

Видається з 1996 року

Засновник і видавець –
Сумський національний аграрний
університет

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих
медіа: Рішення Національної ради
України з питань телебачення і
радіомовлення № 1176 від 11.04.2024
року. Ідентифікатор медіа R30-03869

Редакційна колегія серії

Головний редактор

Тарельник В'ячеслав Борисович, доктор технічних
наук, професор, професор кафедри технічного
сервісу та галузевого машинобудування, Сумський
національний аграрний університет, м. Суми,
Україна.

Заступник головного редактора

Коноплянченко Євген Владиславович, кандидат
технічних наук, доцент, завідувач кафедри технічного
сервісу та галузевого машинобудування, Сумський
національний аграрний університет, м. Суми,
Україна.

Відповідальний секретар

Думанчук Михайло Юрійович, кандидат технічних
наук, доцент, доцент кафедри технічного сервісу
та галузевого машинобудування, Сумський
національний аграрний університет, м. Суми,
Україна.

Члени редакційної колегії:

Болгова Наталія Вікторівна, кандидат
сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри
технологій та безпеки харчових продуктів,
Сумський національний аграрний університет, Суми,
Україна.

Бородай Дмитро Сергійович, кандидат
архітектури, доцент, завідувач кафедри архітектури
та інженерних вишукувань, Сумський національний
аграрний університет, м. Суми, Україна.

Гапонова Оксана Петрівна, доктор технічних
наук, професор, професор кафедри прикладного
матеріалознавства і технології конструкційних
матеріалів, Сумський державний університет,
м. Суми, Україна.

Дегтярьов Іван Михайлович, кандидат
технічних наук, доцент, доцент кафедри технології
машинобудування, верстатів та інструментів,
Сумський державний університет, м. Суми, Україна.

Капінос Наталія Олександрівна, кандидат
економічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії
та землеустрою, Сумський національний аграрний
університет, м. Суми, Україна.

Мазуренко Ігор Костянтинович, доктор технічних
наук, професор, професор кафедри технології
харчування, Сумський національний аграрний
університет, м. Суми, Україна.

Мельник Оксана Юріївна, кандидат технічних наук,
доцент, завідувач кафедри технології харчування,
Сумський національний аграрний університет,
м. Суми, Україна.

Мороз Микола Миколайович, доктор технічних
наук, професор, завідувач кафедри транспортних
технологій, Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського, м. Кременчук,
Україна.

Соларьов Олександр Олексійович, кандидат
технічних наук, доцент, декан факультету
будівництва та транспорту, доцент кафедри
транспортних технологій, Сумський національний
аграрний університет, м. Суми, Україна.

Срібняк Наталія Миколаївна, кандидат технічних
наук, доцент, доцент кафедри будівельних
конструкцій, Сумський національний аграрний
університет, м. Суми, Україна.

Сукманов Валерій Олександрович, доктор
технічних наук, професор, старший науковий
співробітник, професор кафедри харчових
технологій, Полтавський державний аграрний
університет, м. Полтава, Україна.

Шорінов Олександр Володимирович, кандидат
технічних наук, доцент, доцент кафедри технології
виробництва авіаційних двигунів, Національний
аерокосмічний університет «Харківський авіаційний
інститут», м. Харків, Україна.

Франтішек Ботко, доктор філософії, доцент, доцент
кафедри автомобільних та виробничих технологій,
Кошицький технічний університет, м. Кошице,
Словацька Республіка.

Міхал Гатала, професор, доктор філософії,
почесний доктор, завідувач кафедри автомобільних
та виробничих технологій, Технічний університет в
Кошице, м. Кошице, Словацька Республіка.

Мілан Едл, доктор філософії, доцент, заступник
декана з розвитку та зовнішніх зв'язків факультету
машинобудування, Західночеський університет,
Чеська Республіка.

Паван Кумар, доктор філософії, доцент, науковий
співробітник кафедри технології продукції
тваринництва, коледж ветеринарних наук,
Університет ветеринарії та зоотехніки імені Гуну
Ангад Дева, Лудхіана, Індія.

Грігоре Маріан Поп, доктор філософії, доцент
кафедри проектування та робототехніки, Технічний
університет Клуж-Напока, м. Клуж-Напока, Румунія.

Флорін Попістер, доктор філософії, доцент, доцент
кафедри проектування та робототехніки, Технічний
університет Клуж-Напока, м. Клуж-Напока, Румунія.

Адам Уйма, доктор філософії в інженерії, доцент,
факультет технічних наук (Архітектура), Університет
прикладних наук в Нисі, м. Ниса, Польща.

Міністерство освіти і науки України

ВІСНИК СУМСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік.

Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»

Випуск 2 (64), 2026

ЗМІСТ

Боковець С. П. Формування якості та структурно-механічних властивостей цукерок типу «Трюфель» при використанні порошку топінамбура.....	3
Болгова Н. В., Синенко Т. П. Аналіз сенсорних показників копченого сиру типу халумі.....	8
Бондар Р. О., Гришко І. А. Дослідження впливу параметрів установки для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів на відсоток світлих фракцій на основі планування багатофакторного експерименту.....	13
Васюнін Д. Г. Технологічні етапи модернізації генеруючих потужностей Сумської ТЕЦ: досвід впровадження когенераційних та паливних рішень.....	20
Канівець О. В., Біловод О. І., Тарасенко Д. С., Канівець І. М. Оцінка ефективності футерування внутрішніх поверхонь кузова автомобіля для зниження пошкоджень картоплі під час завантаження.....	26
Коваленко І. А., Манохін А. С. Розрахунково-експериментальна оцінка температури різання при точінні сірого та високоміцного чавунів інструментом з PcbN.....	33
Ковальчук Ю. О., Лісовий І. О., Кепко О. І., Ковальчук А. О., Калнагуз О. М. Удосконалення технологічних режимів лазерного зміцнення деталей сільськогосподарської техніки з використанням комплексного теплового моделювання.....	39
Ковбаса В. П., Прілепо Н. В. Експериментальні дослідження теорії взаємодії колеса та опорної поверхні	46
Кутас С. С., Бондаренко О. О. Методика вибору параметрів свердловинного насоса.....	56
Матісов О. Д., Мельник О. Ю., Євчук Я. В. Використання фітоекстрактів у виробництві хлібобулочних виробів.....	64
Пінчук Р. Р. Вплив ступеня спрацювання долота глибокорозпушувача на рівномірність глибини ходу та якості передпосівного обробітку ґрунту.....	71



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Науковий журнал
«Вісник Сумського національного
аграрного університету»
Серія: Механізація та автоматизація
виробничих процесів»
внесений до переліку наукових
фахових видань України
(категорія «Б») у галузі технічних наук
G9 «Прикладна механіка»,
G11 «Машинобудування (за
спеціалізаціями)»,
H7 «Агроінженерія»,
G13 «Харчові технології»
на підставі Наказів Міністерства
освіти і науки України № 1188
від 24.09.2020 (додаток 5)
та № 491 від 27.04.2023 (додаток 3).

Суб'єкт у сфері друкованих
медіа – Сумський національний
аграрний університет, (вул. Герасима
Кондратьєва, буд. 160, м. Суми,
10021, admin@snaeu.edu.ua,
(0542) 70-11-58)

Науковий журнал «Вісник
Сумського національного аграрного
університету» індексується в
міжнародних наукометричних базах
Index Copernicus, ResearchBib

Матеріали журналу перебувають
у вільному доступі на сайті
<https://snaubulletin.com.ua/index.php/mapp>

Усі статті проходять процедуру
таємного рецензування.
До публікації в журналі
не допускаються матеріали,
якщо є досить підстав вважати,
що вони є плагіатом.

Відповідальність за точність
наведених даних і цитат
покладається на авторів.

Матеріали друкуються українською
та англійською мовами.

У разі цитування посилання на
«Вісник Сумського національного
аграрного університету» обов'язкове

Друкується згідно з рішенням
вченої ради
Сумського національного
аграрного університету
(протокол № 16 від 27.04.2026 р.)

Видавництво і друкарня –
Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса,
вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934-48-28,
+38 (097) 723-06-08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Дата розміщення онлайн –
29.05.2026 р.

Дата друку – 30.05.2026 р.

Тираж 300 пр.

Зам. № 0526/582

ISSN 2708-4892

e-ISSN 2708-4906

© Сумський національний
аграрний університет, 2026

Плис В. С., Дегтярьов І. М., Кушніров П. В., Євтухов А. В., Калашніков С. С. Методологічний підхід до вибору оптимальних типів приводів верстатних пристроїв.....	77
Ratushnyi O. V., Kolisnichenko E. V., Kulinich S. P., Dynnyk O. D., Dumanchuk M. Yu., Shyriaiev D. O. Basic equation of a centrifugal counterrotor machine: justification of the hypothesis of vortex motion.....	87
Ремінь А. В., Кібаков О. Г. Оптимізація операційних процесів за допомогою програми AnyLogic на зерновому терміналі.....	95
Руденко В. П., Зубко В. М. Реалізації в Україні оновлених європейських вимог у сфері технічного регулювання щодо сільськогосподарських транспортних засобів.....	101
Савченко М. Ю., Радчук О. В. Підвищення енергоефективності автоматизованих харчових виробництв і закладів громадського харчування України в умовах енергетичної кризи.....	110
Самілик М. М., Плахтій Д. П., Адамів С. С., Магзер В. М. Моніторинг питомої активності радіонуклідів у сільськогосподарській продукції на території Сумської області.....	116
Сировицький К. Г. Імітаційне моделювання розподілу робочої рідини в об'ємі факелу розпилювання щільної форсунки.....	122
Скриннік В. І., Віголов Є. В., Ваврисевич Я. С. Пектин у технологіях Healthy Food: джерела сировини та способи екстракції.....	131
Соколік С. П., Кожушко А. П., Шуляк М. Л. Математичне моделювання режимів роботи двигуна колісного трактора при тягових роботах.....	141
Сотник М. І., Івченко О. В., Теліженко О. М., Антоненко С. С., Сапожников С. В. Визначення параметрів комплексу генераторів теплової та електричної енергії в системах розподіленої генерації.....	148
Стаднік М. І., Яропуд В. М., Штуць А. А., Бурлака С. А., Рябошапка В. Б., Галушак О. О. Дослідження впливу домішок в паливах на техніко-економічні показники машинно-тракторних агрегатів.....	157
Степанюк А. Р., Тарасенко А. В. Підвищення ефективності теплообміну в теплоакумуючому обладнанні на основі фазозмінних матеріалів: систематичний огляд.....	165
Тарельник В. Б., Коноплянченко Є. В., Позовний О. О., Бондарев С. Г., Доценко А. О., Павловський С. В. Підвищення ресурсу насосів меліоративних систем шляхом вдосконалення вузлів сальникових ущільнень.....	172
Фарісєєв А. Г., Новік Г. В., Савченко А. М., Бойченко К. Ю. Вертикальне озеленення у проєктуванні закладів ресторанного господарства: архітектурні та екологічні аспекти.....	180
Федірко П. П., Девін В. В., Ткачук В. С., Бурдега В. Ю. Виготовлення і математичні моделі апаратів високого тиску підсилених конструкцій.....	188
Шкляр Ю. В. Аналіз методів визначення залишкових напружень у валах після зміцнення поверхневим пластичним деформуванням.....	196

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕОРІЇ ВЗАЄМОДІЇ КОЛЕСА ТА ОПОРНОЇ ПОВЕРХНІ

Ковбаса Володимир Петрович

доктор технічних наук, професор

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

ORCID: 0000-0003-4574-5826

kovbasa.volodymyr@pdau.edu.ua

Прілепо Наталія Володимирівна

старша викладачка

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

ORCID: 0000-0002-4182-7405

nataliia.pryliepo@pdau.edu.ua

Питання ефективності використання сільськогосподарських засобів та їх різноплановий вплив на ґрунт визначаються складними процесами у зоні контакту колеса з деформівною поверхнею. Розроблені раніше математичні моделі, дозволяють теоретично визначити межі контакту та розподіл напружень. Проте, їх висока складність вимагає обов'язкової експериментальної перевірки для підтвердження їх адекватності та можливості подальшого безпосереднього практичного впровадження.

Метою даної роботи є експериментальна перевірка раніше встановлених аналітичних залежностей щодо меж зони контакту та значень деформацій системи «колесо-ґрунт» у реальних експлуатаційних умовах.

Експериментальні дослідження проводилися в умовах приватного фермерського господарства Полтавської області з використанням трактора УТО NLX 1054 з плугом ПЛН 3-35. Для реєстрації вертикальних і горизонтальних зсувів ґрунту застосовувався пристрій УРДП-АФІ з потенціометричними реєстраторами. Для зіставлення даних, отриманих від заглиблених датчиків із теоретичними поверхневими деформаціями було розроблено методику калібрування з визначенням перехідних коефіцієнтів.

У результаті було отримано регресійні рівняння, що описують залежність модуля пружності, коефіцієнта в'язкості та граничного напруження зсуву від щільності та вологості для трьох типів ґрунтів (легко-, середньо- та важкосуглинкових). Встановлено, що збільшення щільності ґрунту суттєво підвищує модуль пружності, тоді як вологість має нелінійний вплив на в'язкість. Порівняння теоретичних кривих вертикальних і горизонтальних зсувів із даними експерименту продемонструвало високий ступінь збігу. Підтверджено адекватність теоретичних моделей із рівнем значущості $\alpha = 0,05$.

Наукова новизна даної статті полягає в експериментальному підтвердженні точності аналітичних моделей взаємодії колеса з ґрунтом. Вперше було отримано функції зміни зсувів у ґрунтового масиві залежно від віддалення від зони контакту для даного класу рушіїв. Зі сторони практичної цінності, результати досліджень дозволяють оптимізувати конструктивні та експлуатаційні параметри колісних рушіїв (навантаження, крутний момент) для підвищення тягової здатності тракторів та зниження існуючого негативного ущільнюючого впливу на орні горизонти ґрунту. Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію геометричних параметрів механічних властивостей шин при відомих механічних властивостях опорної поверхні (ґрунту) при відомих тягових навантаженнях для забезпечення рушійної сили без суттєвого руйнування та ущільнення ґрунту.

Ключові слова: деформівна поверхня, ґрунт, контактна поверхня, зона контакту.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2026.2.8>

Вступ. Ефективність функціонування рухомих енергетичних засобів та їх вплив на екологічний стан сільськогосподарських угідь значною мірою визначаються характером взаємодії колісних рушіїв із деформівною поверхнею. Попередні етапи досліджень дозволили сформулювати ґрунтовний та точний математичний апарат, що базується на методах механіки суцільного середовища та використанні бігармонічних функцій потенціалу (Kovbasa & Priliepo, 2025). Зокрема, було розроблено аналітичні моделі розподілу нормальних і тангенціальних сил у зоні контакту, що дозволило відійти від спрощених емпіричних підходів на користь більш точних рішень теорії пружності.

Логічним розвитком зазначеного циклу робіт стало встановлення аналітичних залежностей для визначення геометричних меж зони контакту та значень абсолютних

деформацій як колеса, так і опорної поверхні (Kovbasa & Priliepo, 2025). Застосування математичних перетворень та розкладів у ряди Маклорена дозволило отримати універсальні формули для розрахунку передньої та задньої меж контакту залежно від різноманітних факторів, у тому числі, прикладеного крутного моменту, вертикального навантаження та фізико-механічних властивостей матеріалів. Ці теоретичні дані стали основою для прогнозування поведінки системи «колесо-поверхня» без необхідності проведення ресурсомістких математичних чи комп'ютерних симуляцій.

Разом із тим, високий ступінь теоретичного обґрунтування та математична складність отриманих моделей потребують обов'язкової експериментальної перевірки в умовах, максимально наближених до реальності. Зіставлення розрахункових показників із

даними практичних випробувань є критично важливим для підтвердження адекватності запропонованих аналітичних рішень та оцінки точності використаних математичних спрощень. Це створює необхідні умови для переходу від теоретичного моделювання до практичного впровадження результатів у процеси проєктування та експлуатації машинно-тракторних агрегатів.

Дана стаття присвячена опису та аналізу результатів практичних випробувань, проведених із метою перевірки раніше встановлених аналітичних залежностей на базі одного із господарств Полтавщини. У статті представлено методику експериментальних досліджень, отримані результати та проведено порівняльний аналіз отриманих емпіричних даних із теоретичними розрахунками. Це дозволяє остаточно оцінити ефективність розробленої методики для оптимізації параметрів колісних рушіїв з метою підвищення їхньої тягово-зчіпної здатності та мінімізації негативного впливу на ґрунт.

Матеріали і методи дослідження. Безпосереднє вимірювання зсувів ґрунту під впливом колісного рушія виконувалося із використанням пристрою для реєстрації деформації ґрунту УРДП-АФІ («Пристрій для реєстрації деформування ґрунту») відповідно до його технічного опису та інструкції з експлуатації.

Цей унікальний прилад призначений для дистанційного вимірювання ущільнюючої дії ходових систем сільськогосподарської техніки переважно у нижніх частинах орного і підорного горизонтів ґрунту (рис. 1). Його робота базується на визначенні зміни об'ємної маси ґрунту при вертикальній деформації.



Рис. 1. Загальний вид пристрою УРДП-АФІ у польових умовах

Прилад має у своєму складі: пластини, що закріплені паралельно одне одному на трубках, які телескопічно з'єднані та мають змогу переміщуватися перпендикулярно їх площинам; систему дистанційного переміщення пластин у вигляді рухливого тросу, що знаходиться у жорсткій оболонці та спеціальне руків'я. Трос, що знаходиться усередині трубок, з'єднаний з однієї із пластин, а оболонка з'єднана з іншою пластиною, за допомогою зігнутої по радіусу жорсткої трубки, яка має зажим для фіксації оболонки.

Індикатор, що реєструє переміщення пластин, закріплений на протилежному кінці оболонки за допомогою регулюючого пристрою. Телескопічно поєднані трубки між пластинами та оболонка троса захищені еластичними трубками.

Ґрунт під дією навантаження деформується, що спричинює переміщення пластин, тросу всередині оболонки та штоку індикатора, зміни показників якого відповідають деформації шару ґрунту між пластинами. Конструкція приладу дозволяє визначення динаміки щільності ґрунту без порушення щільності шару, що вивчається, дистанційної передачі переміщення пластин за межі зони деформації та усунення тертя із ґрунтом і вмерзання рухомих частин пристрою (рис. 2).

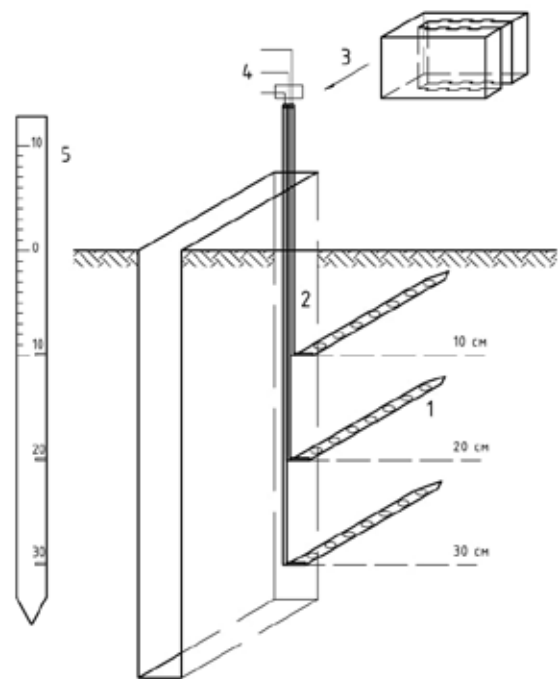


Рис. 2. Схема будови та встановлення системи датчиків вертикальної деформації:

1 – пластини; 2 – система стержнів у захисних трубках; 3 – компоненту колодка; 4 – горизонтальні частини стержнів для вимірювання зміни відстані між пластинами; 5 – шаблон для встановлення

Датчики переміщень (рис. 2) розміщувалися у заздалегідь відритих траншеях у зоні наступного проходження колеса трактора в такий спосіб, щоб вони дозволили зареєструвати як горизонтальні, так і вертикальні зміщення ґрунту (рис. 3).

Після встановлення сенсорів в цілинний ґрунт, бралися зразки для подальшого визначення його механічних властивостей, а сама траншея закопувалася із ущільненням до початкового рівня. На місці реєструючих елементів переміщень встановлювалися потенціометричні реєстратори переміщень (рис. 4), які, у свою чергу, передавали інформацію до комп'ютера. Покази сенсорів переміщень за допомогою потенціометрів виводилися у положення «0».



Рис. 3. Встановлені датчики вертикальної деформації



Рис. 4. Загальний вигляд зони розташування датчиків деформації

Результати теоретичних досліджень дали нам результати зміщення ґрунту безпосередньо в зоні контакту колесо-ґрунт (Kovbasa & Priliero, 2025a; Kovbasa & Priliero, 2025b). З урахуванням того, що сенсори розташовувалися на деякій глибині від поверхні ґрунту, то згідно з теорією механіки суцільних середовищ, методи якої використовуються в теоретичних дослідженнях переміщення, деформації, по мірі віддалення від прикладеного навантаження, мають спадати лінійно. Проте, коефіцієнт падіння таких зміщень має бути визначений експериментально. Для цього проводилися додаткові дослідження для встановлення передавальної функції падіння зсувів у міру віддалення датчика від прикладеного навантаження.

За їхніми результатами було зафіксовано показники переміщення датчиків, розміщених у ґрунтовому масиві, відповідно до прикладених дотичних зусиль та статичного навантаження від масивної плити (рис. 5).

Викопувалась траншея аналогічно із попередньо зазначеним методом. При відомих координатах розміщення від поверхні поля укладалися датчики. Траншея закопувалась з ущільненням ґрунту. Покази датчиків переміщень виводилися в нульові положення. Далі,

у цьому місці укладалася плита великої маси m і до неї докладалися дотичні зусилля, що реєструвалися динамометром. Реєструвалися відповідні показання датчиків.

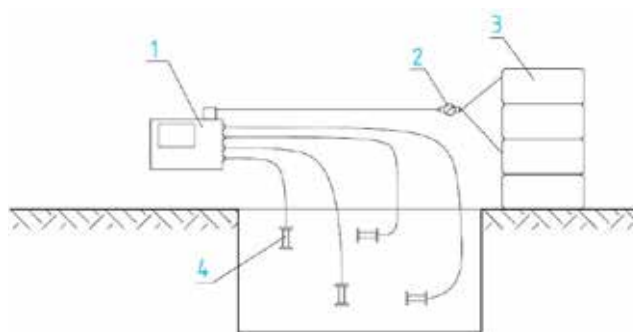


Рис. 5. Схема процесу калібрування датчиків зміщень ґрунту: 1 – реєструючий пристрій; 2 – динамометр; 3 – масивна плита; 4 – датчики деформації

Використовуючи модулі пружності об'ємних та зсувних деформацій за умови, що $P_m = 0$ і $r = 100$ (тобто, є значним), визначалися зміщення ґрунту в горизонтальному та вертикальному напрямках на поверхні контакту, які порівнювалися із показаннями датчиків зсувів.

При цьому ширина плити приймалася рівною b , а зони контакту відповідали розмірам плити. Зіставлення показань датчиків з виконаними обчисленнями, дозволили при триразовій повторності визначити коефіцієнти переведення для заглиблених сенсорів переміщень (рис. 3).

Результати досліджень та обговорення. За результатами проведених досліджень була здійснена обробка результатів експерименту, метою якої було одержання регресивної моделі, що характеризувала б вплив різних факторів на енергетичні показники обробітку ґрунту.

Для оцінки відтворюваності даних експерименту використовували критерій Кохрена шляхом порівняння його розрахункового значення із табличним (Kovbasa, 2011):

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2} \leq G_{\text{табл}}(0,05; n; f_u), \quad (1)$$

де $G_{\text{табл}}(0,05; n; f_u)$ – табличне значення критерію Кохрена при 5-му рівні значимості, при числі дослідів n та числі ступенів вільності $f_u = m - 1$ з числом повторів m ;

$S_u^2, S_{u \max}^2$ – дисперсія на u -му рівні та її максимальне значення.

Дисперсія визначалася за такою формулою (Kovbasa, 2011):

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{uik} - \bar{y}_u)^2, \quad (2)$$

де y_{uik} – значення вихідного параметра відповідної повторності дослідів.

Похибка досліду розраховувалася за формулою:

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n S_u^2. \quad (3)$$

Після підтвердження відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена, визначалися коефіцієнти регресійної моделі:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{y}_i; b_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_p \bar{y}; b_{pr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_p X_r \bar{y}. \quad (4)$$

У загальному випадку рівняння регресії має вигляд:

$$Y = b_0 + b_p X_p + \dots + b_{pr} X_p X_r + \dots \quad (5)$$

Це рівняння визначає вплив окремих чинників та їх дію на функцію відгуку Y .

Адекватність рівняння регресії, яка оцінює відповідність досліджуваному процесу, перевірялася за критерієм Фішера (Bidiuk et al., 2023):

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F_{мабл}(0,05; f_{ad}; f_y), \quad (6)$$

де $S_{ad}^2 = \frac{1}{f_{ad}} \sum_{u=1}^n (y - \bar{y}_u)^2$ – дисперсія адекватності;

$f_{ad} = n - k - 1$ – число ступенів вільності дисперсії адекватності при кількості факторів k ;

$f_y = \text{щ} - 1$ – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності.

Після перевірки адекватності, за критерієм Стюдента оцінювалася значущість коефіцієнтів регресії (Kovbasa, 2011).

Коефіцієнт регресії є значущим за умови:

$$|b_i| \geq t_{мабл}(0,05; f_y) \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

де $t_{мабл}(0,05; f_y)$ – табличне значення критерію Стюдента при 5-му рівні значимості.

Для визначення щільності зв'язку між вихідним параметром та фактором, а також зв'язку між факторами, проводився кореляційний аналіз (Kovbasa, 2011; Zotsenko et al., 2003). Кореляційний коефіцієнт між x і y визначався із залежності:

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{(S_x S_y)}, \quad (8)$$

де S_x, S_y – середньоквадратичне відхилення відповідних величин;

K_{xy} – кореляційний момент.

Якщо коефіцієнт кореляції дорівнює нулю, то величини є некорельованими. Якщо коефіцієнт кореляції більший за 0,7, то це вказує на сильний кореляційний зв'язок, 0,3...0,7 – середній, менший за 0,3 – на слабкий кореляційний зв'язок. При цьому середньоквадратична похибка коефіцієнта кореляції визначається за рівнянням:

$$S_r = \sqrt{(1 - r_{xy}^2) / (n - 2)}. \quad (9)$$

Зв'язок між величинами є важливим за умови, що розрахунковий критерій Стюдента є більшим за його табличне значення (Scott, 1908). Тобто:

$$t_r = r_{xy} / S_r \geq t_{мабл}. \quad (10)$$

За одночасного впливу кількох величин на значення вихідного параметра доцільно використовувати множинний коефіцієнт кореляції. Щільність зв'язку величини x з величинами y, z можна визначити за формулою:

$$R_{x,yz} = \sqrt{\frac{r_{xy}^2 + r_{xz}^2 - 2r_{xy}r_{xz}r_{yz}}{1 - r_{yz}^2}}. \quad (11)$$

Розрахункове значення множинного коефіцієнта кореляції є позитивною величиною, тобто вона перебуває у межах від 0 до 1. У тих ситуаціях, коли значення множинного коефіцієнта кореляції є нульовим, це говорить про відсутність лінійного зв'язку між величинами, що, у цей же час, не виключає можливості існування зв'язку нелінійного. У випадку, коли коефіцієнт рівний 1, то це означає, що лінійний зв'язок існує, а всі експериментальні дані лежать у одній площині, що є поверхнею відгуку. Квадрат коефіцієнта кореляції є детермінацією (d), що виражає залежність однієї величини від іншої.

У процесі проведення досліджень змінними були координати у вертикальному та горизонтальному напрямку розташування датчиків та вертикальне навантаження на плиту $P = mg$, а отже, й дотична сила тяги. Для кожного з варіантів розраховувалися зсуви ґрунту на поверхні контакту при відомих модулях пружності E та коефіцієнтах поперечної деформації ν_p . Дані для розрахункових характеристик: $E_p = 1.1 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $r = 100 \text{ м}$, $E_k = 1.1 \cdot 10^{20} \text{ Па}$, $P_m = 0$.

Після цього проводився розрахунок коефіцієнтів переходу від заглибленого зсуву до зсуву на поверхні. Результати проведених досліджень наведено у табл. 1.

Таблиця 1

№ з/п	m , кг	T , Н	Глибина датчика h_p , м	Глибина датчика h_e , м	Реальний зсув u_p , м	Реальний зсув v_p , м	Розрахунковий зсув u_p , м $h=0$	Розрахунковий зсув v_p , м $h=0$	Коефіцієнт перерахунку для u_p	Коефіцієнт перерахунку для v_p
1	100	350	-0.05	-0.05	-0.0005	-0.0085	-0.0076	-0.0127	1.56	1.67
2	100	350	-0.10	-0.10	-0.0025	-0.0042			2.00	2.00
3	200	700	-0.05	-0.05	-0.0050	-0.0170	-0.0153	-0.0254	1.51	1.50
4	200	700	-0.10	-0.10	-0.010	-0.0085			2.00	2.00
5	300	1050	-0.05	-0.05	-0.0152	-0.0255	-0.0229	-0.0382	1.51	1.66
6	300	1050	-0.10	-0.10	-0.0076	-0.0127			2.00	1.80
Середнє значення									1.76	1.77

Робота з результатами експериментальних досліджень здійснювалася методами регресійного аналізу з використанням програмного забезпечення для статистичної обробки і аналізу інформації. У результаті обробки даних експериментальних досліджень що стосувалися зв'язку реологічних властивостей ґрунту з фізико-механічними, нами було отримано регресійні рівняння зв'язку модуля пружності G коефіцієнта в'язкості η та граничного напруження зсуву τ_s із щільністю ρ_s й вологістю W для ґрунтів трьох типів.

Для легкосуглинкового ґрунту рівняння регресії матимуть наступний вигляд:

- модуль пружності зсувних деформацій:

$$G_1 = 7,04551 \cdot 10^6 + 84534W^2 - 2448,83W\rho_s + 14,4376\rho_s^2. \quad (12)$$

- модуль в'язкості зсувних деформацій:

$$\eta_1 = 39115,6 - \frac{75221,8}{W^{1/3}} + 8,22231\rho_s - 0,704829W\rho_s. \quad (13)$$

Графічно залежності (12) та (13) представлені на рис. 6.

Для середньосуглинкового ґрунту, аналогічним чином, рівняння регресії матимуть вигляд:

- модуль пружності зсувних деформацій:

$$G_2 = 1,92966 \cdot 10^6 + 115457W^2 - 3011,12W\rho_s + 19,8995\rho_s^2. \quad (14)$$

- модуль в'язкості зсувних деформацій:

$$\eta_2 = 105359 - \frac{226990}{W^{1/3}} + 17,3435\rho_s - 1,43009W\rho_s. \quad (15)$$

Графічно залежності (14) та (15) представлені на рис. 7.

Для важкосуглинкового ґрунту рівняння регресії мають вигляд:

- модуль пружності зсувних деформацій:

$$G_3 = 9,08269 \cdot 10^6 + 31534,7W^2 - 1796,41W\rho_s + 14,5028\rho_s^2. \quad (16)$$

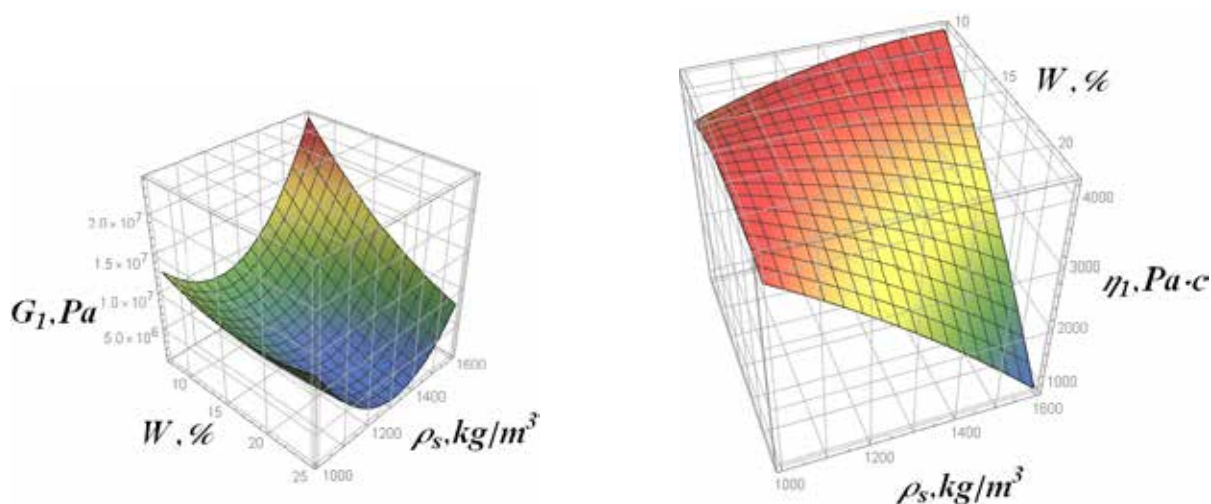


Рис. 6. Залежності модуля пружності G та коефіцієнта в'язкості η від щільності та вологості для легкосуглинкового ґрунту

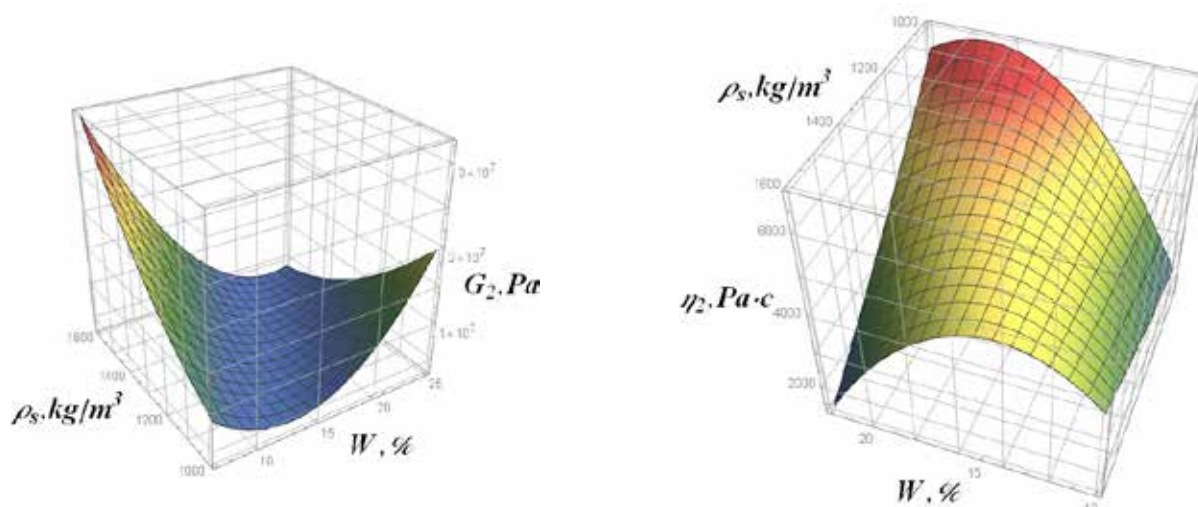


Рис. 7. Залежності модуля пружності G та коефіцієнта в'язкості η від щільності та вологості для середньосуглинкового ґрунту

– модуль в'язкості зсувних деформацій:

$$\eta_3 = 54872,4 - \frac{106820}{W^{1/3}} + 4,97571\rho_s - 0,578511W\rho_s. \quad (17)$$

Графічно залежності (16) та (17) представлені на рис. 8.

Рівняння регресії зв'язку граничного напруження зсуву τ_s із щільністю та вологістю для легкосуглинкового ґрунту:

$$\begin{aligned} \tau_{s1} = & 75802,7 + 5052,15W^3 + 69,5619W^4 - \\ & - 119,49W\rho_s - 3,29046W^3\rho_s + 0,0547W^2\rho_s^2 - \\ & - 0,000374W\rho_s^3 + 8,9985 \cdot 10^{-7}\rho_s^4. \end{aligned} \quad (18)$$

Для середньосуглинкового ґрунту рівняння регресії мають вигляд:

$$\begin{aligned} \tau_{s2} = & 135765 + 4652,23W^3 + 35,669W^4 - 133,676W\rho_s - \\ & - 2,04981W^3\rho_s + 0,815994\rho_s^2 + 0,0419619W^2\rho_s^2 - \\ & - 0,0003595W\rho_s^3 + 1,09734 \cdot 10^{-6}\rho_s^4. \end{aligned} \quad (19)$$

Для важкосуглинкового ґрунту рівняння регресії мають вигляд:

$$\begin{aligned} \tau_{s3} = & 432154 + 6727,4W^3 + 25,2508W^4 - 231,121W\rho_s - \\ & - 1,73499W^3\rho_s + 1,39028\rho_s^2 + 0,0402397W^2\rho_s^2 - \\ & - 0,00035855W\rho_s^3 + 1,07841 \cdot 10^{-6}\rho_s^4. \end{aligned} \quad (20)$$

Графічно залежності (18)–(20) представлені на рис. 9.

Аналізуючи залежності (12), (13) та (16), можна зробити наступний висновок: збільшення щільності ґрунту веде до збільшення модуля пружності, причому зміна вологості ґрунту не має суттєвого впливу на величину модуля пружності для легкосуглинкового та середньосуглинкового ґрунтів. Зв'язок коефіцієнта в'язкості зі щільністю й вологістю ґрунту (залежностей (13), (15), (17)) вказує на те, що для легкосуглинкового та середньосуглинкового ґрунтів зміна вологості має більш суттєвий вплив на величину коефіцієнта в'язкості, ніж зміна щільності.

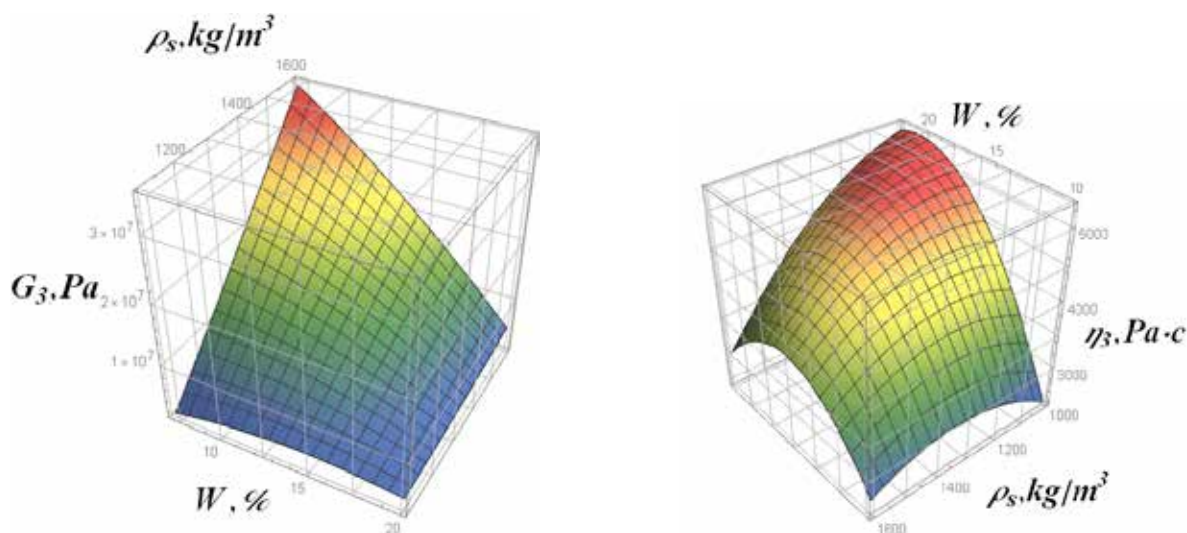


Рис. 8. Залежності модуля пружності G та коефіцієнта в'язкості η_3 від щільності та вологості для важкосуглинкового ґрунту

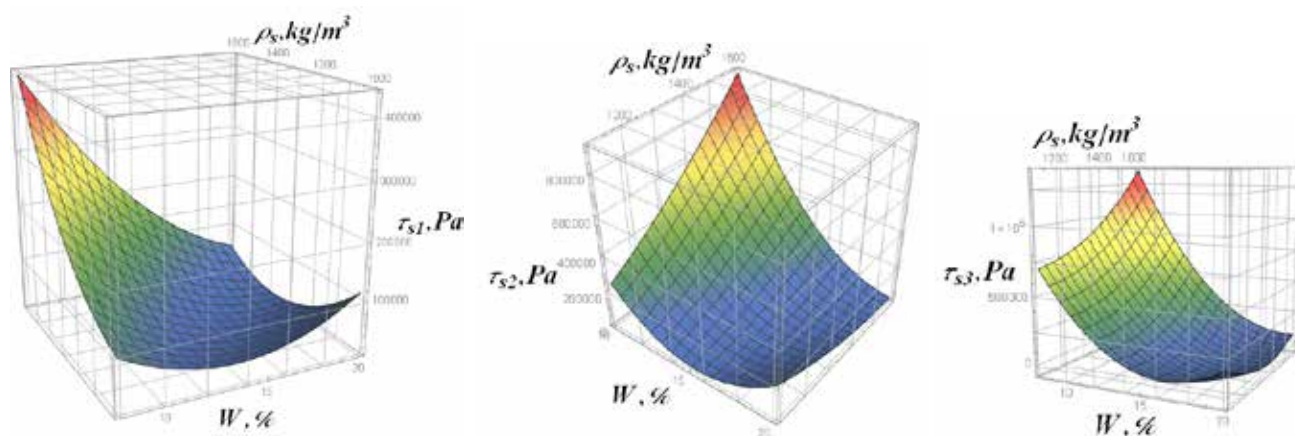
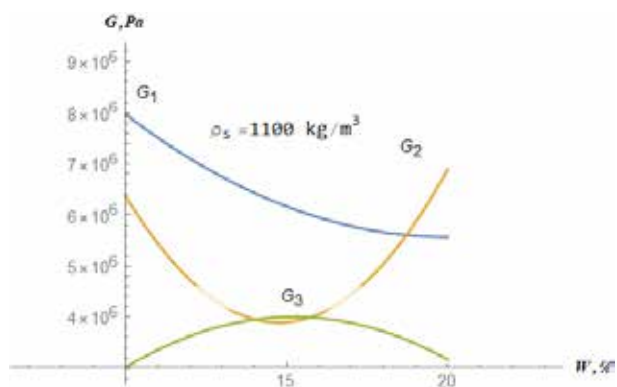
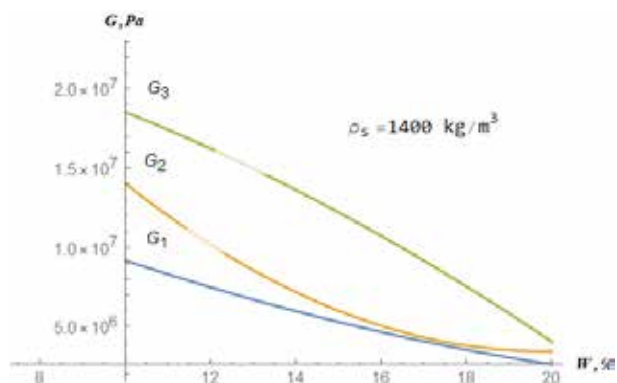


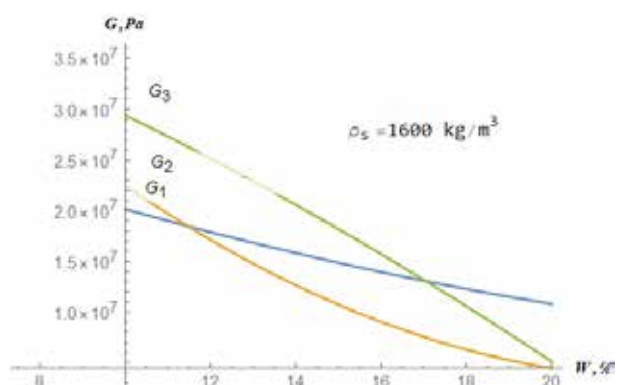
Рис. 9. Залежності граничного напруження зсуву від щільності та вологості для легкосуглинкового, середньосуглинкового та важкосуглинкового ґрунтів



А



Б

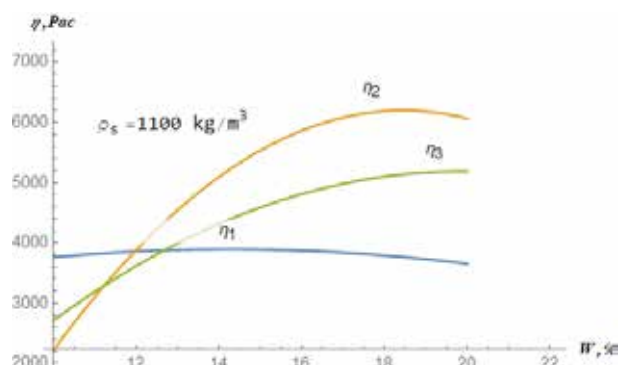


В

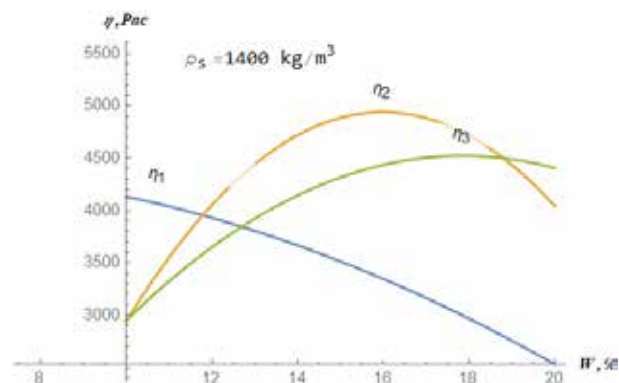
Рис. 10. Залежності модуля пружності від вологості для легкосуглинкового, середньосуглинкового і важкосуглинкового ґрунтів, при: А – $\rho_s = 1100 \text{ кг/м}^3$, Б – $\rho_s = 1400 \text{ кг/м}^3$, В – $\rho_s = 1600 \text{ кг/м}^3$

Ми можемо бачити, що зміна вологості ґрунту з 8 до 12 % викликає збільшення коефіцієнта в'язкості. Подальше ж збільшення вологості призводить до зменшення коефіцієнта в'язкості η_1 . Для важкосуглинкового ґрунту зміна вологості ґрунту істотно не впливає на цей показник.

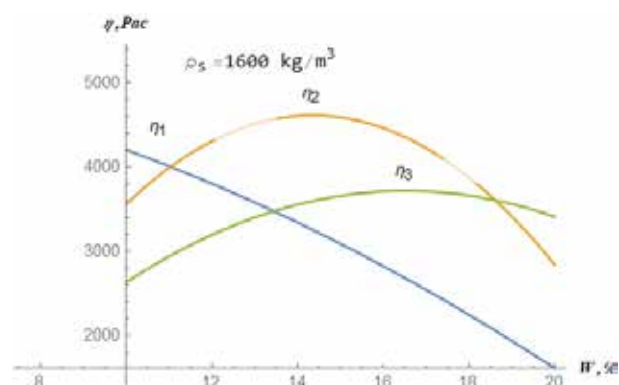
Аналіз залежностей зв'язку граничного напруження зсуву τ_s із щільністю та вологістю ґрунту (18)–(20) дозволяє зробити висновок, що для легкосуглинкового ґрунту при високих значеннях щільності, зміна вологості ґрунту від 10 до 12 %, викликає зменшення граничного



А



Б



В

Рис. 11. Залежності коефіцієнта в'язкості від вологості для легкосуглинкового, середньосуглинкового і важкосуглинкового ґрунтів, при: А – $\rho_s = 1100 \text{ кг/м}^3$, Б – $\rho_s = 1400 \text{ кг/м}^3$, В – $\rho_s = 1600 \text{ кг/м}^3$

напруження зсуву τ_s . Подальше збільшення вологості ґрунту веде до подальшого зменшення величини граничного напруження зсуву τ_s . Для середньосуглинкових та важкосуглинкових ґрунтів при малих значеннях щільності зміна вологості не викликає змін цього показника. При великих значеннях густини ґрунту збільшення вологості ґрунту викликає зменшення величини граничного напруження зсуву τ_s .

Для встановлення адекватності отриманих теоретичних залежностей для визначення зон контакту деформівного колеса з деформівною поверхнею, та

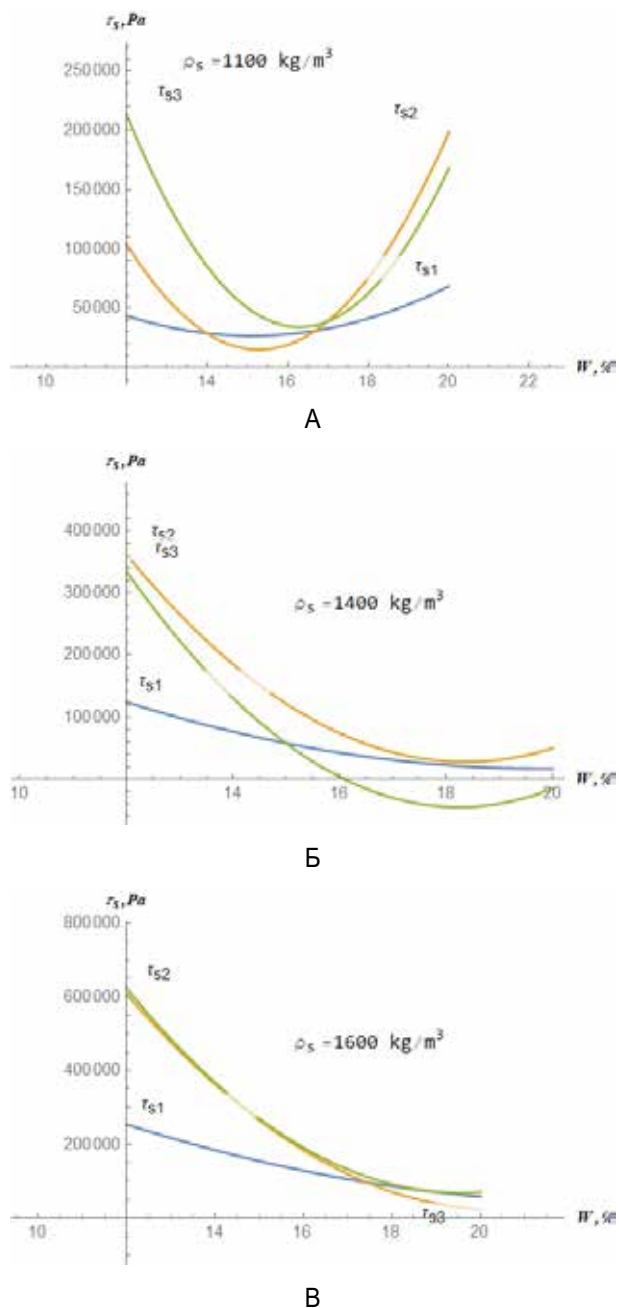


Рис. 12. Залежності граничного напруження зсуву від вологості для легкосуглинкового, середньосуглинкового і важкосуглинкового ґрунтів, при: А – $\rho_s = 1100 \text{ кг/м}^3$, Б – $\rho_s = 1400 \text{ кг/м}^3$, В – $\rho_s = 1600 \text{ кг/м}^3$

залежностей зсувів контактуючих поверхонь, що зв'язують прикладені до колеса навантаження з урахуванням деформаційних властивостей колеса і ґрунту, а також геометричні параметри колеса, були проведені експериментальні дослідження впливу прикладеного до колеса крутного моменту на величини зсувів.

При цьому враховувався той фактор, що прикладений крутний момент M був найбільш істотною величиною, яка впливала на параметри зони контакту й зсуву поверхонь, в які входили величини граней контакту. Крім того, виходячи з можливостей проведення

експериментальних досліджень, саме цей експеримент можна було найбільш просто реалізувати, оскільки крутний момент M на колесі залежить від крутного моменту двигуна та передатного відношення трансмісії, що можуть бути задані дискретно.

Датчики вимірювань зсувів розташовувалися у шаховому порядку на глибині 0,1 та 0,15 м від поверхні поля. Результати максимальних зсувів, що визначаються датчиками, зазнали статистичної обробки згідно із наведеною вище методикою.

Технічні та експлуатаційні характеристики трактора УТО NLX 1054, які впливали на зміщення ґрунту під дією його ходових систем, такі (УТО Group, б.д.):

- Потужність двигуна: 105 л.с. (77,7 кВт)
- Колісна формула: 4x4 (повний привід)
- Габаритна довжина: 4350 мм
- Габаритна ширина: 2030 мм
- Габаритна висота: 2970 мм
- Колісна база: 2314 мм
- Маса: 4680 кг
- Максимальне тягове зусилля трактора УТО NLX

1054 на гаку становить 32,87 кН.

- Номінальне тягове зусилля 21,7 кН.

Шини та противаги

- Передні шини: 13,6 – 24
- Задні шини: 16,9 – 34 (ширина профілю $B = 0,43 \text{ м}$)

- Радіус колеса (згідно з прийнятим у теоретичному аналізі принципом) $r_k = 0,780 \text{ м}$.

Основні характеристики

- Передні противаги: 10 шт. х 40 кг

Джерела вказують загальну експлуатаційну масу (без противаг) близько 4100 кг, а з повним комплектом противаг - до 4820 кг.

- Передні противаги: 10 шт. по 40 кг (всього 400 кг).
- Задні (колісні) противаги: 4 шт. по 50 кг (всього 200 кг).

Розподіл ваги без навісного обладнання зазвичай проектується виробником для забезпечення оптимального зчеплення та керованості, але конкретні цифри для цієї моделі у відкритому доступі не публікувалися.

Типовий розподіл маси (без навісного обладнання):

- На передню вісь: від 53% до 60% загальної маси.
- На задню вісь: від 40% до 47% загальної маси.
- Таким чином, на задню вісь трактора припадає

маса 2169 кг,

- На одне заднє колесо $m = 1085 \text{ кг}$.

З огляду на навішений плуг ПЛН 3-35, маса якого становить 450 кг, на одне колесо задньої осі припадає маса $m = 1310 \text{ кг}$.

Номінальний крутний момент, який припадає на одне заднє колесо при рівномірному розподілі тяги по колесах, становить $M_k = 4230 \text{ Нм}$.

$$m = 1310 \text{ кг}, M_k = 4230 \text{ Нм}, B = 0.43 \text{ м}, r_k = 0.780 \text{ м}.$$

Маса трикорпусного навісного плуга ПЛН 3-35 зазвичай становить близько 410–450 кг.

- Стандартна маса: приблизно 410 кг ($\pm 20 \text{ кг}$).

- З передпflugниками: деякі модифікації з додатковим обладнанням (передпflugниками) можуть важити до 450 кг.



Рис. 13. Загальний вигляд трактора УТО NLX 1054 з навісним плугом під час випробувань

Під час проведення експериментальних досліджень модуль пружності лінійних деформацій ґрунту $E = 1.07 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $(E = 2(1 + \nu)G)$ коефіцієнт бічного розширення ґрунту становив $\nu = 0,39$.

Зіставлення отриманих експериментальних залежностей із результатами аналітичних досліджень свідчить про адекватність отриманих теоретичних залежностей.

На різній глибині, у залежності від наближення та віддалення центру ведучого колеса трактора, залежність зміни горизонтальних зсувів ґрунту представлена наступними кривими: помаранчеві для теоретичної залежності, червоні – для експериментальних показників на глибині у 0,05 м., зелені – для експериментальних показників на глибині у 0,1 м., блакитні – для експериментальних показників на глибині у 0,15 м (рис. 14).

На різній глибині, у залежності від наближення та віддалення центру ведучого колеса трактора, залежність зміни вертикальних зсувів ґрунту представлена наступними кривими: помаранчеві для теоретичної залежності, червоні – для експериментальних

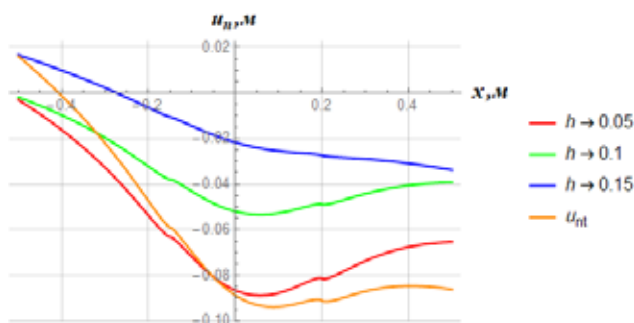


Рис. 14. Залежність зміни горизонтальних зсувів ґрунту (експериментальні та теоретичні криві)

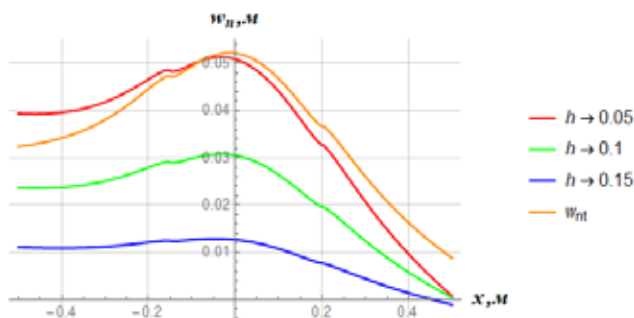


Рис. 15. Залежність зміни вертикальних зсувів ґрунту (експериментальні та теоретичні криві)

показників на глибині у 0,05 м., зелені – для експериментальних показників на глибині у 0,1 м., блакитні – для експериментальних показників на глибині у 0,15 м (рис. 15).

В теоретичні залежності компонент абсолютних вертикальних та горизонтальних деформацій були вставлені значення геометричних параметрів, силових величин та механічних властивостей, що відповідали параметрам колеса та властивостей ґрунту експерименту (Kovbasa & Priliero, 2025b):

$$w_k \xi \eta = -\frac{1}{4Gk\pi} \iint \left(1 - \frac{2\xi^2}{r^2} - \frac{2k^4 \eta^2 (r^2 - 6\xi^2)}{r^4} \right) \left(\frac{\frac{Fzkk(-3+2vk)}{\sqrt{z^2 + (y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} + \frac{(-1+2vk)Fxkk}{\sqrt{z^2 + (y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}}}{\sqrt{z^2 + (y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} \right) d\xi d\eta;$$

$$u_k \xi \eta = -\frac{1}{4Gk\pi} \iint \left(1 - \frac{2\xi^2}{r^2} - \frac{2k^4 \eta^2 (r^2 - 6\xi^2)}{r^4} \right) \left(\frac{\frac{Fzkk}{\sqrt{z^2 + (y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} + \frac{Fxkk}{\sqrt{z^2 + (y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}}}{\sqrt{z^2 + (y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} \right) d\xi d\eta.$$

Слід зазначити, що відмінність експериментальних кривих від теоретичних пояснюється наведеною таблицею 1.1, яка враховує вплив глибини закладення датчиків, тобто, зв'язок зменшення деформацій у залежності від прикладеного навантаження та відстані.

Висновки. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлена адекватність попередніх теоретичних досліджень. Для співставлення були використані теоретичні залежності абсолютних вертикальних та горизонтальних деформацій

ґрунту в яких геометричні параметри колеса, механічні властивості колеса та ґрунту, величини навантажень були прийняті такими, які були в реальному експерименті.

Співставлення експериментальних результатів з теоретичними дозволило зробити висновок, що теоретичні залежності адекватні експериментальним з рівнем значимості $\alpha = 0,05$.

Бібліографічні посилання:

1. Bidiuk, P. I., Danylov V. Ya., Zhyrov, O. L. (2023). *Prykladna statystyka: navch. posibnyk* [Applied Statistics: Study Guide]. Kyiv, KPI im. Ihoria Sikorskoho, 186 s. (in Ukrainian)
2. Kovbasa V., & Priliepo N. (2025). Determination of analytical dependencies of distributed forces in a deformable wheel – deformable surface contact zone. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(1(83)), 6–12. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.329471>
3. Kovbasa, V. P. (2011). Do vyznachennia fizychnykh rivnian pruzhnoviazko-plastychnoho seredovyshcha z umovoiu ruinuвання za modyfikovanyim kryteriiem Kulona-Mora [On the Determination of Physical Equations for an Elasto-Visco-Plastic Medium with a Failure Condition Based on the Modified Mohr-Coulomb Criterion]. *Pratsi TDATU*, 11(2), 161–174. www.nbu.gov.ua/portal/Chem_Biol/Ptdau/2011_11_2/index.html (in Ukrainian)
4. Kovbasa, V., & Priliepo, N. (2025). Analytical determination of absolute deformations and boundaries of the contact zone of a deformable wheel with a deformable surface. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1(86)), 26–33. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.346717>
5. Scott, J. (1908). *The complete text-book of Farm Engineering*. London, Crosby Look-Wood, 105 p.
6. Sheludchenko, B. A. (1993). *Ahromekhanika gruntiv*. [Soil Agromechanics]. Zhytomyr, Polissia, 290 s. (in Ukrainian)
7. YTO Group. *80-115HP Tractor, NLX/NLY Series*. <https://ytocorp.com/5-5-1-80-115hp-tractor-nlx-nly-series.html>
8. Zotsenko, M. L., Kovalenko, V. I., Yakovliev, A. V. (2003). *Inzhenerna heolohiia. Mekhanika gruntiv, osnovy i fundamente: pidruchnyk*. [Engineering Geology. Soil Mechanics, Bases and Foundations: Textbook]. Poltava, PolNTU, 446 s. (in Ukrainian)

Kovbasa V. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Priliepo N. V., Senior Lecturer, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Experimental research on the theory of interaction between the wheel and the support surface

The efficiency of agricultural machinery and its impact on the soil are determined by the different and complex processes within the contact zone between the wheel and the deformable surface. Previously developed mathematical models allow for the theoretical determination of contact boundaries and stress distribution. However, their high complexity needs mandatory experimental verification to confirm their adequacy and the possibility of further direct practical implementation.

The aim of this work is the experimental verification of previously established analytical dependencies for the boundaries of the contact zone and the deformation values of the «wheel-soil» system under real operating conditions.

Experimental studies were conducted on a private farm in the Poltava region using a YTO NLX 1054 tractor with a PLN 3-35 plow. To register vertical and horizontal soil shifts, a URDP-AFI device with potentiometric recorders was used. To compare data obtained from buried sensors during experiments with theoretical surface deformations, a calibration methodology was developed to determine transition coefficients.

As a result, regression equations were obtained describing the dependence of the elastic modulus, viscosity coefficient, and limit shear stress on density and moisture for three types of soil (light, medium, and heavy loam). It was established that increasing soil density significantly increases the elastic modulus, while moisture has a non-linear effect on viscosity. A comparison of theoretical curves for vertical and horizontal shifts with experimental data demonstrated a high degree of convergence. The adequacy of the theoretical models was confirmed at a significance level of $\alpha=0.05$.

The scientific novelty of this article lies in the experimental confirmation of the accuracy of analytical models of wheel-soil interaction. For the first time, functions of displacement changes in the soil mass depending on the distance from the contact zone were obtained for this class of propulsion units. In terms of practical value, the research results will allow for the optimization of design and operational parameters of wheeled propulsion units (load, torque) to increase the traction capacity of tractors and reduce the existing negative compacting impact on arable soil horizons. Further research will be aimed at optimizing the geometric parameters and mechanical properties of tires based on known mechanical properties of the supporting surface (soil) and known traction loads to ensure driving force without significant soil destruction or compaction.

Key words: deformable surface, soil, contact surface, contact zone.



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026