K300*; б- ВПБВ

*Джерело: розроблено авторами*

Зазначені результати досліджень взаємодії різних полімерних матеріалів з ґрунтом при покритті ними робочих поверхонь ґрунтообробних знарядь, показали

високу ефективність їх застосування для усунення налипання і зниження коефіцієнта тертя.

Результати дослідження залежності коефіцієнта тертя ґрунту від вологості наведені на рис.5.



1 - глинистий чорнозем по поліетилену; 2 – суглинистий чорнозем по поліетилену;  
3 - глинистий чорнозем по ВПБВ; 4 - суглинистий чорнозем по ВПБВ

Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта тертя ґрунту по поверхні РОГМ від її вологості  
Джерело: розроблено авторами

Отримані експериментальні дані свідчать, що коефіцієнт тертя змінюється в широких межах для різних типів ґрунтів і матеріалів РОГМ: для глинистого чорнозему:  $f_{тр.}=0,52...0,27$  – покриття поліетилен,  $f_{тр.}=0,37...0,17$  – покриття ВПБВ; для суглинистого чорнозему  $f_{тр.}=0,42...0,23$  – для покриття поліетилен,  $f_{тр.}=0,30...0,18$  – для покриття ВПБВ.

Виявлено, що в інтервалі швидкостей 0,5 ... 3,0 м/с, абсолютна величина коефіцієнта тертя змінюється несуттєво і практично можна вважати її постійною. Визначено також, що питомий тиск в зоні контакту і механічний склад ґрунту істотно впливають на величину коефіцієнта тертя.

Вимірюваннями встановлено, що вологість ґрунту по горизонтах 0...5 і 5...10 см, відповідно дорівнюють 24,3 і 26,8%.

Проведеними дослідженнями виявлено, що серійні глибокорозпушувачі, виготовлені зі сталі, найбільш схильні до налипання ґрунтом. Максимальна маса налиплого на них ґрунту, при даній вологості, становить порядку 0,7 кг (табл. 1).

Аналогічний процес відбувається з глибокорозпушувачем з пентопластовим покриттям на робочих поверхнях, на яких маса налиплого ґрунту складає 0,557 ... 0,513 кг. Таке значне налипання розпушувача з пентопластовим покриттям можна пояснити гідрофільністю пентопласта. Зі збільшенням швидкості руху процес налипання на робочих поверхнях розпушувачів зменшується.

Можна бачити, що максимальний ступінь налипаємості ґрунту на РОГМ з покриття пентопласту у 1,33 разів, з покриттям Косетал К300 у 2,75 рази, а з покриттям ВПБВ – у 4,17 разів менше ніж серійних без покриття. Зі збільшенням швидкості руху на всіх матеріалах РОГМ ступінь налипаємості ґрунту зменшується. На серійних розпушувачах налиплий шар ґрунту утворює нарід конусоподібної форми, що в результаті приводить до зміни робочої форми розпушувача в процесі тертя та зношування об ґрунт. Визначено також, що зі збільшенням вологості ґрунту його налипання на робочих поверхнях серійних розпушувачів збільшується, і при вологості

28 ... 30% вони практично стають непрацездатними. З наведених даних випливає, що істотно зменшується інтенсивність процесу налипання ґрунту на робочі поверхні розпушувача з покриттям ВПБВ при підвищеній вологості ґрунту.

Таблиця 1 – Зміна показника налипання ґрунту на робочі поверхні глибокорозпушувача від швидкості руху РОГМ та нанесених покриттів, а також статистичні характеристики вимірювання

Розпушувачі з покриттям	Показник налипання та статистичні характеристики	$v, \text{ м/с}$				
		1,8	2,2	2,7	3,1	3,5
Серійний без покриття	m, ср	0,639	0,629	0,624	0,596	0,578
	$\pm \Delta m$	0,036	0,035	0,034	0,031	0,039
	$\pm \sigma$	5,89	5,79	5,71	5,58	6,92
	$v, \%$	0,011	0,011	0,010	0,011	0,011
З покриттям Пентопласт	m, ср	0,557	0,552	0,536	0,527	0,513
	$\pm \Delta m$	0,031	0,034	0,031	0,032	0,034
	$\pm \sigma$	5,81	6,32	5,84	6,23	6,34
	$v, \%$	0,012	0,012	0,011	0,011	0,011
З покриттям Косетал К300	m, ср	0,232	0,214	0,186	0,164	0,142
	$\pm \Delta m$	0,011	0,011	0,010	0,0089	0,0078
	$\pm \sigma$	5,32	6,01	5,26	5,41	5,51
	$v, \%$	0,003	0,0035	0,002	0,0032	0,0017
З покриттям ВПБВ	m, ср	0,153	0,136	0,0131	0,123	0,112
	$\pm \Delta m$	0,006	0,0064	0,0075	0,0063	0,004
	$\pm \sigma$	4,53	4,96	6,04	5,34	4,72
	$v, \%$	0,002	0,0025	0,002	0,0025	0,0015

Фізичні процеси в ґрунтах свідчать, що в них постійно циркулюють електричні струми природного походження, а також електричні поля атмосфери [1, 14]. Кожний тип ґрунту володіє електричним потенціалом, що має певне значення, яке змінюється в часі. За величиною електричний потенціал ґрунту залежить від множини різних факторів: механічний склад, водний режим, температура ґрунту, вміст органічної речовини і т. д.. Електричний потенціал змінюється і при обробі ґрунту різними сільськогосподарськими знаряддями. Так в процесі роботи РОГМ в ґрунті виникає електричний потенціал. При використанні полімерного матеріалу в якості покриттів на робочі поверхні розпушувачів, істотну роль у виникненні електричного потенціалу відіграють процеси обумовлені тертям і поляризацією контактуючих поверхонь в процесі взаємодії з ґрунтом.

Електричний заряд, виникаючий в зонах контакту при терті на полімері змінюється в часі і може нейтралізуватися іонами з навколишнього простору. Згідно електромолекулярної теорії взаємодії води і ґрунту механізм виникнення процесу прилипання і існування його максимуму пояснюються утворенням подвійного електричного шару на поверхні частинок ґрунту [15,16].

Результати досліджень виникнення і зміни електричного потенціалу в ґрунті при роботі глибокорозпушувачів з різними полімерними покриттями показали, що для одних і тих фізико-механічних характеристик ґрунту при однаковій швидкості руху РОГМ з ВПБВ покриттям має позитивний потенціал відносно нульової точки значення, і змінюється в межах (+ 50, + 100) мВ. У разі використання полімерного матеріалу



покриття Kocetal K300 знак потенціалу залишився незмінним, однак значення його меж знизилось до величини (+30, +50) мВ. Для глибокорозпушувачів з пентопластовим покриттям, потенціал змінювався в діапазоні нульового значення в межах (+20, +30) мВ. Для серійних (без покриття) РОГМ потенціал мав у всіх дослідах від'ємне значення в межах (-50, - 30) мВ. Також виявлено, що величина потенціалу залежить від сили тиску на поверхню РОГМ.

Аналіз результатів процесу налипання ґрунту на поверхні глибокорозпушувача, наведених в таблиці 1, дав можливість для подальших досліджень використовувати в якості покриття на робочі поверхні РОГМ матеріали Kocetal K300 та ВПБВ. Це передусім дослідження залежності горизонтальної складової сили тягового опору розпушувача від швидкості його руху (рис. 6)

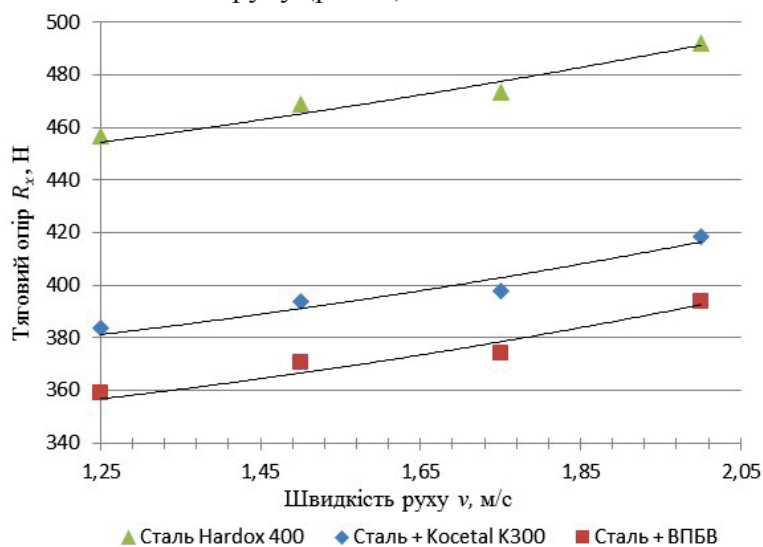


Рисунок 6 – Залежність горизонтальної складової сили тягового опору від матеріалу розпушувача та швидкості руху

Джерело: розроблено авторами

Регресійний аналіз даних дав можливість побудувати рівняння регресії горизонтальної складової сили тягового опору від швидкості руху розпушувача ґрунту: для Сталь Hardox 400 -  $R_x = 11,87v^2 + 10,698v + 422,42$ ,  $R^2 = 0,9815$ ; Сталь Hardox 400+ Kocetal K300 -  $R_x = 14,666v^2 - 0,6415v + 359,06$ ,  $R^2 = 0,978$ ; Сталь Hardox 400+ВПБВ -  $R_x = 17,077v^2 - 7,7503v + 339,76$ ,  $R^2 = 0,9778$ .

З результатів проведених досліджень на рис. 6, видно, що з підвищенням швидкості руху горизонтальна складова тягового опору зростає прямо пропорційно за квадратичною залежністю. Максимальне значення тягового опору розпушувача виготовленого зі сталі Hardox 400 при швидкості руху 2,28 м/с, а мінімальне - 457 Н - швидкості 1,25 м/с. При використанні в якості покриття на робочій поверхні сталі матеріалу Kocetal K300 максимальне значення тягового опору склало 418 Н, при швидкості 2,28 м/с, а мінімальне - 363 Н, при швидкості 1,27 м/с. Максимальна величина тягового опору при використанні в якості покриття на робочій поверхні розпушувача матеріалу ВПБВ, склала 394 Н; при швидкості 2,28 м/с, а мінімальне - 359 Н ; при швидкості 1,27 м/с.

Згідно електромолекулярної теорії, робота необхідна для подолання сили прилипання, витрачається на поділ протилежних зарядів подвійного електричного шару [16]. Процес прилипання ґрунту до різних матеріалів виникає з появою в ній крихко зв'язаної води. Вода, що міститься в граничних прошарках разом з сорбційною і

осмотичною зв'язаною водою має молекулярну природу. З'ясовано, що структура ґрунту, граничні шари і діючий тиск визначають активність тонких водних прошарків і змочуваних плівок. При цьому спостерігається зміна в'язкості та діелектричної проникності в граничних шарах, які в свою чергу впливають на електрокінетичні явища в капілярах і порах. При невеликій кількості цієї води гідратовані молекули міцно утримуються електростатичним полем частинок, і прилипання ґрунту в цьому випадку відсутнє. Зі збільшенням кількості крихко зв'язаної води, міцність зв'язків віддалених диполів води з частинками ґрунту зменшується, але міцність їх зв'язків підвищується в зоні контакту з матеріалом, що і викликає збільшення сили прилипання та підвищення тягового опору РОГМ. Міцність зв'язків з контактною поверхнею буде тим вище, чим більше її замкнення.

Залежність горизонтальної складової тягового опору РОГМ наведена на рис. 7.

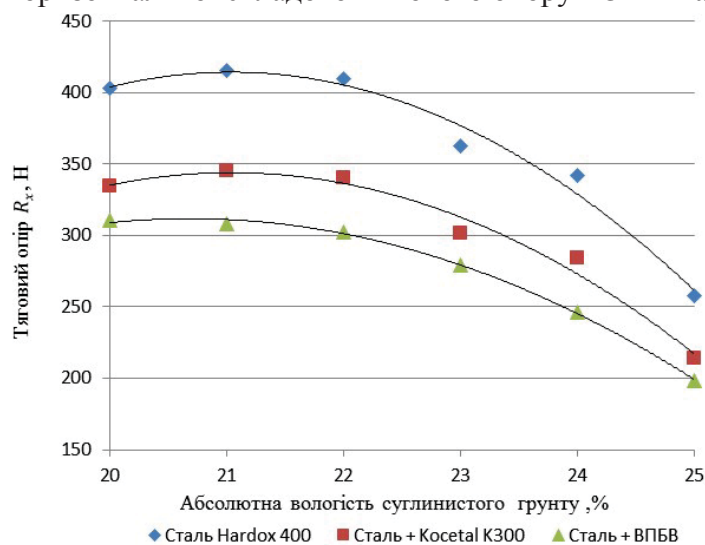


Рисунок 7 – Залежність горизонтальної складової тягового опору розпушувача від абсолютної вологості ґрунту

Джерело: розроблено авторами

Регресійний аналіз даних дав можливість побудувати рівняння регресії горизонтальної складової сили тягового опору від абсолютної вологості ґрунту: для Сталь Hardox 400 -  $R_x = -9,7321w^2 + 409,55w - 3894,2$ ,  $R^2 = 0,9778$ ; Сталь Hardox 400+ Kocetal K300 -  $R_x = -8,0777w^2 + 339,92w - 3232,2$ ,  $R^2 = 0,978$ ; Сталь Hardox 400+ВПБВ -  $R_x = -6,0382w^2 + 249,81w - 2271,9$ ,  $R^2 = 0,9986$ .

Можна бачити, що максимальному значенню тягового опору 416 Н, (рис. 7) відповідає розпушувач виготовлений зі сталі Hardox 400, при вологості 21%, а мініимальному значенню 259 Н, при вологості 25%. При використанні покриття матеріалом Kocetal K300 максимальне значення тягового опору склало 346 Н, при вологості 21%, мінімальне 215 Н, при вологості 1,25%. Характер кривої з покриттям робочої поверхні матеріалом ВПБВ відрізняється більш плавним зниженням величини тягового опору в сторону збільшення вологості з максимальним значенням 310, при вологості 20% і мініимального 200 Н при вологості 25%.

Крім цього, що в діапазоні абсолютної вологості 20-25% суглинистого ґрунту горизонтальна складова тягового опору має параболічну залежність для всіх досліджуваних матеріалів РОГМ, приймаючи максимум при вологості 21%, крім розпушувача з покриттям ВПБВ. Подальше збільшення значень абсолютної вологості призводить до зменшення тягового опору.

На рис. 8. представлена залежність тягового опору розпушувача від розміру частинок ґрунту при роботі на суглинному ґрунті, при його абсолютній вологості 21%.

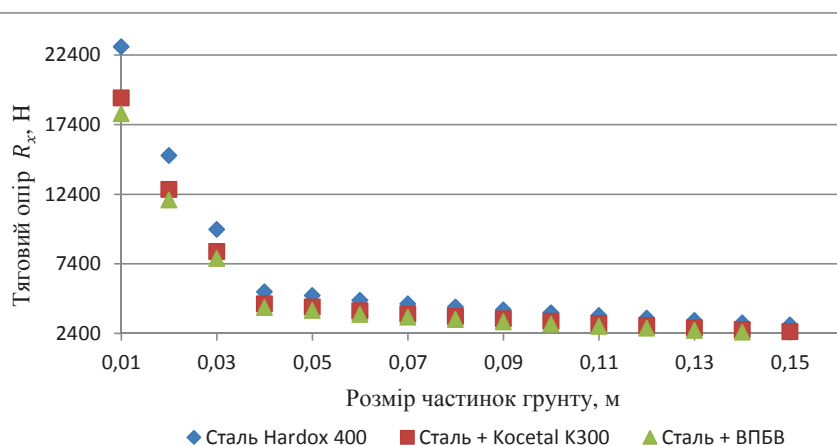


Рисунок 8 – Залежність горизонтальної складової тягового опору від розміру частинок суглинного ґрунту

Джерело: розроблено авторами

Тяговий опір розпушувача при роботі на глибині 20 см і шириною захвату корпусу 0,35 м змінюється за параболічною залежністю, маючи максимальне значення при розмірі частинок ґрунту 0,01 м. Дану криву можна розбити на дві ділянки. В інтервалі розміру частинок ґрунту 0,01 ... 0,06 м спостерігається інтенсивне зменшення тягового опору. У той же час в інтервалі розміру частинок ґрунту 0,06 ... 0,20 простежується також зменшення тягового опору, але з менш інтенсивним характером.

Проведені дослідження розподілу енергозатрат при обробці ґрунту розпушувачем на різній глибині (рис.9). Регресійний аналіз даних дав можливість побудувати рівняння регресії горизонтальної складової сили тягового опору від глибини обробки суглинного ґрунту: для Сталь Hardox 400 -  $R_x = 314744h^2 - 89704h + 15893, R^2 = 0,9906$ ; Сталь Hardox 400+ Kocetal K300 -  $R_x = 264949h^2 - 75445h - 13342, R^2 = 0,9901$ ; Сталь Hardox 400+ВПБВ -  $R_x = 248647h^2 - 70866h + 12556, R^2 = 0,9906$ .

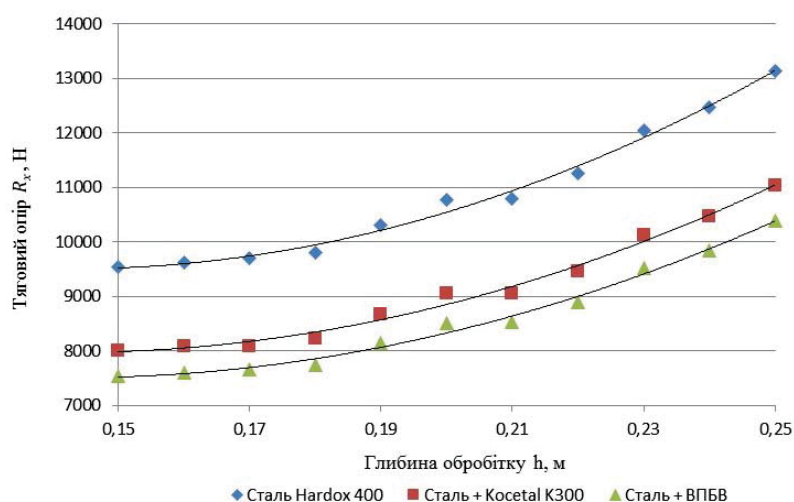


Рисунок 9 – Залежність горизонтальної складової тягового опору розпушувача від глибини обробки суглинного ґрунту

Джерело: розроблено авторами

Виявлено, що зміна глибини обробітку суттєво впливає на характер та величину тягового опору розпушувача. При збільшенні глибини ходу розпушувача з 0,15 до 0,25 м, зростає щільність ґрунту за прямопропорційною залежністю та величина тягового опору. Спостерігається різна залежність тягового опору від матеріалу, представлена у вигляді рівнянь регресії.

#### Висновки.

1. Встановлено, що при взаємодії полімерного матеріалу ВПБВ, нанесеного на робочу поверхню розпушувача, з ґрунтом, виникає електричний заряд, який має суттєвий вплив на зменшення процесу прилипання та зниження тягового опору.

2. Отримані значення потенціалу і його зв'язок з процесом налипання ґрунту. Результати вказують на залежність налипання ґрунту на поверхні з полімерними покриттями не тільки від гідрофільності матеріалів (ВПБВ, Kocetal K300), але і електричного потенціалу, що виникає в зоні контакту і який сприяє розділенню електричних зарядів, тим самим усуненню прилипання ґрунту, а отже зниженню тягового опору.

3. Виявлено зрушення в більшу сторону (для полімерних матеріалів) максимального значення вологості, при якому спостерігаються мінімальні значення сили прилипання ґрунту до робочих поверхонь розпушувача та коефіцієнту тертя.

4. Отримано залежності зміни горизонтальної складової тягового опору розпушувача від коефіцієнта тертя полімерного матеріалу по ґрунту, від вологості ґрунту, швидкості руху РОГМ, розмірів частинок ґрунту та глибини його обробітку.

#### Список літератури

1. Aulin V., Lyashuk O., Tykhyi A., Karpushyn S., Denysiuk N. Influence of rheological properties of a soil layer adjacent to the working body cutting element on the mechanism of soil cultivation *Acta Technologica Agriculturae* 4 Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae. 2018. pp. 153-159. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0028>
2. Аулін В.В., Тихий А.А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами: монографія. Кропивницький: Вид. Лисенко В.Ф. 2017. 279 с.
3. Аулін В.В., Тихий А.А. Динамика износа режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин при взаимодействии с почвой. *Motrol. Commision of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol.18. №2. С. 41-48.
4. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф.. 2014. 370 с.
5. Аулін В.В., Настоящий В.А., Тихий А.А. Вибіркове зношування робочих органів ґрунтообробних та землерийних машин як відображення стохастичної природи їх взаємодії з частинками ґрунту. *Зб. наук. праць Укр. держ. академії заліз. транспорту*. 2014. Вип. 148. С.25-33.
6. Аулін В.В., Тихий А.А. Вплив зміни стану та властивостей ґрунту на знос робочих органів, що працюють на різній глибині. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. Хмельницький: ХНУ. 2013. №1. С.120-126.
7. Аулін В.В. Стан самоорганізації середовища ґрунту та закономірності зносу робочих органів ґрунтообробних машин. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. Хмельницький: ХНУ. 2013. №1. С.114-119.
8. Аулін В.В. Трибофізичне обґрунтування зміни напружено-деформованого стану ґрунту під час дії РОГМ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2012. Вип.42, ч. I. С. 13-20.
9. Аулін В.В., Тихий А.А., Карпушин С.О. Самозагострювання різальних елементів ґрунтообробних і землерийних машин в умовах зміцнення їх робочих поверхонь. *Вестник Харьковского нац. автомобильно-дорожного университета: сб. науч. трудов*. 2012. Вып. 57. С. 188-194.
10. Мамбеталин К.Т. Почва и ее тайны / К.Т. Мамбеталин. Челябинск, 2000. 100 с.
11. Кушнарев А.С., Кочев В.И. Механико-технологические основы обработки почвы. Киев: Урожай, 1989. 144 с.

12. Капов С.П., Мударисов С.Г. Основные принципы построения модели разрушения почвенной среды. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2005. №6. С.30-32.
13. Huang, W. – Liu, D.Y. – Zhao, B.Y. – FENG, Y.B. – XIA, Y.C. Study on the rheological properties and constitutive model of shenzhen mucky soft soil. *In Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2014 vol. 7, no. 3 pp. 55–61.
14. Teamrat, A.G., Dani, O.R. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *In Soil Science Society of America Journal*, 2001.vol. 65, no.3, pp. 624–637.
15. Ľavodová, M. – Kalincová, D. – Kotus, M. – Pavlík, L. The Possibility of Increasing the Wearing Resistance of Mulcher Tools. *In Acta Technologica Agriculturae*, 2018.vol. 21, no. 2. pp. 94–100.
16. Tolnai, R. – Čičo, P. – Kováč, I. Impact strength of steels as a criterion of material resistance. *In Acta Technologica Agriculturae*. 2006.vol. 9, no. 1, pp. 17–19.

## References

1. Aulin, V., Lyashuk, O., Tykhyi, A., Karpushyn, S. & Denysiuk, N. (2018). Influence of rheological properties of a soil layer adjacent to the working body cutting element on the mechanism of soil cultivation *Acta Technologica Agriculturae* 4 Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae. pp. 153-159. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0028> [in English].
2. Aulin, V.V. & Tykhyi, A.A. (2017). *Tribofizichni osnovy pidvishennya znosostykosti i nadijnosti robochih organiv gruntoobrobnykh mashin z rizalnymi elementami: monografiya [Tribophysical bases of increasing wear resistance and reliability of working parts of soil cultivating machines with cutting elements, monograph]*. Kropivnickij: Vid. Lisenko V.F. [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V. & Tikhii, A.A. (2016). Dinamika iznosa rezhushih elementov robochih organov pochvoobrabatyvayushih mashin pri vzaimodejstvii s pochvoj [Dynamics of wear of cutting elements of working parts of soil-cultivating machines while interacting with soil]. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol.18, 2*, 41-48 [in Russian].
4. Aulin, V.V. (2014). *Fizichni osnovy procesiv i staniv samoorganizaciyi v tribotekhnichnih sistemah: monografiya [Physical bases of processes and conditions of self-organization in tribo-technical systems: monograph]*. Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., Nastoyashii, V.A. & Tihii, A.A. (2014). Vibirkove znoshuvannya robochih organiv gruntoobrobnykh ta zemlerijnykh mashin yak vidobrazhennya stohastichnoyi prirodi yih vzayemodiyi z chastinkami gruntu [Selective wear of operating element of tillage and excavation machines as a reflection of the stochastic nature of their interaction with soil particles ]. *Zb. nauk. prac Ukr. derzh. akademiyi zalozn. transportu - Collection of scientific works of Gov. academy of railway transport. Issue. 148*. pp.25-33 [in Ukrainian]
6. Aulin, V.V. & Tihii, A.A. (2013). Vplyv zmini stanu ta vlastivostej gruntu na znos robochih organiv, sho pracuyut na riznij glibini [Influence of change of soil condition and properties on wear of operating elements working at different depth]. *Problemy trybologii - Problems of tribology, 1*, 120-126 [in Ukrainian].
7. Aulin, V.V.(2012). Stan samoorganizatsii seredovyscha gruntu ta zakonmironosti znosu robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn. [State of self-organization of soil environment and patterns of wear of operating elements of tillage machines]. *Problemi tribologii – Problems of tribology, 1*, 114-119 [in Ukrainian].
8. Aulin, V.V. (2012). *Trybofizychno obgruntuvannya zminy napruzhenno-deformovanoho stanu gruntu pid chas dii ROHM [Tribophysical justification for the change of the stress-strain state of the soil during the action of ROGM]. Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tehn. zb. – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines, Vol.42*, 13-20 [in Ukrainian].
9. Aulin, V.V., Tykhyi, A.A. & Karpushyn, S.O. (2012). Samozahostriuvannya rizalnykh elementiv gruntoobrobnykh i zemleriyinykh mashyn v umovakh zmitsnennia yikh robochykh poverkhon [Self-sharpening of cutting elements of soil tillage and excavation machines in conditions of strengthening of their working surfaces]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu – Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, Vol. 57*, 188-194 [in Ukrainian].
10. Mambetalyn, K.T. (2000) *Pochva i ee tainy [Soil and its secrets]*. K.T. Mambetalyn. Cheliabinsk [in Russian].
11. Kushnarev A.S., Kochev, V.Y. (1989). *Mekhaniko-tekhnologicheskiye osnovy obrabotky pochvy [Mechanical and technological bases of soil tillage]*. Kyev: Urozhai [in Russian].

12. Капов, S.P. & Mudarysov, S.H. (2005). Osnovnye pryntsypy postroyeniya modeli razrusheniya pochvennoi sredy [Basic principles of construction of model of destruction of soil environment]. *Traktory y selskokhoziaistvennyye mashyny- Tractors and agricultural machinery, Vol 6*, 30-32 [in Russian].
13. Huang, W. – Liu, D.Y. – Zhao, B.Y. – FENG, Y.B. – XIA, Y.C. (2014). Study on the rheological properties and constitutive model of shenzhen mucky soft soil. *In Journal of Engineering Science and Technology Review, vol. 7, no. 3*, pp. 55–61 [in English].
14. Teamrat, A.G., Dani, O.R. (2001). Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *In Soil Science Society of America Journal., vol. 65, no.3*, pp. 624–637. [in English].
15. Ľavodová, M. – Kalincová, D. – Kotus, M. – Pavlík, L. (2018) The Possibility of Increasing the Wearing Resistance of Mulcher Tools. *In Acta Technologica Agriculturae, vol. 21, no. 2*, pp. 94–100 [in English].
16. Tolnai, R. – Čičo, P. – Kováč, I. (2006) Impact strength of steels as a criterion of material resistance. *In Acta Technologica Agriculturae, vol. 9, no. 1*, pp. 17–19 [in English].

**Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Andriy Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Karpushyn**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Dmytro Derevjnko**, Prof., DSc.

*Zhytomyr National Agroecological University, Zhytomyr, Ukraine*

### **Improving the Energy Efficiency of Soil Cultivation by Reducing the Processes of its Sticking to the Surface of Operating Elements**

The physical essence of the process of interaction of the system "operating element of a soil tilling machine – soil" in different conditions of its operation has been considered. It gives the opportunity to find out methods of reducing energy consumption during soil cultivation. The dependence of traction resistance of the operating elements of tillage machines on the conditions of their operation was revealed. It is determined that the process of sticking soil on the surfaces of operating elements is one of the reasons for the increase of traction resistance. The analysis of modern methods and techniques to reduce the amount of soil sticking on the working surfaces of the tillers was carried out. The nature of the adhesion of soil particles to the cutting elements and the surface of the working surfaces of the tillers is taken into account from the point of view of the study at the macro and micro levels.

To study the process of soil sticking, a serial Hardox 400 steel operating element, coated with Kocetal K300 and high molecular weight polyethylene and basalt fibre was selected.

The values of changes of soil sticking index on the working surface of the deep tillers from the speed of movement of the operating element of tilling machine and the applied coatings of different materials, and the statistical characteristics of the measurements were obtained. The nature of the dependence and the magnitude of the horizontal component of the force of traction resistance of the tiller on the speed of its movement, the absolute humidity of soil, the particle size of the loamy soil and on the depth of its cultivation were determined.

**operating element of tilling machine, traction resistance, humidity, soil sticking, soil friction coefficient, hydrophobic coatings**

*Одержано (Received) 03.12.2019*

*Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2019*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019*