

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Сивулька Петро Михайлович

УДК 631.37

ДИСЕРТАЦІЯ

**Обґрунтування оперативної оцінки колісних машин з умов агроєкології
та твердості ґрунту**

Галузь знань 13 — Механічна інженерія

133 — Галузеве машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Петро СИВУЛЬКА

Науковий керівник:

Крайник Любомир Васильович,
доктор технічних наук, професор

ЛЬВІВ 2026

АНОТАЦІЯ

Сивулька П.М. «Обґрунтування оперативної оцінки колісних машин з умов агроєкології та твердості ґрунту». — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (13 — Механічна інженерія). — Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, Львів, 2026.

Інтенсифікація обробітку аграрних угідь з зростаючим використанням високопродуктивних, але значно важчих машинно-тракторних агрегатів (МТА), насамперед колісних, зумовлює надмірне ущільнення ґрунту, що спричиняє не тільки втрати урожаю, але і повільну деградацію землі – її родючості. Більша частина аграрних угідь України знаходиться у користуванні, часто у нетривалій оренді, великих агрохолдингів з домінуючим, зростаючим використанням важких, високопродуктивних МТА (колісних тракторів класів тяги 3 – 6 і т.п.), що і спричиняють переущільнення земель. Існуюча нормативна база щодо агроєкологічності МТА – ДСТУ 4428, 4521 та 4977 – опрацьовані фактично ще у 1980-х роках і базуються на трудомісткій і тривалій оцінці, фактично лабораторній, щільності та вологості ґрунту, однакового типорозміру шин обох осей тракторів і не враховують реалій доущільнення ґрунту в колії задньої осі та нерівних навантажень на осі. Розвиток інструментарію оперативної оцінки стану ґрунту: твердості – п'єзоелектричними пенетрометрами – та і вологості – зондами, а також відповідних методологій у ЄС та США, дозволяють опрацювання методики оперативної оцінки МТА з умов агроєкології і поточного стану конкретного поля.

Дисертаційна робота присвячена обґрунтуванню оперативної агроєкологічної оцінки колісної техніки щодо ущільнення ґрунту на базі

заміру твердості, що корелює з щільністю та вологістю, і заданих характеристик шин та навантажень на осі.

У першому розділі проведено огляд та аналіз вітчизняних та зарубіжних досліджень щодо ущільнення колісною технікою аграрних угідь, нормативних баз у цій сфері в Україні та ЄС (насамперед на прикладі ФРН) та розвитку сучасного інструментарію оцінки фізико-механічного стану ґрунту. Окрім цього проведено аналіз оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту, як опорної поверхні, у дослідженнях щодо військової автотехніки, зокрема так зв. WES – методики армій НАТО, що передбачає оперативну оцінку ґрунтових поверхонь та цілий ряд емпіричних залежностей розрахунку параметрів руху колісних машин.

Зокрема це дослідження у сфері ґрунтознавства Медведєва В.В., Лактіонової Т.М., Леонтьєвої Т.Н., Писаренка В.М., Погромської Я.А., Позняка С.П. і інш., а також роботи щодо агроєкології і ущільнення орних ґрунтів Адамчука В.В., Антощенкова Р.В., Білецького В.Р., Писаренка В.М., Реброва О.Ю., Кувачова В.П., Надикто В.Т., Налобіної О.О. та зарубіжних вчених Soehne W., Raghaven G.S., Mc Kyes E., Chasse M., Diserens E., Smith D.L., Dickson J.W., Bolling I.H., Geischer R., Marusiak M., Neruda J., Bolling I.H., Tijink F.G.J., Spoor G., Koolen A.J., Kupers H., Brunotte J., Brandhuber R., Vorderbruegge R., Schrader S. а також Ксєневич І.П., Скотников В.А., Ляско М.І., Гапоненко В.С., Панасюк А.М., Кашбулганов Р.А. і інш. Проведено аналіз сучасної законодавчої нормативної бази у цій сфері в Україні та ФРН. Розглянуто також дослідження механіки ґрунтів в аспекті взаємодії з колісною технікою за WES – методологією НАТО (що прийнята і у абсолютній більшості армій світу) та оперативну оцінку фізико-механічних характеристик ґрунту як опорної поверхні на підставі заміру твердості — стандартизованим конусним наконечником CI (cone index) - роботи Wong Y.J., Kumar A., Chen Y., Sadek M.A.A., Sayedahmed A. а також Грубеля М.Г. та Крайника Л.В.

Констатовано актуальність проблеми щодо понад 80% площ орних земель України, насамперед у весняний та осінній періоди механічного

обробітку ґрунту та збирання врожаю, при використанні колісних тракторів класів 3-6 т та іншої колісної техніки з навантаженням на вісь понад 4 т, що зазнають надмірного ущільнення, не допустимого з умов агроекології – уникнення деградації.

За результатами огляду та аналізу визначено можливість розвитку існуючої трудомісткої методики агроекологічної оцінки МТА щодо ущільнення землі за рахунок використання сучасних пенетрометрів та кореляційного взаємозв'язку значень твердості та щільності і вологості ґрунту.

У другому розділі узагальнено фізико-механічні характеристики аграрних угідь України у періоди найбільш інтенсивного механічного обробітку – весною та восени і можливість оцінки щільності та вологості ґрунту за рахунок кореляції з відповідними значеннями твердості – значення так зв. конусного індексу CI за WES – методикою НАТО. Проведено аналіз відомих досліджень Погромської Я.О., Кушнар'ова А.С., Кравчука В.І., Черячукіна М.І., Григор'євої О.М., Сиромятникова Ю. М. щодо ефективності різних способів механообробітку землі, де представлено і відповідні заміри щільності та твердості і вологості ґрунту, на підставі яких визначено кореляцію значень даних показників для двох основних типів аграрних угідь України – чорнозему (на прикладі Черкаської та Донецької областей) та суглинку (на прикладі Поділля та Львівської обл.).

Для розрахункового визначення питомого тиску МТА у контакті шини ґрунтом проведено огляд і аналіз сучасних досліджень щодо розрахунку площі плями контакту з врахуванням типорозміру шин, вертикального навантаження на колесо та тиску повітря у шині. За результатами опрацьовано використання емпіричних залежностей Diserens E., що широко використовуються у практиці агроекологічної оцінки МТА в країнах ЄС та враховують відмінності радіальних та діагональних шин, співвідношення висоти і ширини шин та тиск повітря в шинах (відсутніх у вітчизняній практиці).

Розглянуто питання розрахункової агроекологічної оцінки МТА при різних типорозмірах шин передньої та задньої осей та різних навантажень на осі, що не враховано у вітчизняній нормативній базі (опрацьованій щодо колісних тракторів класів тяги 3,0 – 5,0 – Т 150К і К700 з однотипними шинами осей).

Окрім цього розглянуто ефект доущільнення ґрунту в колії колесами задньої осі, що теж не враховано у нормативній базі ДСТУ (але враховується у WES- методиці щодо військової автотехніки на бездоріжжі).

Відповідно опрацьовано комп'ютеризована методика (у програмному середовищі MATLAB Simulink) розрахункової оцінки питомого тиску на ґрунт колесами МТА та заданого (визначеного експериментально пенетрометром для конкретного поля) значення твердості – конусного індексу СІ, а також спрощена спеціалізована програма такого розрахунку з завантаженням на ноутбук, планшет чи мобільний телефон з функціями Android. При цьому враховуються варіанти з різнотипними колесами різних осей та різними навантаженнями на осі, ефект доущільнення ґрунту в колії колесами задньої осі. Отримані результати корелюються з відповідними значеннями щільності і вологості ґрунту та, відповідно, з допустимими пороговими значеннями тиску весняного чи осінньо-літнього сезонів згідно ДСТУ 4521:2006.

Проведено розрахункові оцінки питомого тиску та агроекологічності для ряду розповсюджених в Україні колісних тракторів класу тяги 3,0 – 6,0 т.

Для оцінки адекватності вищенаведеної опрацьованої методики у третьому розділі представлено результати експериментальних польових досліджень на прикладі двох характерних моделей колісних тракторів: Fendt 1038 Varіo з різними типорозмірами коліс і навантаженням на осі (класу тяги 6,0 т) та ХТЗ 17221 (оновленої модифікації Т 150К з однаковим типорозміром коліс передньої та задньої осей та практично близьким розподілом навантажень на осі), а також проведених незалежно досліджень руху повнопривідного автомобіля КамАЗ 4310 з регулюванням тиску повітря у шинах.

Дослідження з колісними тракторами - Fendt 1038 Vario та ХТЗ 17221 проведені і з фрагментарною оцінкою щільності та вологості ґрунту в колії та за її межами (паралельно до замірів твердості відшарованим у виробника п'єзометричним пенетрометром ЛАН-М Pro з цифровим інтерфейсом та записом даних вимірювання на ноутбук і видозміненим під нормативи WES – методики НАТО конусним наконечником для оцінки СІ).

Отримані результати засвідчили достатню збіжність теоретичних, розрахункових оцінок ущільнення ґрунту вищезазначеними колісними тракторами та повнопривідним КамАЗ 4310 з результатами експериментальних досліджень в межах 7 – 13%, що є цілком задовільним, враховуючи реалії нестабільності, коливань значень показника твердості ґрунту в межах будь-якої з випробувальних ділянок і фіксацію стабільних значень твердості СІ при розрахунку.

Опрацьовані і відповідні пропозиції щодо оновлення існуючої нормативної бази агроекологічної оцінки МТА та відповідного інструментарію, зокрема і щодо п'єзометричних пенетрометрів та прийняття в якості ДСТУ ISO 22476-1:2012 (вслід за країнами ЄС). Зокрема прийняття для оперативної оцінки ущільнення ґрунту показника твердості – конусного індексу СІ, уточнення розрахунку площі контакту з врахуванням типорозміру і радіальної деформації та зміни тиску повітря шин, вертикального навантаження на колесо, схем із різнотипними колесами на осях і різним розподілом експлуатаційної маси по осях, додаткового ущільнення ґрунту при проходженні коліс задньої осі в одній колії з передньою віссю.

Ключові слова: трактори, автомобілі, агроекологія, нормативна база, ущільнення ґрунту, твердість ґрунту, пенетрометр, конусний індекс (СІ), інструментарій оцінки, типорозмір шин, тиск у шинах, оновлення

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати здобувача

1. Сивулька П. Порівняльний аналіз методик агроекологічної оцінки МТА в Україні/СНД та країнах ЄС // Вісник ЛНУП «Агроінженерні дослідження», № 28, 2024. –С. 218-226. <https://> *(Дисертантом проведено огляд та аналіз відомих методик агроекологічної оцінки колісних машин в Україні / СНД та країнах ЄС, а також розрахунку руху бездоріжжям за WES – методикою НАТО)*
2. Л.В. Крайник, П.М. Сивулька Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів у сільському господарстві: проблемні питання та сучасні підходи удосконалення // 2025 № 4 • Агроекологічний журнал, № 4, 2025. НААН України, - С. 205-212 *(Дисертантом на підставі аналізу сучасного розвитку вимірювальної техніки та розвитку досліджень опрацьовано проблемні питання оперативної агроекологічної оцінки МТА та запропоновано використання показника твердості ґрунту – конусного індексу CI , значення якого корелює і з значеннями щільності та вологості)*
3. Сивулька , П., Сукач , О. Оцінка площі плями контакту шини на ґрунтових поверхнях / Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 1(24), ЛНТУ, Луцьк, 2025. - С.399-408. *Дисертантом проведено огляд сучасних методик розрахунку площі плями контакту пневматичної шини з ґрунтом, що деформується, і запропоновано використання емпіричної залежності, що враховує типорозмір шин, тиск повітря у них та вертикальне навантаження на колесо)*
4. Крайник Л., Сивулька П. Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів на базі WES-методики / Вісник ЛНУП «Агроінженерні дослідження», № 29, 2025. –С. 48-56. *(Дисертантом представлено пропозиції розвитку існуючої нормативної методики агроекологічної оцінки МТА з використанням підходів WES – методики НАТО та результати експериментальних досліджень).*

5. Крайник Л., Сивулька П. Сукач О. Розвиток нормативної бази агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів / Вісник ЛНУП «Агроінженерні дослідження», № 30, 2026. –С. 42-50. *(Дисертантом надано пропозиції щодо використання п'єзоелектричних пенетрометрів з стандартизованим конусним наконечником під агроекологічну оцінку ущільнення ґрунту машинно-тракторними агрегатами).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Крайник Л., Сивулька П. Агроекологічна оцінка автомобілів і тракторів на базі WES – методології / II МНТЕ „Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021”, Вінниця, ВінТУ, 12-15.05.2021р. – С. 118-120

7. Крайник Любомир, Сивулька Петро. Раціоналізація сільськогосподарського типу автомобілів і тракторів з умов ефективності та агроекології / Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем./ Матеріали доповідей. Національний університет водного господарства та природокористування, 19-20 жовтня 2022 р. – С.259-264

8. Л. В. Крайник, П. М. Сивулька, О.М. Сукач . Конусний індекс CI (cone index) – базовий показник оцінки руху машин на ґрунтових поверхнях / Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту –2025»: Збірник тез. [Електронне видання] – Вінниця: ВНТУ. – 2025.– С.272-273. (PDF)

9. Крайник Л.В., Сивулька П.М. . Експрес - оцінка агроекологічності конструкцій автомобілів та тракторів IV міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 21-22.01.2025. Київ – С.

10. П. Сивулька, О. Сукач. Агроекологічна оцінка колісної техніки у сільському господарстві./ Теорія і практика розвитку агропромислового

комплексу та сільських територій: матеріали XXV Міжнародного науково-практичного форуму, 02–04 жовтня 2024 року . ЛНУП, Львів. - С.495-496

11. Крайник Л.В., Сукач О.М., Сивулька П.М. Експериментальна оцінка агроекологічності автомобілів та тракторів з використанням пенетрометра.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

12. Krainyk L. V., Syvulka P. M., Khudaverdian H. A., Gabriel Y. I. Agricultural transport – the type and structure formation of the wheeled vehicles fleet в міжнародному журналі ТЕКА. Quarterly journal of agri-food industry – 2021, Vol. 21, No. 1, 51-58 pp.

ANNOTATION

Syvulka, P. M. Substantiation of the Rapid Assessment of Tractors and Vehicles under Agroecological Conditions and Soil Hardness. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Specialty 133 "Industrial Mechanical Engineering" (Field of Knowledge 13 "Mechanical Engineering"). – Lviv National University of Environmental Use, Lviv, 2026.

The intensification of agricultural land cultivation, accompanied by the expanding use of high-performance yet substantially heavier machine-tractor units (MTUs), primarily wheeled ones, leads to excessive soil compaction. This process causes not only crop yield losses but also the gradual degradation of soil fertility. A significant proportion of agricultural land in Ukraine is managed under short-term leasing arrangements by large agricultural holdings, where the predominant and growing reliance on heavy, high-capacity MTUs (specifically wheeled tractors of traction classes 3–6) accelerates soil overcompaction.

The existing regulatory framework governing the agroecological performance of MTUs (DSTU 4428, DSTU 4521, and DSTU 4977) relies on standards developed in the 1980s. These standards are based on labor-intensive and time-consuming laboratory-style evaluation methods, such as determining soil bulk density and moisture. Furthermore, they assume identical tire sizes across both tractor axles and fail to account for cumulative soil compaction in the rear axle track or uneven axle load distribution.

The development of tools for rapid soil condition assessment, namely hardness measurement using piezoelectric penetrometers and moisture determination using probes, as well as the relevant methodologies applied in the European Union and the United States, enables the development of a methodology for rapid assessment of MTUs under agroecological conditions and the current state of a specific field.

The dissertation is devoted to substantiating a rapid agroecological assessment of wheeled machinery regarding soil compaction based on soil hardness

measurements, which correlate with soil density and moisture content, as well as specified tire characteristics and axle loads.

In the first chapter, a review and analysis of domestic and foreign studies concerning the compaction of agricultural lands by wheeled machinery, the regulatory frameworks in this field in Ukraine and the European Union (primarily using the example of the Germany), as well as the development of modern tools for assessing the physicommechanical condition of soil were carried out. In addition, an analysis was conducted of methods for evaluating the physicommechanical characteristics of soil as a supporting surface in studies related to military wheeled vehicles, in particular the so-called WES methodology of NATO armies, which provides rapid assessment of soil surfaces together with a number of empirical relationships for calculating the operating parameters of wheeled vehicles.

In particular, the review covered soil science studies by Medvediev V.V., Laktionova T.M., Leontieva T.N., Pysarenko V.M., Pohromska Ya.A., Pozniak S.P., and others, as well as works devoted to agroecology and compaction of arable soils by Adamchuk V.V., Biletskyi V.R., Pysarenko V.M., Rebrov O.Yu., Kuvachov V.P., Nadykto V.T., and foreign researchers including Soehne W., Raghaven G.S., McKyes E., Chasse M., Diserens E., Smith D.L., Dickson J.W., Bolling I.H., Geischeder R., Marusiak M., Neruda J., Tijink F.G.J., Spoor G., Koolen A.J., KupersH., Brunotte J., Brandhuber R., Vorderbruegge R., Schrader S., as well as Ksenevich I.P., Skotnikov V.A., Liasko M.I., Haponenko V.S., Panasiuk A.N., Kashbulganov R.A., and others. A review of the current legislative and regulatory framework in this field in Ukraine and Germany was also conducted.

Studies in soil mechanics related to the interaction with wheeled vehicles under the WES methodology of NATO (adopted by the overwhelming majority of the world's armies) were also considered, together with rapid assessment of the physicommechanical properties of soil as a supporting surface based on hardness measurements using the standardized CI (cone index) cone penetrometer, including the works of Wong Y.J., Kumar A., Chen Y., Sadek M.A.A., Sayedahmed A., as well as Hrubel M.H. and Krainyk L.V.

It was established that the problem is highly relevant for more than 80% of Ukraine's arable land areas, especially during the spring and autumn periods of mechanical tillage and harvesting, when wheeled tractors of traction classes 3–6 t and other wheeled machinery with axle loads exceeding 4 t cause excessive soil compaction that is unacceptable under agroecological requirements aimed at preventing land degradation.

Based on the results of the review and analysis, the possibility of improving the existing labor-intensive methodology for agroecological assessment of machine-tractor units (MTUs) with regard to soil compaction was established through the use of modern penetrometers and the correlation relationship between soil hardness values and soil density and moisture content.

In the second chapter, the physicommechanical characteristics of agricultural lands in Ukraine during the periods of the most intensive mechanical cultivation—spring and autumn—were generalized, as well as the possibility of assessing soil density and moisture through correlation with the corresponding hardness values, namely the so-called cone index (CI) according to the WES methodology of NATO. An analysis was carried out of the known studies by Pohromska Ya.O., Kushnaryov A.S., Kravchuk V.I., Cheryachukin M.I., Hryhorieva O.M., and Syromiatnykov Yu.M. concerning the efficiency of various methods of mechanical soil cultivation, where the corresponding measurements of soil density, hardness, and moisture were presented. On this basis, the correlation of these indicators was determined for the two main types of agricultural lands in Ukraine: chernozem soils (using the examples of Cherkasy Oblast and Donetsk Oblast) and loamy soils (using the examples of Podillia and Lviv Oblast).

For the calculated determination of the specific pressure exerted by MTUs in the tire-soil contact zone, a review and analysis of modern studies concerning the calculation of the tire contact patch area were conducted, taking into account tire size, vertical wheel load, and tire inflation pressure. Based on the results obtained, the empirical relationships developed by Diserens E. were adopted, which are widely used in the practice of agroecological assessment of MTUs in European

Union countries and take into account the differences between radial and diagonal tires, the aspect ratio of tire height to width, and tire inflation pressure (factors absent in domestic practice).

The issues of calculated agroecological assessment of machine-tractor units (MTUs) equipped with different tire sizes on the front and rear axles, as well as different axle loads, were considered. These factors are not taken into account in the domestic regulatory framework, which was developed primarily for wheeled tractors of traction classes 3.0–5.0, such as the T-150K and K-700, equipped with identical tires on both axles.

In addition, the effect of additional soil compaction in the wheel track caused by the rear axle wheels was examined. This factor is also not considered in the current DSTU standards, although it is taken into account in the WES methodology for military wheeled vehicles operating off-road.

Accordingly, a computerized methodology was developed in the MATLAB Simulink software environment for the calculated assessment of the specific pressure exerted on soil by MTU wheels and the corresponding soil hardness value (cone index, CI) determined experimentally by penetrometer measurements for a specific field. In addition, a simplified specialized software application was developed for installation on a laptop, tablet, or Android-based mobile phone. The methodology considers configurations with different wheel types on separate axles, unequal axle loads, and the effect of additional soil compaction in the rear wheel track. The obtained results were correlated with the corresponding soil density and moisture values and, consequently, with the permissible threshold pressure values for spring or autumn- summer seasons according to DSTU 4521:2006.

Calculated assessments of specific pressure and agroecological suitability were carried out for a number of wheeled tractors widely used in Ukraine within traction classes 3.0–6.0 t.

To evaluate the adequacy of the developed methodology, the third chapter presents the results of experimental field studies using two representative wheeled tractor models: the Fendt 1038 Vario with different wheel sizes and axle loads

(traction class 6.0 t), and the KhTZ 17221 (an upgraded modification of the T-150K with identical wheel sizes on the front and rear axles and an almost uniform axle load distribution). In addition, independently conducted studies of the movement of the all-wheel-drive KamAZ 4310 vehicle with adjustable tire inflation pressure were considered.

The studies involving the Fendt 1038 Vario and KhTZ 17221 tractors also included fragmentary assessment of soil density and moisture in the wheel track and outside it, conducted in parallel with hardness measurements using a manufacturer-calibrated LAN-M Pro piezometric penetrometer with a digital interface and data recording to a laptop, equipped with a cone tip modified according to the standards of the NATO WES methodology for determining CI values.

The obtained results demonstrated a satisfactory agreement between the theoretical and calculated estimates of soil compaction caused by the above-mentioned wheeled tractors and the all-wheel-drive KamAZ 4310 vehicle and the results of experimental studies, within the range of 7–13%. This level of agreement is considered satisfactory, taking into account the actual variability and fluctuations of soil hardness values within each test area, while stable CI values were used in the calculations.

Relevant proposals were also developed for updating the existing regulatory framework for agroecological assessment of MTUs and the corresponding instrumentation, including piezometric penetrometers and the adoption of ISO 22476-1:2012 as a national standard, following the practice of European Union countries. In particular, it is proposed to adopt the soil hardness indicator—the cone index (CI)—for rapid assessment of soil compaction; to refine the calculation of the contact area taking into account tire size, radial deformation, tire inflation pressure, and vertical wheel load; to consider configurations with different wheel types on separate axles and uneven axle load distribution; and to account for additional soil compaction when the rear axle wheels pass in the same track as the front axle wheels.

Keywords: tractors, vehicles, agroecology, regulatory framework, soil compaction, soil hardness, penetrometer, cone index (CI), assessment instrumentation, tire size, tire inflation pressure, updating.

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS

Scientific works containing the main research results of the dissertation:

1. Sivulka, P. (2024). Comparative analysis of methods for agroecological assessment of agricultural tractor units in Ukraine/CIS and EU countries. *Bulletin of LNUP: Agroengineering Research*, (28), 218–226.

(The doctoral candidate performed an overview and analysis of well-known methods for the agroecological assessment of wheeled vehicles in Ukraine / CIS and EU countries, as well as off-road mobility calculations using the NATO WES method).

2. Krainyk, L. V., & Sivulka, P. M. (2025). Agroecological assessment of agricultural tractor units in agriculture: Problematic issues and modern approaches to improvement. *Agroecological Journal*, (4), 205–212.

(Based on the analysis of modern measuring equipment and research development, the doctoral candidate addressed the problematic issues of operational agroecological assessment of agricultural tractor units and proposed using the soil hardness indicator — cone index (CI), the value of which correlates with density and moisture content).

3. Sivulka, P., & Sukach, O. (2025). Estimation of tire contact patch area on soil surfaces. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 1(24), 399–408.

(The doctoral candidate conducted a review of modern methods for calculating the contact patch area of a pneumatic tire with deforming soil and proposed using an empirical relationship that takes into account tire size, inflation pressure, and vertical wheel load).

4. Krainyk, L., Sivulka, P., & Sukach, O. (2026). Development of the regulatory

framework for agroecological assessment of agricultural tractor units. Bulletin of LNUP: Agroengineering Research, (30), 42–50.

(The doctoral candidate proposed the use of piezoelectric penetrometers with a standardized cone tip for the agroecological assessment of soil compaction caused by agricultural tractor units).

5. Krainyk, L., Sivulka, P., & Sukach, O. (2026). Development of the regulatory framework for agroecological assessment of agricultural tractor units. Bulletin of LNUP: Agroengineering Research, (30), 42–50.

Scientific works attesting to the approbation of the dissertation materials :

6. Krainyk, L., & Sivulka, P. (2021, May 12–15). Agroecological assessment of automobiles and tractors based on WES methodology. In Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference "Prospects for the Development of Mechanical Engineering and Transport – 2021" (pp. 118–120). Vinnytsia National Technical University.

7. Krainyk, L., & Sivulka, P. (2022, October 19–20). Rationalization of the agricultural fleet of automobiles and tractors based on efficiency and agroecology parameters. In Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies for the Development of Mechanical Engineering and the Efficient Functioning of Transport Systems" (pp. 259–264). National University of Water and Environmental Engineering.

8. Krainyk, L. V., Sivulka, P. M., & Sukach, O. M. (2025, May). Cone index (CI) as a basic indicator for evaluating vehicle movement on soil surfaces. In Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference "Prospects for the Development of Mechanical Engineering and Transport – 2025" [PDF file]

(pp. 272–273). Vinnytsia National Technical University.

9. **Krainyk, L. V., & Sivulka, P. M.** (2025, January 21–22). Express assessment of the agroecological compatibility of automobile and tractor designs. In Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Prospects for the Development of Automobile Transport and Infrastructure" (pp. [pages]). State Enterprise "State Auto Transport Research and Design Institute"

10. **Sivulka, P., & Sukach, O.** (2024, October 2–4). Agroecological assessment of wheeled machinery in agriculture. In Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Forum "Theory and Practice of the Development of the Agro-Industrial Complex and Rural Areas" (pp. 495–496). Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology / Lviv National Environmental University.

11. **Krainyk, L. V., Sukach, O. M., & Sivulka, P. M.** ([Year]). Experimental assessment of the agroecological compatibility of automobiles and tractors using a penetrometer.

Works that additionally reflect the scientific results of the dissertation

12. **Krainyk, L. V., Syvulka, P. M., Khudaverdian, H. A., & Gabriel, Y. I.** (2021). *Agricultural transport – the type and structure formation of the wheeled vehicles fleet. TEKA. Quarterly Journal of Agri-Food Industry, 21(1), 51–58.*

Зміст

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ I ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ КОЛІСНИХ МАШИН НА АГРОЕКОЛОГІЮ ҐРУНТІВ	25
1.1. Проблема техногенного впливу колісних машин на агроєкологію в Україні та зарубіжжі, законодавчі нормативні бази	25
1.2. Дослідження впливу технічних характеристик МТА на ущільнення сільськогосподарських угідь	39
1.3. Висновки по огляду, постановка проблеми, мети та завдань дослідження	64
РОЗДІЛ II ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ ОЦІНКИ АГРОЕКОЛОГІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ТРАКТОРІВ ТА АВТОМОБІЛІВ	68
2.1. Фізико-механічні характеристики ґрунту та їхня оперативна оцінка на базі WES – методики.....	68
2.2. Кореляція твердості та щільності ґрунту	71
2.3. Теоретична оцінка площі контакту шин МТА для різних ґрунтів з оперативним визначенням твердості показником СІ	77
2.4. Опрацювання методики експрес-оцінки агроєкологічності колісної техніки	97
2.5. Приклади оцінки агроєкологічності колісних машин	104
2.6. Аналіз та висновки теоретичної оцінки агроєкологічності колісних машин.....	115
РОЗДІЛ III ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	120
3.1. Методика, об'єкти дослідження та апаратура експериментальної агроєкологічної оцінки МТА.....	120
3.2. Експериментальна оцінка ущільнення ґрунту МТА на базі WES – методики	124
3.3. Практичні рекомендації щодо розвитку національної нормативної бази оцінки МТА з умов агроєкології.....	138
3.4. Висновки по розділу	139
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	144
ДОДАТОК А	169
ДОДАТОК В	171

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Розвиток агротехнологій і зростаюче використання високопродуктивних, але і значно важчих машинно-тракторних агрегатів (МТА), що починаючи ще з 1970-х років зумовило в Європі та США появу проблеми переущільнення сільськогосподарських угідь та їх деградацію. Ще з часів СРСР / Україні ця проблема стала актуальною з появи і серійного виробництва колісних тракторів класів тяги 3 – 5 тонн – ХТЗ Т 150К та Кіровоць К 700. Існуюча нормативна база щодо агроекологічності МТА – ДСТУ 4428, 4521 та 4977 – опрацьовані фактично ще у 1980-х роках і базуються на трудомісткій і тривалій оцінці, фактично лабораторній, щільності та вологості ґрунту, однакового типорозміру шин тракторів і не враховують реалій доущільнення ґрунту в колії задньої осі та нерівних навантажень на осі і різних типорозмірів шин на них. Розвиток інструментарію оперативної оцінки стану ґрунту : твердості – п'єзоелектричними пенетрометрами – та і вологості – зондами, а також відповідних методологій у ЄС та США, дозволяють опрацювання методики оперативної оцінки МТА з умов агроекології і поточного стану конкретного поля. Взаємозв'язок твердості та щільності і вологості ґрунту дає підстави опрацювання методики оперативної оцінки агроекологічності – ущільнення ґрунту колесами МТА і дотримання певних обмежень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідної тематики факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій «Розробка інноваційно-інформаційних, проєктно-керованих, ресурсощадних систем, технологій і технічних засобів для агро-промислового виробництва та його енергозабезпечення» (номер державної реєстрації УкрІНТЕІ №0121U109289, затвердженої Вченою радою факультету 18.02.2021 р., протокол № 4.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – обґрунтування можливості використання твердості як базового показника стану ґрунту з умов агроєкології та опрацювання методики оперативної оцінки машинно-тракторних агрегатів (МТА) з умов агроєкології – ущільнення ґрунту у конкретних ситуаціях.

Відповідно сформовано наступні завдання дослідження:

- провести огляд і аналіз сучасних, зокрема, зарубіжних, досліджень у сфері агроєкології МТА;
- провести аналіз досліджень і методик оперативної оцінки ґрунтів як опорної поверхні військової авто техніки НАТО;
- опрацювання і обґрунтування використання твердості ґрунту та її оцінки на базі так званого конусного індексу СІ як базового показника стану ґрунту для агроєкологічної оцінки колісних машин;
- розробити методику теоретичного розрахунку – оцінки МТА щодо ущільнення конкретних типів і станів ґрунту;
- провести експериментальні дослідження оцінки адекватності опрацьованої методики;
- опрацювати пропозиції щодо відповідного розвитку і удосконалення нормативної бази.

Об’єкт дослідження – колісні МТА (трактори, автомобілі) та взаємодія шин з ґрунтом.

Предмет дослідження — оперативна розрахункова оцінка ущільнення ґрунту колесами МТА на базі заміру твердості пенетрометром та технічних характеристик МТА.

Методологія дослідження – в основу дослідження покладено використання програмних пакетів MATLAB Simulink, Statistica 10 та WES-методики НАТО, а також регресійний аналіз. Окрім цього методи оцінки статистичної значимості і похибки результатів експерименту.

Наукова новизна очікуваних результатів:

Уперше: опрацьована методика оперативної агроекологічної оцінки колісних машин, насамперед тракторів і автомобілів, на базі твердості ґрунту, як показника його стану, пов'язаного зі щільністю.

Набули подальшого розвитку:

- методика розрахунку площі плями контакту шини з ґрунтовою поверхнею з урахуванням типорозміру та навантаження, а також тиску повітря у шині;
- методика кількісної оцінки питомого тиску на ґрунт колесами МТА різної розмірності та навантажень по осях машини;
- кількісна оцінка взаємозалежності значень твердості та щільності двох домінуючих типів ґрунтів – чорнозему та суглинку;
- пропозиції по подальшому розвитку вітчизняної нормативної бази щодо агроекологічної оцінки колісної техніки.

Практична значимість роботи

Можливість оперативної агроекологічної оцінки колісних МТА для конкретних умов використання.

Отримання конкретних рекомендацій щодо підбору необхідного типорозміру шин МТА в процесі проектних робіт чи модернізації та умов використання.

Оперативна оцінка щільності ґрунту на основі заміру твердості – конусного індексу СІ пенетрометром з стандартизованим наконечником.

Відповідна співпраця з Львівською філією УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого (с. Магерів) щодо практичної апробації та використання опрацьованої методики оперативної агроекологічної оцінки МТА.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, висновки та рекомендації, що наведені у даній роботі, отримані автором самостійно та опубліковані у фахових виданнях, що входять до переліку фахових видань МОН України та у одному зарубіжному виданні. У одноосібній публікації

здобувачем проведено огляд та аналіз сучасних досліджень і нормативної бази у сфері агроєкології в Україні, СРСР та країнах ЄС, визначено можливості формування оперативної оцінки МТА з умов агроєкології. В опублікованих у співавторстві наукових працях дисертанта належить: аналіз сучасного розвитку вимірювальної техніки та розвитку досліджень у сфері агроєкології, визначення проблемних питань оперативної агроєкологічної оцінки МТА, пропозиція використання показника твердості ґрунту – конусного індексу СІ, значення якого корелює і з значеннями щільності та вологості, огляд сучасних методик розрахунку площі плями контакту пневматичної шини з ґрунтом, що деформується, пропозиція використання емпіричної залежності, що враховує типорозмір шин, тиск повітря у них та вертикальне навантаження на колесо, пропозиції розвитку існуючої нормативної методики агроєкологічної оцінки МТА з використанням підходів WES – методики НАТО та результати експериментальних досліджень.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідались на міжнародних і всеукраїнських конференціях та форумах:

1. II Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021» (м. Вінниця, ВНТУ, 12–15 травня 2021 р.);

2. III Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем» (м. Рівне, НУВГП, 19–20 жовтня 2022 р.);

3. XXV Міжнародний науково-практичний форум «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій» (м. Львів, ЛНУП, 02–04 жовтня 2024 р.);

4. IV Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури» (м. Київ, ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 21–22 січня 2025 р.);

5. IV Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2025» (м. Вінниця, ВНТУ, 2025 р.);

6. V Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2026» (м. Вінниця, ВНТУ, 2026 р.).

Публікації. Основні результати опубліковані в 12 наукових працях, у з яких 5 статей у фахових виданнях МОН України, 1 стаття у закордонному виданні, в 6 тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 3 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який налічує 192 найменування, додатків. Повний обсяг роботи становить 174 сторінок. Робота містить 15 таблиць, 45 рисунків, 2 додатки.

РОЗДІЛ І ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ КОЛІСНИХ МАШИН НА АГРОЕКОЛОГІЮ ҐРУНТІВ

1.1. Проблема техногенного впливу колісних машин на агроекологію в Україні та зарубіжжі, законодавчі нормативні бази

Вплив МТА та автомобілів на фізико-механічні характеристики сільськогосподарських угідь є тільки одним з аспектів агроекології загалом, що став однак особливо відчутним впродовж останніх 30-35 років з розвитком і масовим впровадженням значно потужніших і важчих МТА та інтенсифікацією процесів обробітку ґрунту [1-3]. Як приклад, на рис.1.1, за даними [4], представлено еволюцію інтенсивності обробітку та вантажообігу сільськогосподарських угідь впродовж останніх десятиліть (на прикладі кукурудзи).

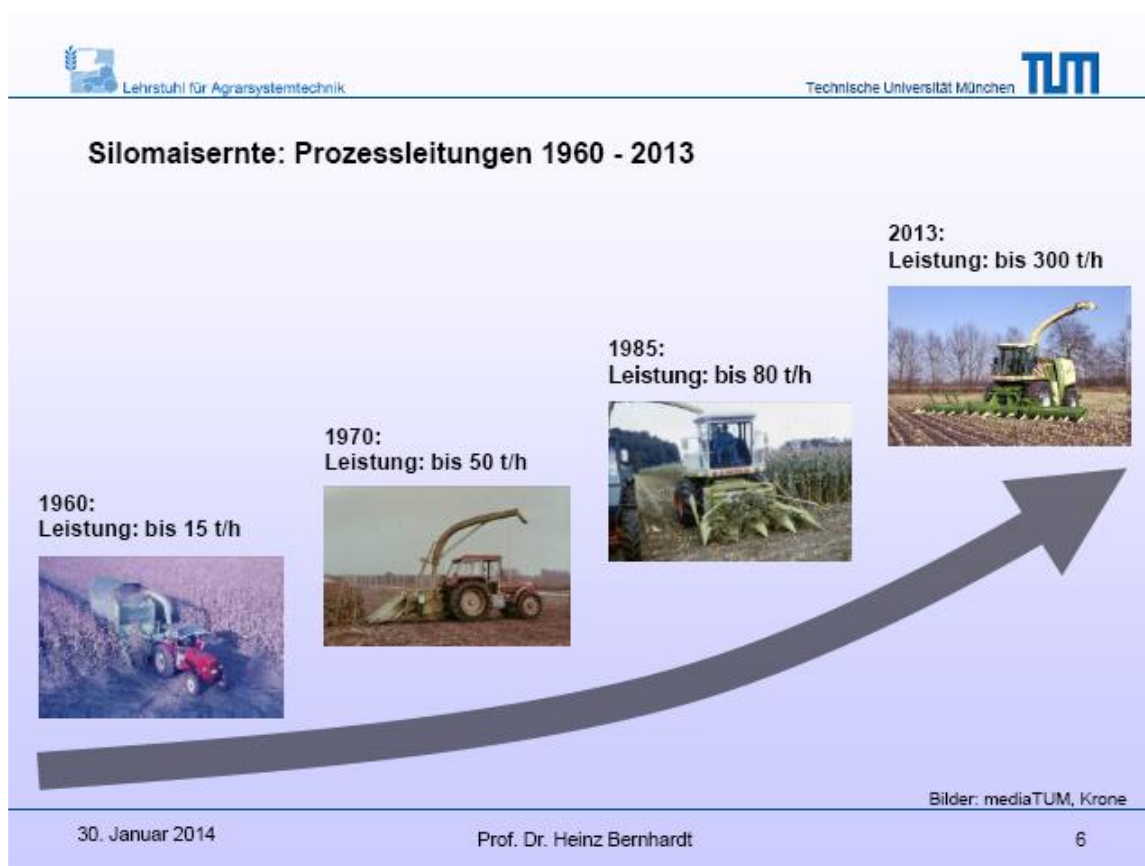


Рисунок 1.1 — Розвиток інтенсивності машинного обробітку та обсягів вантажообігу сільськогосподарських угідь кукурудзи (на прикладі ФРН [4]).

Разом з тим інтенсивність машинного обробітку сільськогосподарських угідь (і втрати, зменшення урожайності від ущільнення ґрунту) взаємопов'язана з дотриманням сприятливих агротермінів/тривалості тих чи інших видів обробітку ґрунту, недотримання яких теж спричиняє зменшення — недобір урожаю. Як приклад, на рис. 1.2 представлено результати досліджень під керівництвом проф. Панасюка А.Н. [5] порівняння потенційних втрат урожаю сої при посіві з використанням колісного трактора Т 150К на площі 600 га залежно від норми виробітку за 5 днів (в га), що свідчить про відчутно більші втрати урожаю від недотримання сприятливих агротермінів у порівнянні з втратами внаслідок ущільнення ґрунту.

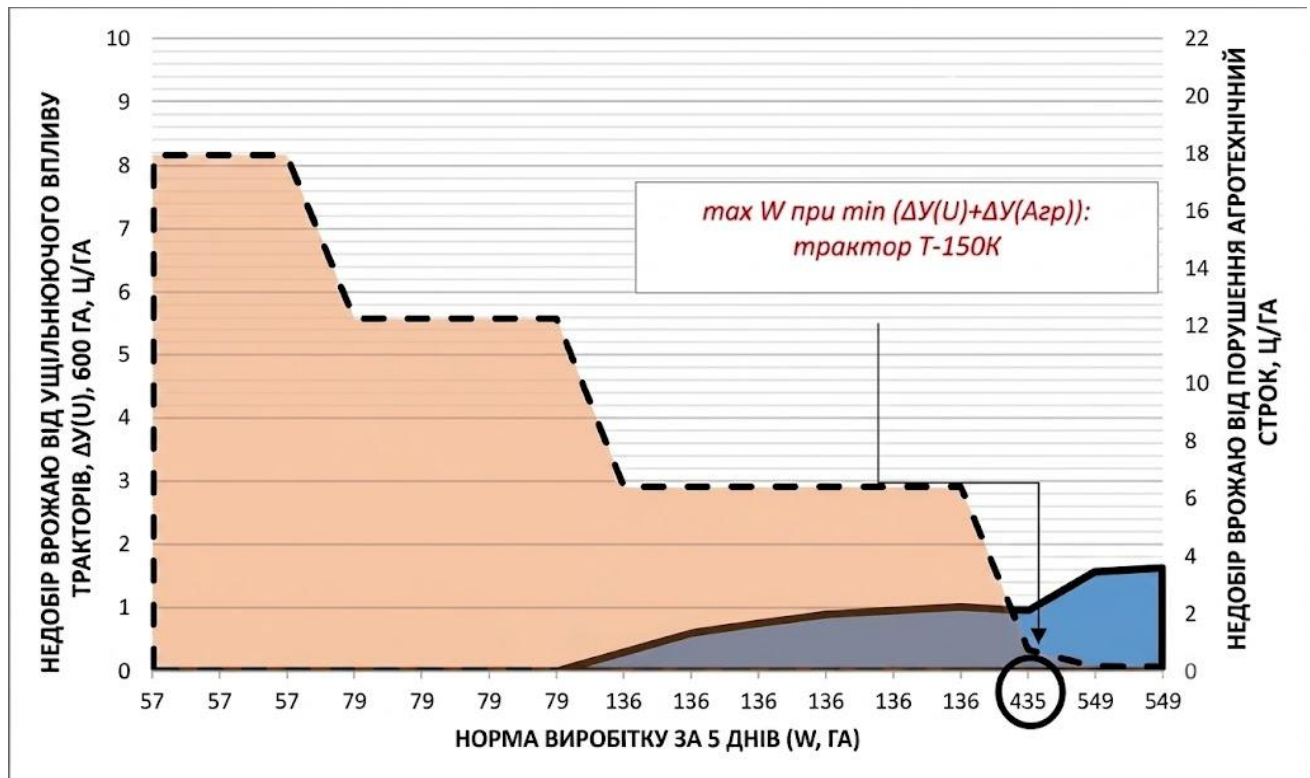


Рисунок 1.2 — Співвідношення втрат урожаю сої від недотримання агротермінів і ущільнення ґрунту трактором Т150К [5].

Очевидно, що використання більш потужних МТА з більшою шириною обробітку угідь дозволяє відчутно скоротити терміни, вкластись у найбільш сприятливі і зменшити відповідний потенційний недобір урожаю. З іншого боку збільшення потужності і ваги МТА неминуче збільшує тиск від коліс чи гусениць на землю, спричинює її ущільнення і, відповідно, теж

спричиняє недобір урожаю (та повільну деградацію орних земель [1-3]). Тим не менше, у короткотерміновому періоді (а також беручи до уваги, що в сучасній вітчизняній практиці агрохолдинги здебільшого не є власниками землі, а тільки орендарями на певні проміжки часу) з умов поточної економічної вигоди мінімізації втрат від недотримання агротермінів стимулює зростаюче розповсюдження більш потужних і важчих МТА (наразі класів 3-5т у порівнянні з ще донедавнім в часи СРСР домінуванням класів 0,8 – 1,4т – МТЗ/ЛТЗ та гусеничних, з меншим питомим тиском на ґрунт – ДТ 75/ Т 74). Тенденція росту потужностей і маси МТА в аграрному секторі є очевидною

[6] і з певним запізненням щодо США та Західної Європи вона ставала реальністю ще у 1980-х роках і в Україні/ СРСР [7- 9].

Разом з тим у останні десятиліття інтенсивний розвиток агро- технологій зумовив проходження по полю МТА впродовж року 5-15 разів, внаслідок чого сумарна площа контакту – слідів колісних чи гусеничних рушіїв перевищує майже вдвічі площу поля, причому, згідно даних [9,10], 10-12% площі піддається впливу коліс/гусениць від 6 до 20 разів (залежно від агрокультури), 65-80% площі – від 1 до 5 разів, і тільки 10-15% площ не зазнають відповідного ущільнення. Схожі дані наводяться і у зарубіжних дослідженнях країн ЄС [11,12].

Загалом слід зазначити, що дослідження впливу ущільнення сільськогосподарських земель тракторами були розпочаті ще перед II світовою війною, фактично на початках масового розповсюдження МТА у аграрному секторі [13 -14], однак основи сучасної методології цих досліджень в Західній Європі були закладені проф. W. Soehne уже на початку 1950-х років [15-17]. Зрештою і у колишньому СРСР у той же період розпочались дослідження руху колісних та гусеничних машин бездоріжжям та ґрунтовими дорогами, а також будівництва автодоріг, у т.ч. і ґрунтових, що складали значну частку від загальної мережі автодоріг. У цьому напрямку були сформовані дві базові наукові школи – в МАДІ та ХАДІ під керівництвом тодішніх ректорів – проф. Бабкова В.Ф. та проф. Бірулі А.К. [18]. Фактично останнім та проф. Сіденко В.

М. (теж ХАДІ, зараз ХНАДУ), не без впливу наявного у тому ж місті тракторного заводу ХТЗ, були розгорнуті дослідження і щодо ущільнення сільськогосподарських угідь МТА, що базувались на теоретичних засадах механіки ґрунтів, найбільш ґрунтовно опрацьованих в СРСР проф. Цитовичем А.М. [19] та видань –перекладів провідних зарубіжних вчених [20,21], що сформувало і відповідний навчальний курс у вищих навчальних закладах СРСР [22]. Слід зауважити, що наукові школи дослідження прохідності та ущільнення ґрунтів колісних і гусеничних машин щодо військової автотехніки (ВАТ) та тракторів і автомобілів в аграрному секторі як в СРСР, так і зрештою за кордоном розвивались паралельно, в т.ч. очевидно в силу певної інформаційної закритості військової тематики та різних цільових пріоритетів. Зокрема прохідність та мобільність (оцінка максимально можливих швидкостей) руху бездоріжжям щодо військової автотехніки та ущільнення родючих земель при регламентованих агротехнологіями невисоких швидкостях і оцінка впливу на урожайність в аграрному секторі. Це ж стосується і наукових досліджень у лісогосподарській сфері – трелювання/транспортування

стовбурів деревини, де пріоритетами є прохідність та пошкодження поверхні лісів. Однак базовим для всіх трьох напрямів робіт є фізико-механічні характеристики ґрунтів (для ВАТ і піщаних, незв'язних) як опорної поверхні руху автомобілів і тракторів (террамеханіка у зарубіжних дослідженнях).

Однак тільки з кінця 1960-х/ початку 1970-х років, у т.ч. за рахунок появи нового покоління МТА, що у 2-3 рази стали потужнішими та важчими (в СРСР – ХТЗ Т 150/150К та «Кіровоць» К 700/701) з-за інтенсифікації обробітку землі, дослідження у сфері агроекології МТА значно активізувались і вийшли на рівень державних програм і відповідних нормативних актів. У СРСР у 1980 р. було створено координаційну раду при Всесоюзній академії сільського господарства (ВАСХНИЛ) по проблемі ущільнення технікою аграрних угідь і визначено головні наукові організації по цій проблемі –

Московська сільськогосподарська академія ім. К.А. Тімірязєва та Інститут ґрунтів [23]. Відповідно у плановому порядку у цілій мережі інститутів та машинно-випробувальних станцій СРСР були розгорнуті дослідження впливу ущільнення ґрунтів колісною та гусеничною технікою на урожайність практично всіх видів сільськогосподарських культур в різних географічних зонах, ефективність різних МТА в цьому аспекті, результати чого не втратили своєї актуальності досі.

Особливо слід відзначити, що за результатами цих робіт у 1986 р. були опрацьовані та прийняті (в числі перших у міжнародній практиці) законодавчі нормативні акти – 3 державні стандарти ГОСТ [24-26], що визначали методи оцінки впливу МТА на ущільнення ґрунтів та допустимі, порогові значення питомого тиску колісних і гусеничних рушіїв МТА на сільськогосподарські угіддя. Слід зазначити, що серед ініціаторів і співавторів цих стандартів були і українські науковці, насамперед академік НААН України, проф. Медведєв В.В. [27]. Однією з рекомендацій розробників даних ГОСТ було обмеження використання тракторів К 700, в меншій мірі і Т 150К, на цілому ряді операцій обробітку ґрунтів [28]. У 2006-2008 роках основні положення даних ГОСТ з певними доопрацюваннями були покладені і у основу відповідних національних стандартів України [29-31]. Однак оцінка відповідності даних нормативній базі, принаймні поки що, не входить у перелік обов'язкових при сертифікації/ допуску до експлуатації нових на ринку України вітчизняної та зарубіжної техніки. Відсутня інформація і про органи відповідного державного контролю за дотриманням відповідності цим нормам техніки у процесі експлуатації.

Разом з тим, як свідчать сучасні дослідження [32-35], більшість нових потужних колісних тракторів класів 3 і 5, (у т.ч. і Т 150К/ Т170К), що використовуються крупними агрогосподарствами в Україні, не відповідають

вимогам вищевказаних ДСТУ на переважачій частині сільськогосподарських угідь. Аналогічні дані щодо відчутного перевищення

регламентованих питомих тисків на ґрунт колісними тракторами типу К 700/К701 та Т150К отримані у сусідніх Білорусії та РФ [36 – 39].

Загалом допустимі максимальні тиски на ґрунт коліс МТА визначені з диференціацією від пір року (весна і літо/осінь), а також залежно ще від двох чинників – вологості ґрунту у верхньому шарі 0-30 см (в долях від найменшої об'ємної вологомісткості НВ) – 5 рівнів та питомої ваги (щільності) ґрунту у верхньому шарі 0-10см – 2 різні рівні для сезонів весна і літо/осінь, [29]. Залежно від різновиду ґрунту за гранулометричним складом задано значення НВ (у %) – від 14 до 40% (табл. А.1 додатку А до [29]. Середній тиск коліс на ґрунт (площа контакту на навантаження на колесо) корегується коефіцієнтом нерівномірності розподілення тиску за площею контакту колеса з ґрунтом, що визначається за довідковими таблицями (однак вони не надані у нормативній базі і суттєво залежать від рисунка та висоти профілю протектора конкретної шини). Другим аспектом певної невизначеності є метод оцінки вмісту вологи у верхньому шарі ґрунту глибиною від 0 до 30см (табл.1.1), що звично може бути різною на поверхні та на глибині 30 см, а також щодо єдиної методики оцінки вологості ґрунту, де прийняті 3 стандарти ДСТУ ISO [40-42] з різними методами і інструментарієм, однак малопридатні для польових умов і оперативної оцінки на місці. Оперативним вирішенням проблеми виглядає непряма оцінка вмісту вологи в ґрунті за допомогою супутників чи дронів, що базується на відбитті електромагнітного випромінювання в певному діапазоні - зокрема в системі EOSDA Crop Monitoring [43].

Другим аспектом практичної роботи з ДСТУ [29] є оперативна оцінка щільності ґрунту, як одного з визначальних показників родючості [44], що звично донедавна оцінювалась лабораторно шляхом відбирання проб (метод ріжучого кільця Н.А. Качинського). Згідно даних Інституту землеробства НААН України оптимальні показники щільності ґрунту для польових культур для всіх 3-х основних ґрунто-кліматичних зон України представлено у табл. 1.2 [10]. Вітчизняна нормативна база в плані визначення і контролю щільності ґрунту є неповною [45], більш деталізована щодо процедури оцінки щільності

грунту у будівництві [46]. Однак впродовж останніх 2-х десятиліть зростаючого розповсюдження набувають пенетрометри

Таблиця 1.1 - Норми допустимого максимального тиску МТА на ґрунт згідно [29].

Вологість ґрунту у шарі від 0 см до 30 см	Допустимий максимальний тиск на ґрунт, кПа, не більше			
	Весною		влітку, восени	
	за пухкої будови шару від 0 до 10 см менше 0,9г/ см ³	за помірно ущільненої будови шару від 0 до 10 см (0,9 – 1,0) г/ см ³	за ущільне- ної будови шару від 0 до 10 см (1.1-1,2) г/см ³	за рівноваж- ного стану шару від 0 до 10 см (1,2-1,3) г/см ³
Більше ніж 0,8 НВ	40	50	60	80
Від 0,7НВ до 0,8 НВ включно	50	60	80	100
0,6 НВ - 0,7 НВ	60	100	120	140
0,5 НВ - 0,6 НВ	80	120	140	180
0,4 НВ - 0,5 НВ	120	160	180	210

(твердоміри), що оперативно, на місці, дозволяють визначити щільність та твердість ґрунту (що взємоповязані) у кількісному вимірі за рахунок вбудованого електронного блоку з показом значення, рисунок.1.3 [47].



Рисунок 1.3. Оцінка щільності ґрунту – пенетромтр чи проби з лопатою [53]

Слід зазначити, що практика використання пенетромтрів, ще чисто механічних,

для оцінки твердості ґрунту, як опорної поверхні для військової автотехніки (ВАТ) відома ще з часів II світової війни і була впроваджена інженерним корпусом армії США і досі збереглась з часів «ленд-лізу» у інженерних частинах ЗСУ [48, 49]. Звично, що значно оперативніший метод у порівнянні з нормативним (згідно ДСТУ [50]) – твердоміром Рев'якіна [51], відповідні прилади уже виробляються і в Україні [52, 53]. Загалом слід зазначити, що у будівництві використовуються пенетромтри з циліндричним наконечником (класична механіка статки ґрунтів), однак для специфіки взаємодії колеса з ґрунтом прийнято, насамперед у сфері прохідності ВАТ конусний наконечник, що стандартизований у НАТО [48, 49]. Відомі і перші наукові дослідження ґрунтів в Україні з використанням сучасного пенетромтра [54].

Таблиця 1.2 - Оптимальні показники щільності ґрунту для польових культур [10]

Кліматичні Зони	Ґрунти		Польові культури	Межа щіль- ності ґрунту, г/см ³
Полісся	Дерново-підзолистий середньосуглинковий		Зернові колосові	1,1 – 1,4
			Кукурудза	1,1 – 1,2
	Дерново-підзолистий легкосуглинковий та супіщаний		Зернові колосові	1,25 – 1,35
			Кукурудза	1,1 – 1,3
Лісостеп	Сірий опідзолений важко- і середньо суглинковий		Зернові колосові	1,05 – 1,3
			Кукурудза	1,0 – 1,3
	Сірий опідзолений легкосуглинковий		Зернові колосові	1,0 – 1,3
	Чорнозем типовий і опідзолений легкосуглинковий		Зернові колосові	1,1 – 1,3
			Кукурудза	1,0 – 1,25
			Гречка	1,2 – 1,3
			Просо	1,2 – 1,4
			Горox	1,12 – 1,35
Степ і сухий степ	Чорнозем звичайний і південний, темно- каштановий ґрунт		Зернові колосові	1,0 – 1,3
			Кукурудза	1,1 – 1,3

Детальні дослідження у сфері агроекологічної оцінки ущільнення ґрунтів МТА проводяться і у країнах ЄС, що теж констатують переущільнення сільськогосподарських угідь, тим паче, що інтенсивне використання важких тракторів нового покоління почалось там значно раніше [11,12, 55-58]. Враховуючи лідируючу роль у ЄС власне ФРН у плані обсягів виробництва МТА (зрештою і ВАТ) та проблему скорочення площ сільськогосподарських угідь у зв'язку з будівництвом та розвитком інших об'єктів інфраструктури, що обумовлює обережне та акуратне ставлення до використання аграрного потенціалу і його розвитку [4], доцільно розглянути розвиток досліджень щодо ущільнення і деградації угідь з-за МТА на прикладі цієї країни.

Насамперед слід зазначити, що у 1998 р. прийнято федеральний закон щодо охорони сільськогосподарських земель [59] (зрештою і в Україні прийнято у 2009 р. близькі за ціллю два закони [60, 61]). Однак на законодавчому рівні визначаються декларативно загальні положення щодо охорони та цільового використання земель, конкретних порогових, гранично допустимих значень питомого тиску на ґрунт чи ущільнення ґрунту немає, бо це сфера підзаконних нормативних актів. Державними стандартами ФРН – DIN – визначені тільки польові та лабораторні методи оцінки фізико-механічних характеристик ґрунтів [62-63], окремо виділені оцінка щільності та твердості ґрунтів [64-65]. Однак прямий аналог ДСТУ щодо порогових параметрів ущільнення сільськогосподарських угідь фактично відсутній. У цьому плані опрацьовані нормативи німецького об'єднання інженерів (VDI) [66], як галузевий стандарт (аналогічно практиці у США щодо МТА – SAE, Японії і інших промислових країн), та відповідні дослідження і публікації на цю тему, наприклад [67]. Звично, що підходи і агроекологічна оцінка ущільнення ґрунтів МТА відрізняються і більш детально проаналізовані нижче. Але загалом проблема переущільнення аграрних ґрунтів є предметом ретельних досліджень та опрацювання відповідних рекомендацій державними установами, починаючи від міністерств сільського господарства, та наукових установ. Як приклад гостроти проблеми на рис. 1.4 представлено еволюція

зміни навантажень на ґрунт зернозбиральними комбайнами за період з 1960-х роках (але і вказано зміну ширини захвату та продуктивності) [68].

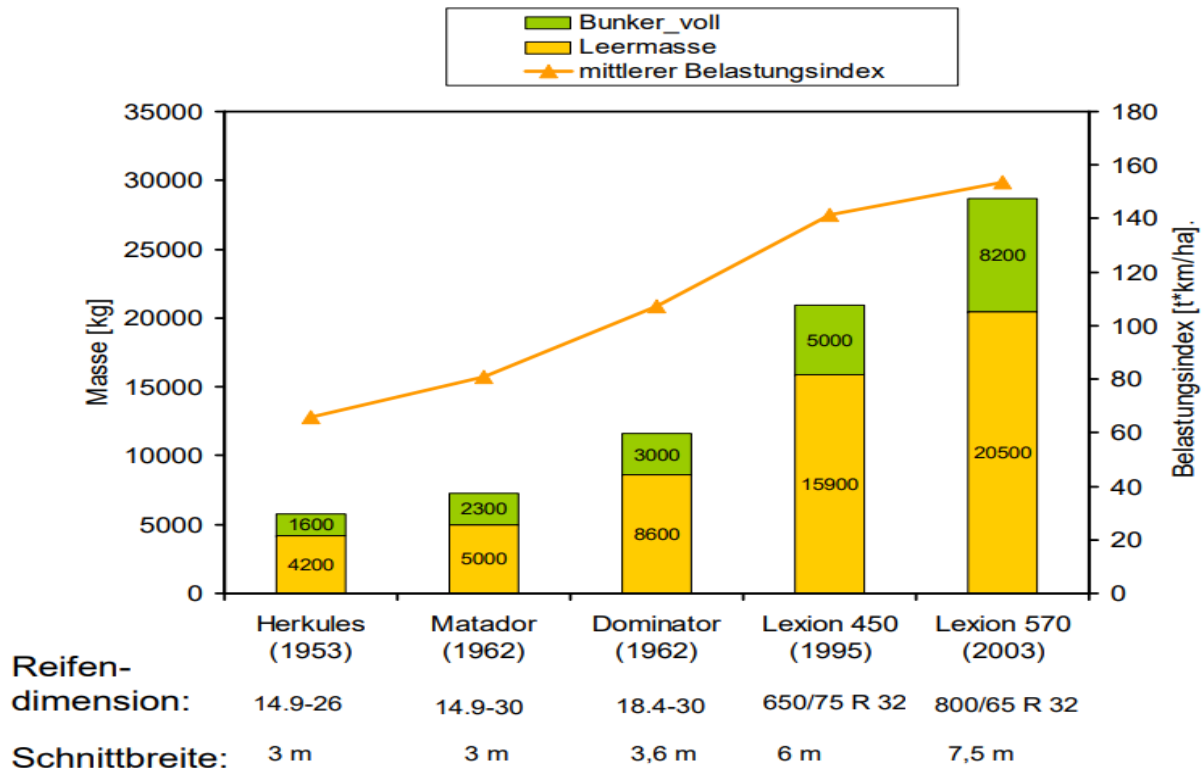


Рисунок 1.4 - Еволюція навантаження на ґрунт зернозбиральними комбайнами [68]. Тут: Індекс навантаження (т.км/га) — права ордината; розмірність шин — 14.9-26 – до 800/65R32; ширина захвату — від 3 до 7,5 м; маса комбайна — споряджена/жовта; маса завантаженого бункера з зерном — зелена (кг).

Практично констатовано більш ніж двократне збільшення індексу інтенсивності навантаження на ґрунт (у тонно-кілометрах на 1 гектар) при майже 4-кратному збільшенні повної маси типових зернозбиральних комбайнів (з 5,5-6 т у 1953 р. – Herkules до 28-30 т у 2003 р. – комбайн Lexion 570, рис. 1.4) та одночасному збільшенні ширини захвату жатки з 3 до 7,5 м. Збільшення розмірності шин на відповідних моделях (рис.1.4) однак не

компенсує зростання тиску на ґрунт, що і обумовлює відповідно збільшення ущільнення ґрунту.

Вплив останнього (відносно оптимальної щільності з умов агрономії) на зменшення урожайності, згідно даних [68], відносно оптимальної щільності представлено на рис.1.5.

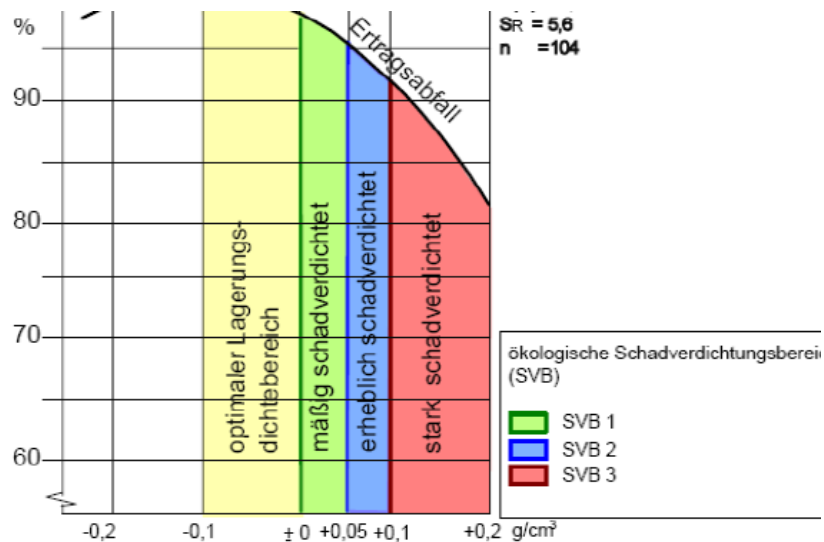


Рисунок 1.5 — Вплив ущільнення ґрунту на зменшення урожайності (згідно дослідження [68], де : по осі ординат – зміна врожайності, у % ; по осі абсцис – зміна щільності ґрунту, у г/см³. Як випливає з результатів польових досліджень [68], збільшення щільності ґрунту на 0,05 г/см³. зумовлює падіння врожайності на незначних 3%, однак на 0,1 г/см³ уже на 8%, а при зростанні щільності ґрунту уже на 0,2 г/см³ (що характерно для сучасних важких МТА) – уже на значні втрати – 18%, що недопустимо на думку авторів дослідження. У принципі подібні результати констатуються і у вітчизняних дослідженнях та публікаціях з кінця 1980-х років. [9, 35, 36].

Ущільнення ґрунту внаслідок надмірного тиску у контактi шини з опорною поверхнею має і довгострокові наслідки – в плані незворотного переущільнення не піддаються механічній обробці (оранці, культивації), але мають вплив на розвиток кореневих систем сільськогосподарських культур, а, відповідно, і на урожайність наступних сезонів підорних шарів (підшви) ґрунту. На рис. 1.6, як приклад, представлено результати відповідного

дослідження [69] щодо зміни тиску в ґрунті/ущільнення на глибину залежно від навантаження на колесо при незмінному тиску повітря в шині 1,6 бар (тут Radlast – навантаження на колесо, Tiefe – глибина, Bodendruck – тиск в ґрунті). Вплив тиску повітря в шині є надзвичайно суттєвим (насамперед зміна площі контакту шини з опорною поверхнею) і ілюструється результатами дослідження [69], рис. 1.7 — при незмінному навантаженні на колесо 4 т (при тиску в шині 0,75 бар і 3,0 бар).

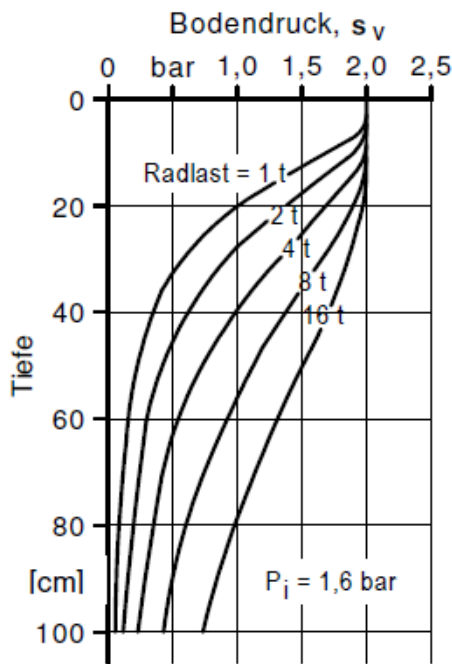


Рисунок — 1.6. Вплив навантаження на
в шині на розподіл колесо на глибину ущільнення [69]
по глибині [70]

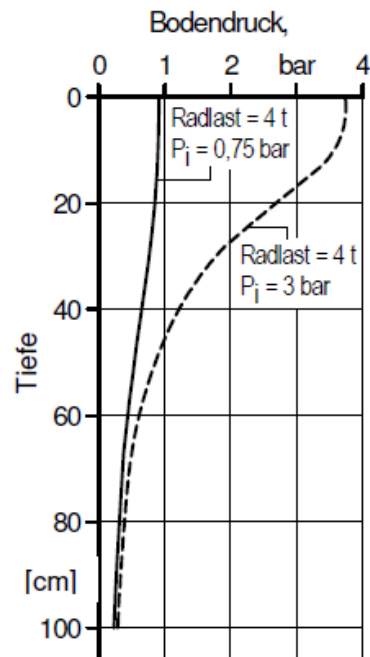


Рисунок 1.7 — Вплив тиску
навантаження в ґрунті

Спільною рисою досліджень ущільнення сільськогосподарських ґрунтів, як у ЄС так і США, є використання пенетрометрів для оперативної оцінки щільності та міцності ґрунту і власне з конусним наконечником щодо міцності — твердості ґрунту як опорної поверхні коліс, що давно є стандартизованою процедурою для військової автотехніки НАТО [48, 49]. Власне конусний наконечник дозволяє враховувати не тільки опір вертикальному навантаженню, що є базовим для статичної механіки ґрунтів (очевидною у сфері будівництва) – модуль деформації E – (модуль Юнга), що вимірюється

циліндричним наконечником з плоскою основою. Але і за рахунок кута конуса також і опір зсуву ґрунту у горизонтальній площині, що є неминучим елементом взаємодії колеса з опорною поверхнею, що деформується. Звично, що отримані значення опору ґрунту продавлюванню конусного наконечника уже не показником, що характеризує тільки твердість у вертикальному напрямі, а і комбінованим значенням з опором зсуву у горизонтальній площині (у військовій террамеханіці це так зв. Конусний індекс CI cone index) [48, 49]. На базі значення CI для конкретного бездоріжжя і визначається прохідність та потенційна мобільність руху БАТ. Слід зазначити, що ця методологія (WES – методика Інженерного корпусу армії США) є значно простішою і ефективнішою у порівнянні з методикою, що була прийнята для БАТ у СРСР та досі є нормативною у пострадянських державах з використанням модуля E, опору горизонтальному зсуву, коефіцієнту внутрішнього тертя і [49]. Оцінка фізико-механічних характеристик ґрунтової чи піщаної поверхні є стандартизована у міжнародному (добровільному) стандарті ISO [71] і прийнята як національна нормативна база країнах ЄС, США, у т. ч. з 2019 р. і у РФ. Однак, на жаль поки що не в Україні. Достатньо детальний огляд і аналіз сучасних засобів вимірювання щільності та твердості ґрунту представлено у роботі [72, 73], звідки однозначно випливає доцільність цієї практики і у вітчизняну нормативну базу. WES — методика віднедавна почала успішно використовуватись у лісо-господарській сфері в Європі, зокрема у Фінляндії [74, 75], Чехії [76] та згодом у розташованих неподалік Фінляндії Петропавловському лісотехнічному університеті та Санкт-Петербурзькому технічному університеті [77, 78]. Слід однак зауважити, що як у військовій, так і лісогосподарській сферах представлення характеристик ґрунту, як опорної поверхні, є простішим і обмежується питанням прохідності та мобільності руху, визначальними для чого є взаємопов'язані твердість та вологість. З умов агротехнологій швидкісні режими руху МТА є обмеженими у діапазоні доволі низьких швидкостей, питання прохідності теж не є актуальними – акцент на зміну пористості ґрунту, зміні вмісту води і повітря внаслідок переущільнення

в колії коліс. Разом з тим слід констатувати, що методи дослідження взаємодії шин/коліс машин з ґрунтом у аграрній сфері менш розвинуті у порівнянні з військовими, а, віднедавна і з лісгосподарськими сферами. В Україні, як і в країнах СНД, фактично відсутня сучасна нормативно опрацьована методика оперативної оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту аграрних угідь та відповідності ним технічних характеристик конкретних моделей МТА. Актуальність проблеми переущільнення аграрних земель сучасними МТА тим не менше, як підтверджують результати сучасних нещодавніх досліджень в Україні тільки підсилюється [32-34, 79].

1.2. Дослідження впливу технічних характеристик МТА на ущільнення сільськогосподарських угідь

Проблема переущільнення ґрунтів безпосередньо пов'язана з розвитком продуктивності тракторів – збільшення тягового зусилля, а, відповідно, і збільшення власної маси для забезпечення відповідної сили зчеплення колісних чи гусеничних рушіїв з ОП як необхідної умови можливості реалізації заданого тягового зусилля (тягового класу). Відповідне збільшення розмірів коліс, застосування здвоєних шин чи їхнє баластування не дозволяє належним чином компенсувати навантаження на ґрунт у плямі контакту, що і зумовлює надмірне переущільнення сільськогосподарських угідь, що стало вже масовим явищем упродовж останніх 30-40 років [3]. Детальне дослідження можливостей зменшення питомого тиску у контакті шин з опорною поверхнею, що проведено нещодавно д.т.н. Ребровим О.Ю., засвідчує можливості відчутного розширення ареалу угідь з умов агроєкології і нормативних обмежень, однак загалом не знімає проблему переущільнення земель для існуючого парку МТА класів 3-5 т [12, 13]. Результати дослідження засвідчили, що тільки 10% з типажу тракторів цього класу відповідають вимогам агроєкології на 60% території України, 75% типажу – тільки на 25% території, а весь існуючий типаж 15 основних виробників у ЄС та США (понад 600 моделей і модифікацій) – тільки на 3% території [79]. З проведеного аналізу можливостей використання систем централізованого регулювання

тиску у шинах – зміна площі контакту з ОП (типу Fendt VarioGrip чи Mitas AitCell [80]), а також систем регулювання розподілу зчіпної ваги трактора між переднім та заднім ведучими мостами (типу Fendt VarioPull) чи регульованого баласту (типу EZ Ballast – John Deere) можна досягнути для сучасних енергонасичених універсально-просапних тракторів класу 3 т зниження максимального тиску на ґрунт на 8-40 кПа, що дозволяє розширити на 14% ареал використання площ в Україні без порушення агроекологічних вимог [29] щодо допустимого максимального тиску МТА на ґрунт (рис. 1.8) [79]. (Тут (рис .1.8 а)

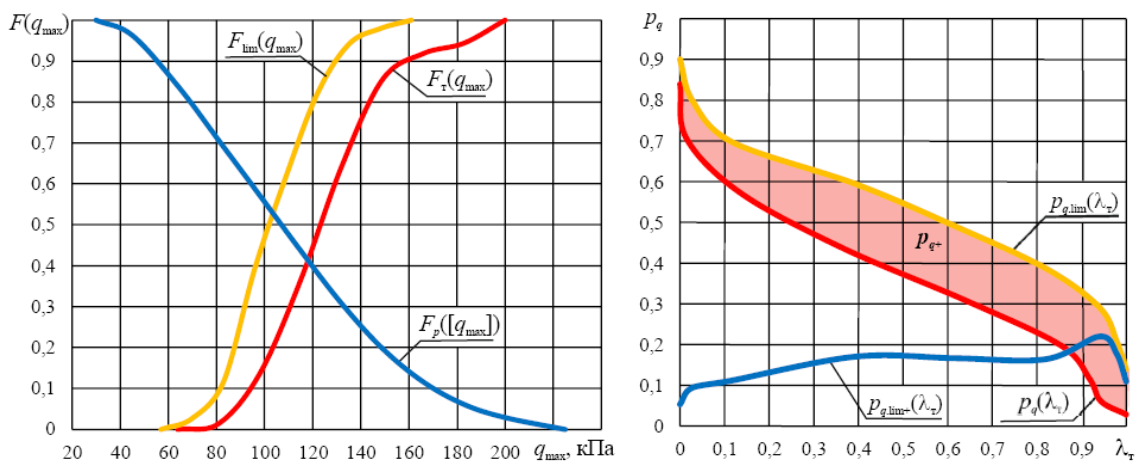


Рисунок 1.8 — Оціночні показники дії на ґрунт сучасних колісних тракторів класу 3-5т та перспективи їх можливого покращення [79].

функції розподілу ймовірностей максимального тиску на ґрунт сучасних колісних тракторів класу 3..5 т при відсутності (F) та при наявності (F) оптимального розподілу навантаження на осі, F — функція розподілу ймовірності виконання агроекологічних вимог за територією України; рис. 1.8 б — залежність ймовірності виконання вимог агроекології на території України вищезазначених тракторів при відсутності (з) та наявності (р) систем оптимального розподілу ваги на тягових операціях від частки тракторів () з відповідним максимальним тиском на ґрунт (q), підвищення ймовірності виконання вимог агроекології (р) при використанні систем регулювання розподілу ваги по осях.

Звісно, що підбір шин, їхнє баластування та регулювання тиску повітря, системи регулювання розподілу навантажень на осі фактично є заходами вдосконалення уже сформованих конструкцій тракторів. Однак і питання конструктивного синтезу, компоновання трактора тягового класу 3т з умов власне агроєкології є вкрай проблемним з умов забезпечення відповідного значення сили зчеплення коліс з ОП, що при відомих фізико-механічних характеристиках ґрунтів визначальним чином забезпечується насамперед за рахунок відповідної ваги самого трактора. Очевидно, що перехід нове покоління колісних тракторів з більш ніж удвічі збільшенням класу тяги (звичних 1,4т колісних МТЗ, ПМЗ до 3,0 т – ХТЗ Т150К тощо) зумовив і відповідне зростання спорядженої, власної маси трактора, як умови забезпечення відповідного запасу сили зчеплення коліс з типовими ґрунтами, достатніми для реалізації проєктного класу тяги з врахуванням сумарної сили опору руху на регламентованих швидкостях руху з умов агротехнологій. Виходячи з попередньо визначеної спорядженої маси трактора (з урахуванням довантаження, як правило, задньої осі за рахунок певного навісного чи причіпного технологічного, землеобробного обладнання) наступним етапом (як у нових підходах- методиках формування основних параметрів трактора на етапі ескізного компоновання [81], так і класичних у колишніх СРСР/ СНД [82, 83]).

Як приклад такого підходу – на рис. 1.9 представлена номограма вибору шин ведучої осі колісного трактора згідно класичної методики [82], опрацьованої в НАТИ (головний автотракторний інститут в СРСР) під суглинок, нормально зволожений (точні кількісні фізико-механічні характеристики ОП не визначено).

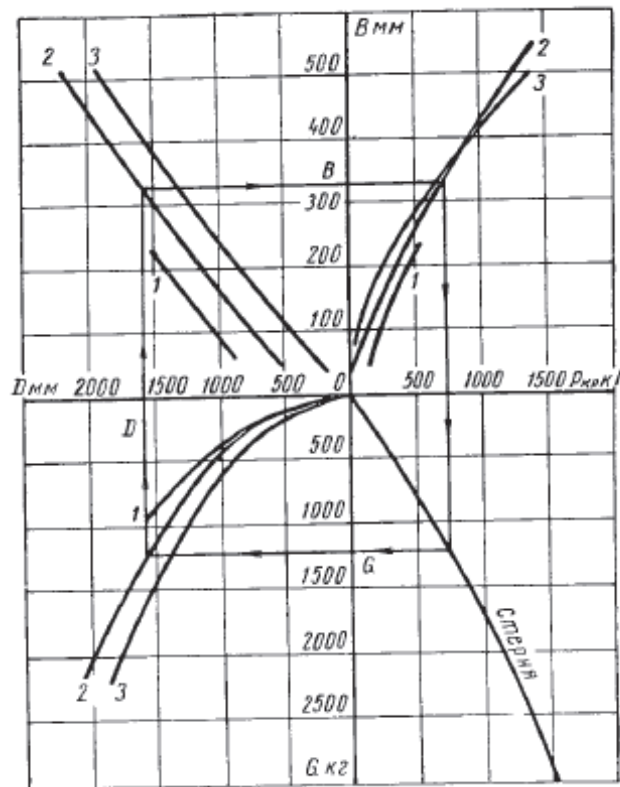


Рисунок 1.9 — Номограма підбору шин ведучої осі трактора [82]

Нижній правий квадрант номограми – графічно оптимальна залежність тягового зусилля P від навантаження на колесо G , у лівому нижньому квадранті (рис. 1.9) – залежність вантажності шини від її діаметра (слід зауважити шин типу кінця 1960-70-х років). При цьому співвідношення вантажності і діаметра шини визначено для тиску повітря у шині $0,8-1,1 \text{ кг/см}^2$, як оптимального для технології обробітку ґрунту. Лівий верхній квадрант - залежності між діаметром D та шириною B профілю шини для 3-х типорозмірів : 1 – шин вузької серії, 2 – середньої ширини та 3 – широко профільних шин. Правий верхній квадрант характеризує опосередковані залежності тягового зусилля від ширини профілю шини. Підбір шин відштовхується від заданого необхідного тягового зусилля P (як суми сил опору руху з визначеною агротехнічно швидкістю та необхідної сили тяги на гаку) до визначення у правому нижньому квадранті необхідного вертикального навантаження G на колесо з умови забезпечення необхідної сили зчеплення шини з ОП (рис. 1.9.)

Очевидно, що на формування сил зчеплення та опору руху шин визначальний вплив мають задані фізико-механічні характеристики ґрунту, як ОП. Зміна останніх суттєва вже для другої (задньої) ведучої осі, колеса якої переважно рухаються при обробці ґрунту уже по ущільненій колії від коліс передньої осі з значно кращим зчепленням і меншим опором руху [48, 49]. При цьому зміна щільності ґрунту обумовлює і відчутні зміни таких важливих для аграріїв характеристик, як пористість та водопроникність ґрунту, рис.1.10 [84].

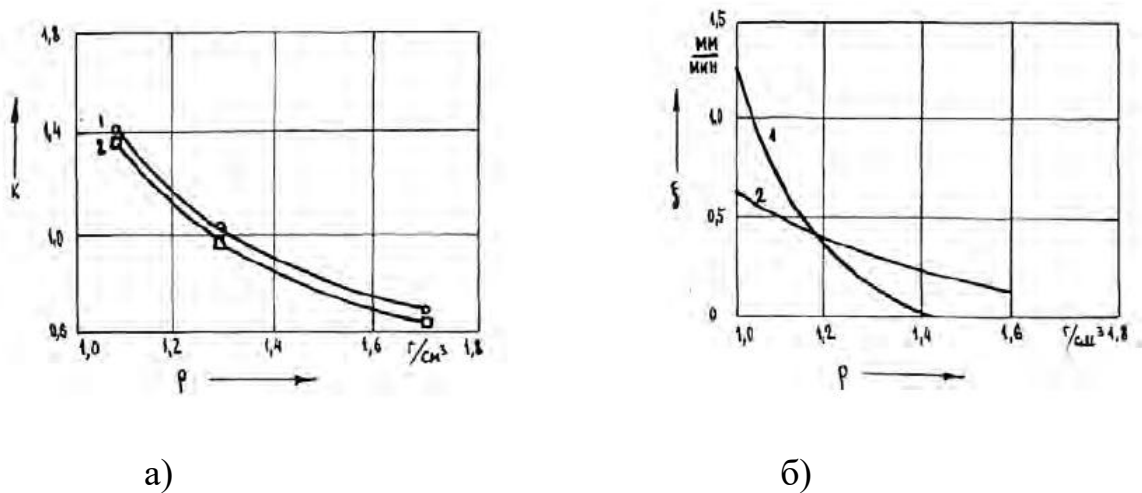


Рисунок 1.10 — Зміна агрохарактеристик ґрунту при ущільненні [84].

Коефіцієнт пористості K зменшується з оптимального 1,4 при щільності ґрунту 1,1 г/см³ куб. до майже 0,65-0,7 при ущільненні до 1,6 г/см³ (рис. 1.10а), а водо-(волого)проникність відповідно зменшується практично до нуля, (рис. 1.10 б). Тут 1 – зерново-підзолистий суглинок, 2 – відповідно супісок. Найбільш ефективним конструктивним заходом зменшення ущільнення ґрунту колісними тракторами класу 3-5 т, за результатами сучасної білоруської школи тракторобудування [84], є використання здвоєних коліс. Практично до таких же висновків приводять результати і сучасних вітчизняних досліджень [85], що, зрештою, підтверджується і у країнах ЄС [11,12, 67-69].

Детальний аналіз можливостей зменшення конструктивної (спорядженої) маси колісного трактора тягового класів 1,4- 6.0 в аспекті агротехнічних вимог і забезпечення максимального ккд силового приводу проведено головним конструктором МТЗ М. Зезетко [86]. Актуальне, сучасне

дослідження, пов'язане очевидно з роботами по розвитку сімейства колісних тракторів МТЗ «Беларус», базується на визначенні необхідних значень конструктивної (без водія, паливномастильних матеріалів і рідини системи охолодження, без інструменту) та експлуатаційної (спорядженої в автомобілебудуванні – з водієм 75 кг, інструментом і повністю заправленими системами) різних класів тяги базується на умові забезпечення максимального сумарного ккд силового приводу – інженерного або тягового критерію - ккд [87]:

$$\square\square \quad \eta_t = \eta_{tr}\eta_k\eta_b\eta_{def} = \eta_{tr}\eta_k(1 - \delta)F_o/F_k \quad (1.1)$$

де: η_t - ККД трансмісії, η_k - ККД – втрати енергії в колісному рушію; η_b ККД втрати енергії за рахунок пробуксовування, F_d — ККД, що характеризує втрати енергії на переміщення коліс і деформацію ґрунту; F_b - сила тяги на колесах; F_b — сила тяги на буксирному гаку; δ - коефіцієнт буксування (оптимальне значення з умов максимуму зчеплення шин з ОП – 0,15 [48, 88,8 9], F_o — сумарне зусилля опору руху (з рахуванням деформації ОП і утворення колії). Чисельна оцінка – розрахунок складових (1.1) базується на емпіричних залежностях, у т.ч. і звичних у СРСР/СНД і поки що в Україні параметрів фізико-механічних характеристик статички ґрунтів, що безперечно є коректним для будівництва нерухомих споруд і автодоріг, але занадто громіздким і проблемним щодо опису взаємодії з ОП рухомого колеса (опір зсуву ґрунту у горизонтальній площині, пробуксовування, зчеплення шини тощо [49]). Зокрема відповідні значення тягового зусилля та сумарної сили опору руху трактора F_k визначаються згідно [88]:

$$F_k = (f_{ko}KM_e/g\delta L)[\ln c h\delta L/K_d - f_s(1/ch\delta L/K_d -$$

(1.2)

$$F_o = M_e/g^2 K_o bD_e^2$$

(1.3)

де M_e — експлуатаційна маса трактора, кг; f_{ko} і f_s -коефіцієнти тертя ковзання і спокою ґрунту; K_d — коефіцієнт деформації ґрунту, м; K_o — коефіцієнт об'ємного зминання ґрунту, Н/м куб; δ — показник буксування колеса, в частках від 0 до 1; L — опорна довжина колеса, м; b — ширина колеса, м; D_e - приведений діаметр колеса, м, що визначається як :

$$D_e = D(1 + 10M_e/\sigma_n D) \quad (1.4)$$

де σ_n — несуча здатність ґрунту, Н / м³.; D — номінальний діаметр колеса, м.

Значення останнього дозволяє визначити орієнтовну глибину колії h :

$$h = M_e^2 / (g^2 K^2 b^2 D_e^2) \quad (1.5)$$

а значення глибини колії дозволяє дати оцінку опорної довжини колеса L

$$L = r_e \arctg \sqrt{(2r_e h - h^2)} / r_e + \sqrt{2r_e h} \quad (1.6)$$

де r_e - приведений радіус колеса, $0,5 D_e$

Визначення — оцінка пробуксовування колеса у теорії руху колісних тракторів орієнтовно залежно від типу ґрунту (як правило стерня під оранку чи чорнозем) з використанням 2-х емпіричних коефіцієнтів за даними польових випробувань інших марок тракторів [86, 88].

Інша методика визначення необхідної експлуатаційної маси трактора заданого тягового класу подана у роботі [87]. В основу останньої покладено повне використання сили тяги на гаку з врахуванням реальних тимчасових перевантажень з-за неоднорідності характеристик ґрунту. Коефіцієнт можливого перевантаження у процесі оранки (як найбільш енергоємної операції) згідно [87] знаходиться у межах 1,62 – 1,71. У практиці КБ використовується і методи експертних оцінок на базі статистичного узагальнення існуючих конструкцій та тенденцій розвитку. Наприклад щодо

оцінки потенційної конструктивної маси трактора залежно від класу тяги на гаці на МТЗ використовується залежність:

$$M_e = (1 \pm 0,1)202,5F_h \quad (1.7)$$

У принципі всі вищерозглянуті методики дають приблизні результати з виходом на експлуатаційну масу трактора класу 3.0 – понад 7,5 т, а класу 5 – біля 11,5-12 т. (ще донедавна домінантні з часів СРСР колісні трактори МТЗ, ЮМЗ класу 1,2 т – біля 3,8 т).

На рис.1.11 за результатами аналізу [86] представлено статистичний аналіз залежності експлуатаційної маси колісних тракторів різних класів тяги виробництва країн ЄС, СНД та США, де ломаною лінією виділено конкретні моделі МТЗ.

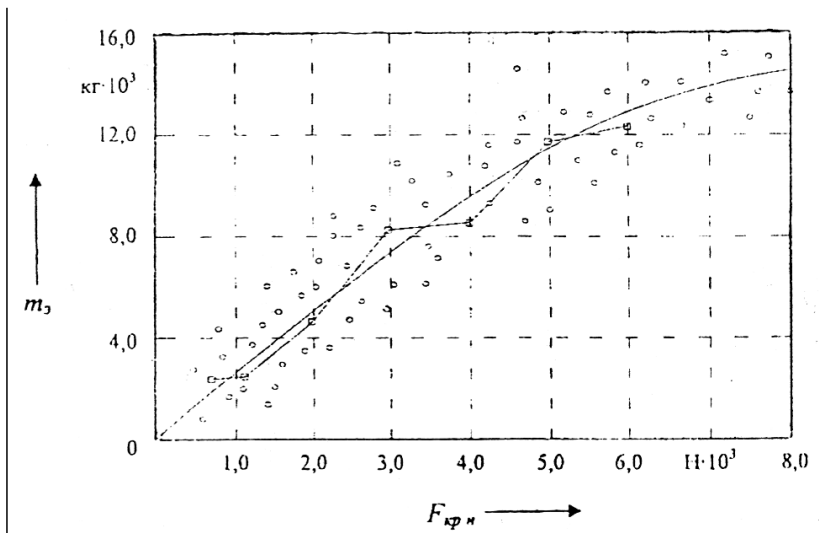


Рисунок 1.11. Узагальнена залежність експлуатаційної маси колісних тракторів m від класу тяги F [86].

У циклі 6 публікацій [90] опрацьовано аналогічну за своєю структурою методику розрахунку основних параметрів трактора на етапі проєктних робіт з використанням чисельних методів та ітераційного підбору кращих характеристик. Але у основі аналітичних залежностей використовуються усереднені емпіричні залежності. Що, як зазначено у роботі [81], не дозволяють враховувати конкретні характеристики шин, зміну розподілу навантажень на осі, баластування і тощо.

У роботі [91] запропоновано методику визначення експлуатаційної маси трактора з умови обмеження недопустимого ущільнення ґрунту та можливого самовідновлення природнім шляхом впродовж аграрного сезону обробітку земель. Однак практична реалізація цих положень обмежує експлуатаційну масу трактора та, відповідно клас тяги до 2 т, відповідно знижує продуктивність МТА і поки не знайшла підтримки у РФ. Разом з тим домінантний взаємозв'язок класу тяги і відповідної експлуатаційної маси трактора зумовлюють пошук можливостей зменшення переущільнення ґрунту тракторами класу тяги 3-6 т шляхом регулювання тиску повітря у шинах, використання здвоєних шин і баластування [11, 35, 80].

Для подальших досліджень практичний інтерес представляють експериментальні дані, що використовуються у практиці МТЗ, щодо прийнятих у конструкторській практиці коефіцієнтів зчеплення та опору кочення коліс на різних типах ґрунтів помірної зволоженості у періоди механічної обробки ґрунту, табл. 1.3 та зміни коефіцієнта зчеплення шини з ОП залежно від пробуксовування колеса для 4 –х типів ОП, табл.. 1.4 [86]. Ці дані практично співпадають і з результатами інших досліджень щодо ущільнення ґрунту тракторами [92]. Загалом ці дані для тракторних шин з яскраво вираженими ґрунтозачепами протектора практично близькі до аналогічних даних щодо автомобільних шин [49, 93, 94]. Разом з тим очевидно, що рисунок та висота протектора шини, насиченість виступами бігової доріжки шин мають суттєвий вплив на тягово-зчіпні характеристики та опір коченню.

Таблиця 1.3. — Діапазони значень коефіцієнтів зчеплення та опору руху згідно даних [86].

Опорна поверхня	Кочення, f	Макс. Зчеплення, φ	Розрах. зчеплення, φ
Грунтова суха дорога	0,03 - 0,05 0,05 - 0,07	0,7 - 0,9 0,7 - 0,9	0,65 - 0,80 0,65 - 0,80
Цілина, щільна		0,6 - 0,8	0,55 - 0,75
Скошений луг	0,06 - 0,08		
Стерня колоскових культур	0,08 - 0,12	0,6 - 0,85	0,65 - 0,80
Поле, підготовлене під посів	0,16 - 0,18	0,4 - 0,8	0,35 - 0,55
Болотисто-торф'яна цілина	0,11 - 0,20 0,03 - 0,04	0,4 - 0,5	0,35 - 0,55
Вкатана снігова дорога		0,3 - 0,4	0,30 - 0,35

Загалом базові наукові основи досліджень і оцінки переуцілювання сільськогосподарських угідь колісними МТА, що сформувались у 1980-х роках в СРСР (і залишились досі базовими для пострадянських держав) викладені в монографії [9].

Таблиця 1.4. — Зміна коефіцієнта зчеплення тракторних шин залежно від пробуксовування [86]

Опорна поверхня	Пробукс. $\delta = 0,1$ Зчеплення φ	Пробукс. $\delta = 0,2$ Зчеплення φ
Поле, підготовлене під посів	0,52	0,64
Стерня	0,7	0,75
Щільний ґрунт	0,75	0,82

Асфальтобетон, сухий	0,8	0,85
----------------------	-----	------

Де у ролі показників ущільнюючого ефекту МТА на поля, окрім звичного і уже відображеного у нормативних документах питомого тиску у контактi шини з ОП [24-26, 29-31], запропоновано і показник ущільнюючої дії ходової системи U (кН/м), з яким лінійно пов'язана і щільність ґрунту посередині колії, що утворена МТА підчас проїзду [95]:

$$U = \omega b q \lg N_{max} \quad (1.8)$$

$$\rho_r = \rho_o + [\rho_o(1 - \nu^2)/E_o H] U \quad (1.9)$$

де ρ_o — щільність ґрунту на контрольній ділянці, без впливу МТА; H — глибина розповсюдження деформації; h і b — відповідно глибина колії (осадка) та ширина колеса/гусениці; ν — коефіцієнт бічного розширення і модуль об'ємної деформації ґрунту; $\lg N$ — десятковий логарифм числа проходів коліс по одному сліду/колії; ω — коефіцієнт розміру і форми рушія, для коліс + 1,25; L — довжина опорної площі контакту колеса з ґрунтом; χ — коефіцієнт інтенсивності накопичення незворотної деформації ґрунту при повторних навантаженнях. Його визначають, як:

$$\chi = \operatorname{tg} \beta / (\rho_1 - \rho_o) \quad (1.10)$$

де у свою чергу β — кут нахилу лінійної функції залежності щільності ґрунту від логарифму числа проходів; ρ_1 — щільність ґрунту після одноразового навантаження. За даними [96] — для нечернозему $\chi = 0,41$, для чорнозему, згідно [97] $\chi = 1,5$, для ґрунтів в Одеській обл. згідно [98] $\chi = 1,0$ (останнє і рекомендують приймати у випадку невизначеності для конкретного поля [9]).

Важливим є практично лінійна залежність значень показника ущільнюючої дії МТА — U з іншими базовими показниками ґрунту, що є

визначальними з точки зору агротехнології, як от пористість та щільність, (рис. 1.12) [97], загальний опір – енергозатратність обробітку ґрунту, (рис. 1.13) [99].

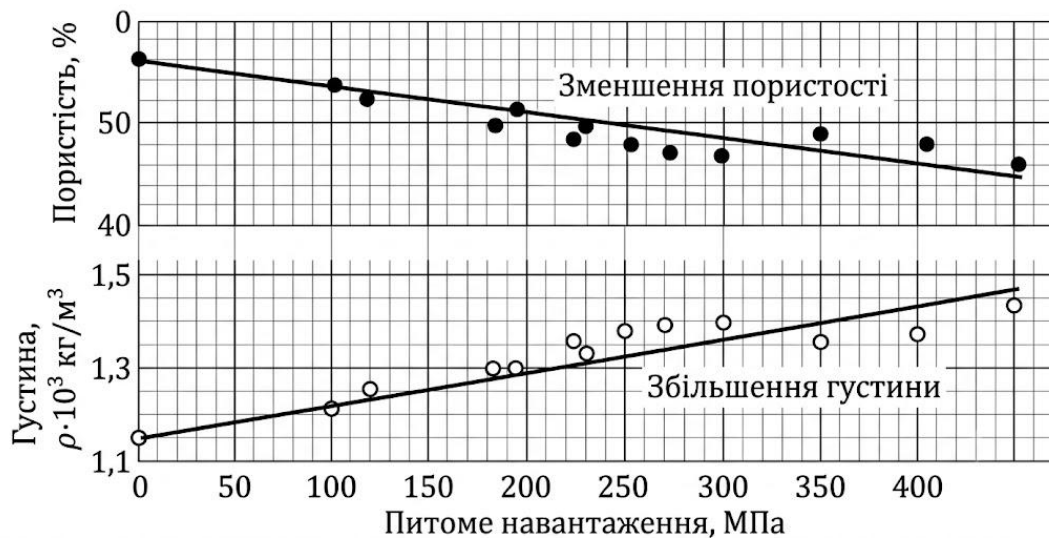


Рисунок 1.12 — Залежність щільності та пористості ґрунту (шар 0-20см) в колії трактора від значень показника ущільнюючої дії U [97].

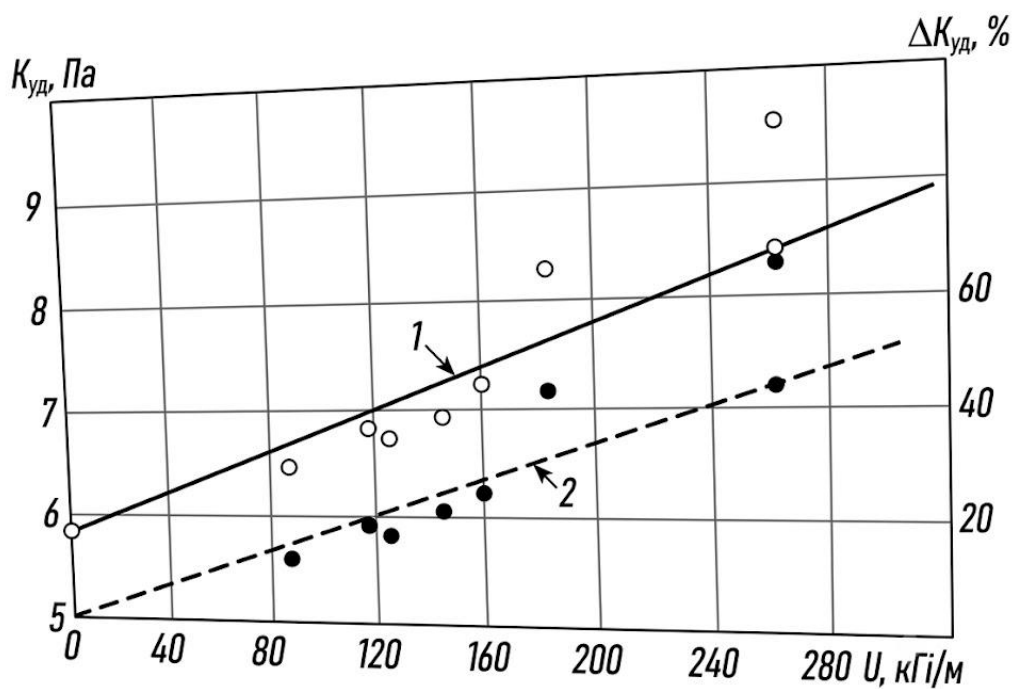


Рисунок 1.13 — Залежність опору обробці ґрунту від значень показника ущільнюючої дії U згідно [99].

Взаємозв'язок показника ущільнюючої дії МТА на ґрунт U і урожайності різних культур представлено у півтора десятку досліджень другої половини 1980-х років. Практичний інтерес для нас представляють результати щодо чорноземів в Україні (частково є і у [9]). Чорноземи з точки зору фізико-механічних характеристик і агроекології, прохідності практично не досліджувались у західних наукових школах, у т.ч. і щодо прохідності ВАТ (відповідні випробувальні лабораторії-центри інженерного корпусу армії США розміщені у Західній Європі – ФРН, Азії та Африці, однак жодної в зоні чорнозему, абсолютна більшість якого зосереджена в Україні, Кубані, Ставропіллі та Краснодарщині [49]). На рис.1.14, як приклад щодо оцінки ущільнення чорноземів, представлено зміни щільності ґрунту на глибині 0-5см (лінія 1) та на 5-10 см (лінія 2), а також урожайність ячменю (у %, лінія 3) та гороху (у %, лінія 4) за даними [100].

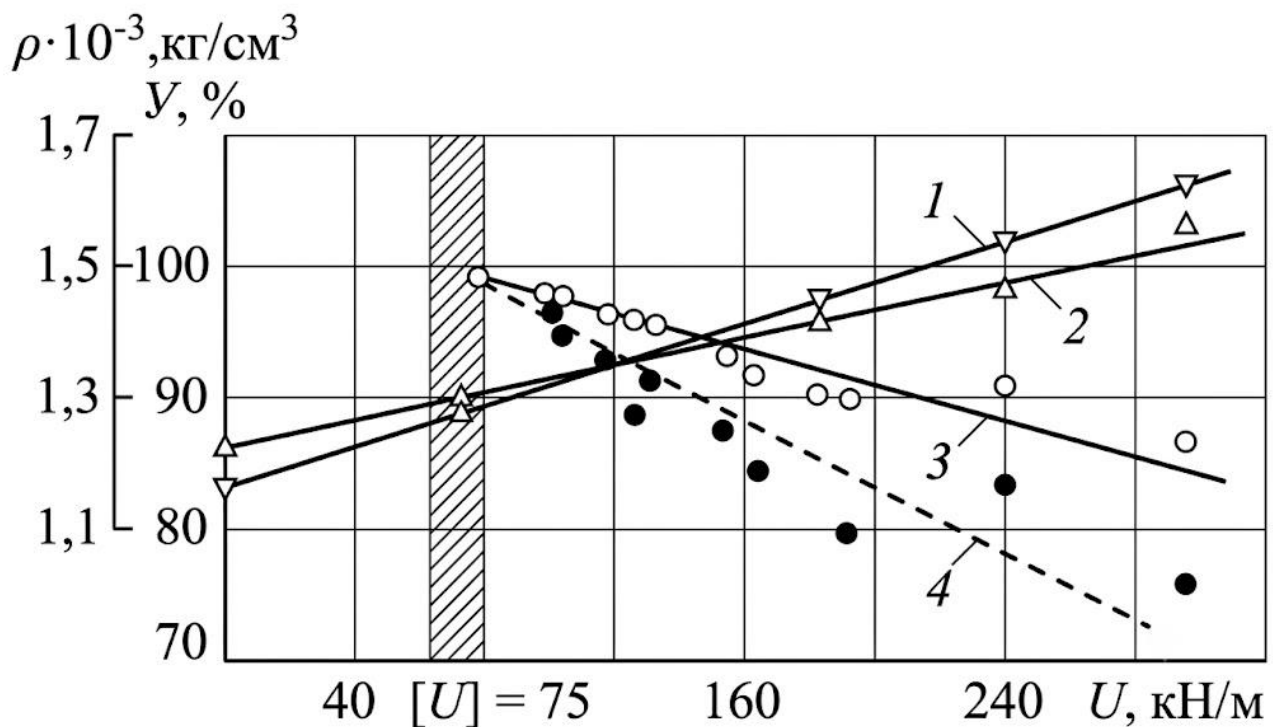


Рисунок 1.14 — Вплив ущільнення чорнозему U (Черкаська область) на щільність ґрунту (1, 2) та урожайність ячменю (3) та гороху (4) згідно даних [100].

Дослідження Гапоненка В.С. [100] цікаве ще і порівняльними даними ефекту ущільнення чорнозему трьома різними тракторами тодішнього виробництва заводів УРСР – гусеничного Т74 та колісного Т150К класу 3.0 від ХТЗ та ЮМЗ -6Л класу 1.4 від ВО «Пвденьмаш», а також переобладнаного в Українській сільськогосподарській академії модернізованого аналога Т74 – ДТ 75 Волгоградського тракторного заводу на пневмогусеничний хід (надалі розглянуті сучасні зарубіжні аналоги) – ДТ 75ПГД [101]. Окрім цього практичний інтерес представляє і кількісна оцінка показником U кратності проходів (від 1 до 4) та відповідного впливу зменшення урожайності ячменю (в чисельнику, табл.1.5) та гороху (в знаменнику, табл. 1.5) - у процентному відношенні до контрольної ділянки, що не піддавалась ущільненню ґрунту МТА.

Таблиця 1.5 — Оцінка впливу різних тракторів та кратності проходів на ущільнення чорнозему і урожайність [100]

Модель трактора	Кратність проходів МТА та зміна урожайності, %			
	1	2	3	4
Щільність ґрунту-чорнозем, Т150К, г/см куб, 0 – 5/5-10 см	1,48	1,53	1,60	1,65
	1,45	1,48	1,52	1,59
Трактор Т25	98	96	94	91
Трактор ЮМЗ-6Л	95	92	89	87
Трактор Т150К ячмінь горох	92	89	83	80
	90	85	79	76

Аналогічне об’ємне дослідження з парком тракторів класів 1,4 – 5,0 та оцінкою впливу кратності проходів (від 1 до 5) на ущільнення ґрунту та урожайність картоплі представлено у нещодавній публікації д-ра. с/г.наук

Кувшинова Н.М. [23]. (Характер ґрунту близький до зони Полісся та частково Галичини і Поділля). Характерною рисою цієї роботи, виконаної в аграрному університеті, є відсутність показника U , типового для досліджень часів СРСР, та поява як показника ґрунту (поряд з щільністю в г/см^3) пористості з розділом на вміст вологи та повітря (аерація). Останні є характерними, як буде розглянуто далі, для західноєвропейської наукової школи (умовно назвемо «західної», на відміну від радянської – «східної»). Окрім цього заслуговують уваги представлені статистичні дані щодо кількості проходів тракторів при вирощуванні різних культур (озима пшениця, картопля, кукурудза на силос, ячмінь) — від 16 до 21, у т.ч. 4-7 – транспортні роботи (серед них найважчі – з причепами-гноєрозкидачами – для тракторів МТЗ-80 та К-701 дана кількісна оцінка впливу на ущільнення ґрунту, що залишається до наступних операцій механообробітку). У табл. 1.6 представлено узагальнені нами результати досліджень впливу нижчезазначених тракторів (та кількості їх проходів) на щільність та пористість ґрунту, а також відповідні зміни урожайності картоплі.

Загалом з 2000 р. у РФ захищено 4 дисертації докторів наук по проблемі переущільнення земель і впливу на урожайність [11, 26, 27, 102], що базуються однак на вищезазначених основних положеннях та підходах щодо механіки ґрунтів та емпірики ущільнення МТА, опрацьованих ще у часи СРСР. Вони практично не зачіпають питання конструктивного синтезу нового покоління тракторів з урахуванням вимог агроєкології. Певним винятком у цьому аспекті є ряд досліджень у Білорусії, де МТЗ проводить розширення модельного ряду тракторів у класи 3 - 6 т (включно і гусеничні моделі). Зокрема заслуговує уваги порівняльний аналіз двох концепцій колісного трактора класу 5,0 з колісними схемами 4К4 та 6К6 (дво- і тривісні) [103]. При цьому слід зазначити, що схема 4К4 виконана за іншою від шарнірно-з'єднаної схеми ХТЗ ХТЗ Т160/170К та «Кіровоць» К700/730. А саме - класичною суцільною рамою з передньою керованою ведучою віссю.

Таблиця 1.6 Оцінка впливу різних тракторів на ущільнення та пористість суглинку та урожайність картоплі діаметрами коліс передньої та задньої осей та здвоєними шинами задньої осі. [23].

Трактор	Число проходів	Щільність, г/см куб	Тверда фаза, %	Вода, %	Повітря, %	Урожай, %
Контроль	0	1,16-1,36	48,8	20,7	30,5	100
ДТ-75М	1	1,24-1,36	50,8	24,4	24,8	96,8
	3	1,30-1,38	51,5	23,6	24,9	88,4
	5	1,36-1,40	53,1	23,7	23,2	80,2
МТЗ-80	1	1,28-1,36	50,8	22,8	26,4	87,2
	3	1,34-1,39	52,3	23,5	24,2	68,0
	5	1,35-1,42	53,5	23,1	23,4	64,0
Т-150К	1	1,35-1,40	53,1	23,7	23,1	78,8
	3	1,37-1,42	53,5	22,9	23,6	60,2
	5	1,42-1,48	55,4	22,9	22,7	57,0
К-701	1	1,33-1,41	53,5	22,8	23,7	65,7
	3	1,38-1,44	54,2	25,1	20,7	57,3
	5	1,44-1,48	56,2	27,4	16,4	54,6

Практичний інтерес представляють отримані результати щодо залежностей тягового зусилля ведучих коліс від величини пробуксовування (рис.1.15) [103], та покращення тягових характеристик і паливної економічності схеми 6К6 на 6-9 % при однаковій експлуатаційній масі 12,0 т і рівномірному розподілу навантажень по осях для схеми 6К6 та 45/65 для передньої/задньої осей схеми 4К4. На жаль у [103] не проведена агроекологічна оцінка цих схем компоновки. Очевидно, що схеми 4К4 з здвоєними колесами задньої осі потенційно мала б менший ефект ущільнення

по основній колії, але розширення впливу ущільнення (і збільшення опору руху) за рахунок прокладання додаткової колії зовнішніми колесами задньої осі.

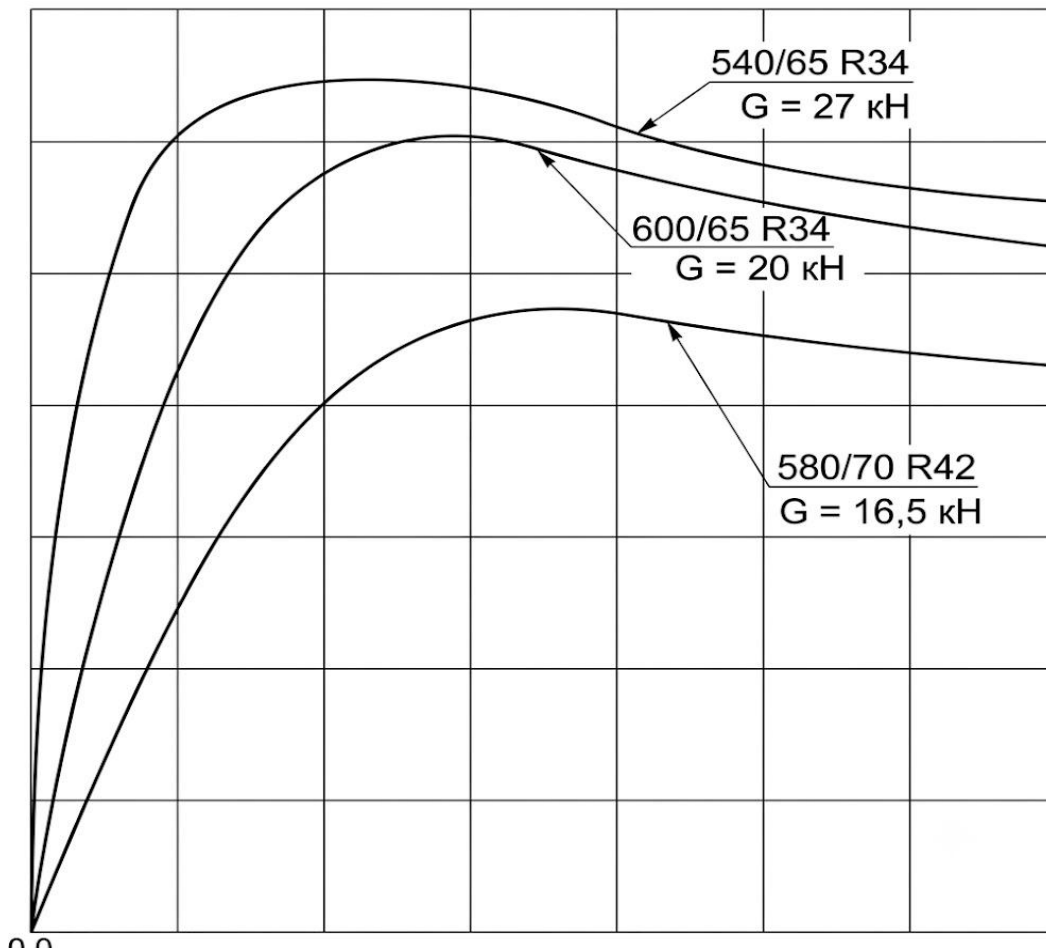


Рисунок —1.15.Залежність тягового зусилля коліс трактора від пробуксовування [103].

Тут: шини – 540/65R30 – передня вісь 4К4 (навантаження 27кН), 580/70R42 – задня вісь 4К4 (навантаження 16,5 кН – здвоєні шини осі), 600/65R34 всі осі 6К6 (навантаження на колесо 20 кН).

Ущільнення ґрунту при схемі 6К6 відбувається уже в 3 проходи коліс, але з меншим навантаженням на колесо. Практичний інтерес для конструкторів представляє зміщення зони максимального зчеплення/тяги коліс при збільшенні вертикального навантаження в зону менших значень пробуксовування, (рис 1.15.)

Розвиток аграрного сектора економіки України, попри російсько-українську війну та пандемію коронавірусу, зумовив актуальність проблеми переуцільнення сільськогосподарських земель насамперед через суттєве збільшення імпорту сучасних потужних колісних тракторів класів 3.0-5.0 та відповідної інтенсифікації агротехнологій. Окрім вищерозглянутих обширних досліджень д.т.н. О.Ю. Реброва [32, 33, 79-81] необхідно виділити дослідження школи проф. В.Ф. Надикто, проф. Кувачова В.П. [6, 104-106], де детально розглянуто теоретичні засади баластування тракторів з умов дотримання нормативних агроекологічних вимог щодо допустимого тиску у контакті шини з ґрунтом - так зв. екофільності шин [29-31]. Оцінка впливу розмірності шин на взаємодію з ґрунтом на прикладі трактора ХТЗ Т150К класу 3.0 проведена у дисертаційній роботі В.Р. Білецького [35, 107], де з агроекологічних умов Полісся рекомендовано замінити серійні шини 21,3R24 на 28,1R26 з більшою площею контакту та робочому тиску повітря у шинах на рівні 0,073 МПа. Дослідженню динаміки взаємодії пневматичної шини з ґрунтом присвячена дисертаційна робота М.М. Балаки [108, 109], що однак базується на традиційних з часів СРСР засадах ґрунтознавства і практично не зачіпає проблеми агроекології. Останні однак є предметом експериментальних досліджень відомого центру випробувань сільськогосподарської техніки – ННЦ ІМЕСГ ім. Л. Погорілого у смт. Дослідне/Глеваха – роботи Адамчука В.В., Погорілого С.П. [110-112]. У цьому аспекті слід зазначити, що окрім тракторної техніки та механообробки ґрунтів у цих дослідженнях розглянуте питання і транспортних робіт на полях – внесення добрив, вивезення урожаю на базі повнопривідних автомобілів. Використання важких вітчизняних повнопривідних автомобільних шасі КраЗ колісних схем 4х4 та 6х6 однак є проблемним власне з умов агроекології – надмірного тиску шин на ґрунт при повній масі до 23 т (6х6) [111,112]. Слід зазначити, що проблема сільськогосподарської вантажівки підвищеної прохідності для руху бездоріжжям та ґрунтовими дорогами залишилась актуальною ще з часів СРСР [113, 114] та появи у 1984-2002 рр. спеціалізованої моделі КАЗ 4540.

Зрештою у РФ зуміли налагодити випуск сільськогосподарських модифікацій повнопривідних самоскидів ГАЗон Некст 4х4 та КамАЗ і Урал (6х6,6х4) з одинарними шинами всюдихідного профілю та обмеженням навантажень на вісь 4-5 т., що дозволяє вкладатись у більшості випадків у агроекологічні норми доступного ущільнення ґрунту. В цьому плані заслуговує уваги кандидатська дисертація Болдовського В.Н., що виконана у ХНАДУ [115], хоча проблема автомобілів для роботи на полі та на ґрунтових дорогах для України залишається практично відкритою. Недостатньо досліджено і вплив навісного та причіпного обладнання тракторів на динаміку перерозподілу навантажень на осі і зміни взаємодії коліс з ґрунтом, хоча сама механіка взаємодії земле обробних знарядь з ґрунтом детально опрацьована проф. Ковбасою В.П. [116, 117]. Зрештою слід констатувати появу перших публікацій у цьому напрямі [118], як і узагальнюючих еколого-економічних досліджень ефективності МТА [119].

Західноєвропейська та північно-американська школи агроекології МТА з проведеного огляду і аналізу відрізняються від школи СРСР насамперед через:

- відсутність однозначного домінування тиску в контакті шини з ґрунтом як визначального показника МТА з умов агроекології;
- акцент в агроекологічній оцінці МТА на зміни щільності ґрунту, пористість та, відповідно, вміст вологи і повітря, як визначальних показників змін урожайності ґрунту;
- оперативна оцінка реальних фізико-механічних характеристик конкретного поля, як правило пенетрометрами з конусним наконечником, що дозволяє дати комплексну оцінку опору ґрунту вертикальній деформації та деформації зсуву, що більш наближене до реалій взаємодії колеса з опорною поверхнею, що деформується;
- дослідження проводяться на більшу глибину, як правило до 1 м, і більше уваги надається проблемі утворення так зв. підорного шару ґрунту (так

званого підшви) – незворотного ущільнення нижче звичної глибини механічної обробки (40-50 см), та його рекультивації;

- практично всі дослідження проводяться стосовно комплексів МТА – з навісним або причіпним обладнанням, що суттєво впливає на зміну навантажень на ґрунт ходовою системою та пробуксовування ведучих коліс з-за додаткового опору руху в результаті взаємодії робочих органів обладнання з ґрунтом;

Відсутність акценту на питомий тиск у контакті шини з ґрунтом, як це зроблено з часів СРСР і в Україні [29-31], обумовлено фактом різних глибин та периметру ущільнень ґрунту при однаковому значенні тиску у контакті для різних типорозмірів шин та відповідних навантажень, що опубліковано ще одним з основоположників західної школи агроекології МТА – W. Soehne [17] (рис.1.16):

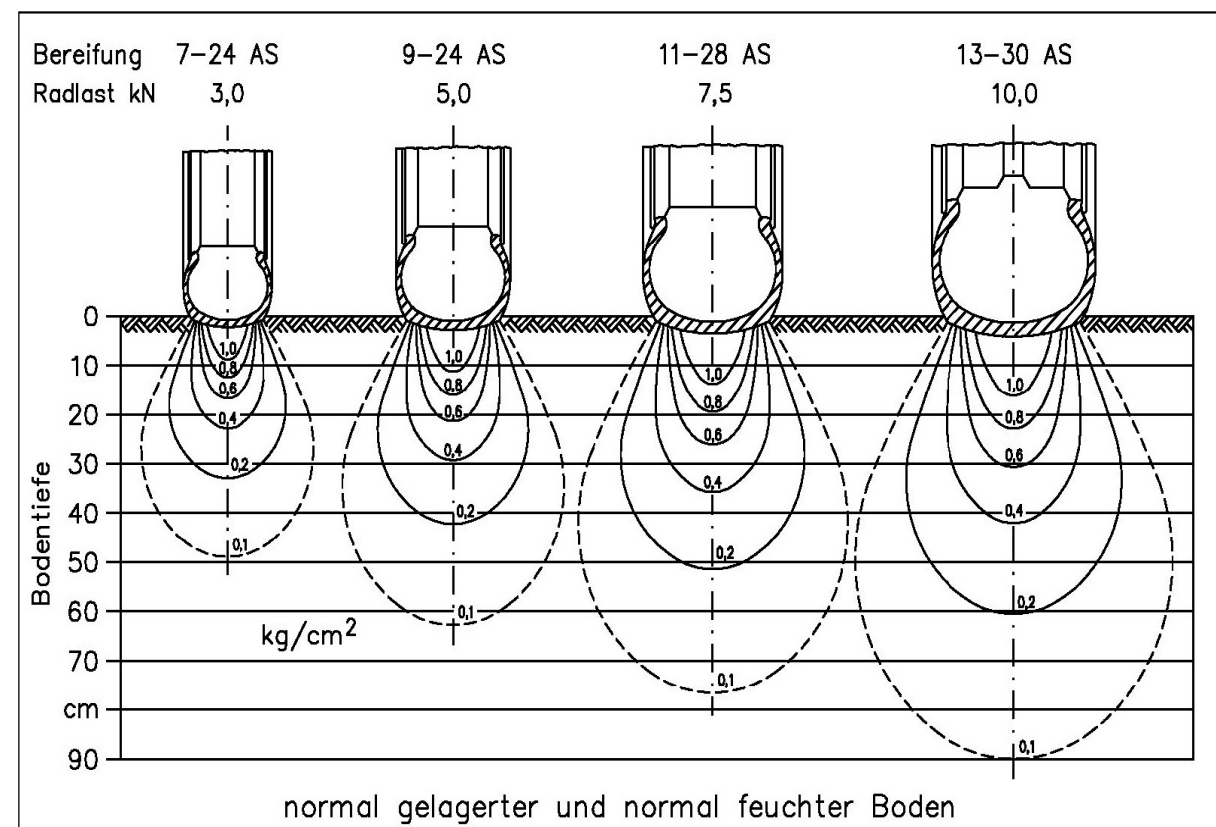


Рисунок 1.16 — Залежність навантаження на ґрунт (kg/cm²) при однаковому тиску у контакті шини з ОП від розмірності шин (7-24S ...13-30S)

та відповідного навантаження на шину (3,0....10,0 kN) згідно [11,17]. (Bodentiepe — глибина ґрунту).

За результатами досліджень [58, 120, 121] констатовано наступні взаємозв'язки між навантаженням на колесо, площею контакту і тиском повітря у шині:

- збільшення тиску повітря у шині зменшує площу контакту та підвищує тиск у контактi з ОП, що концентрується по осi обертання колеса;
- однакові навантаження на колесо спричинюють на однаковій глибині ґрунту практично однакові навантаження/напруження – ущільнення ґрунту;
- однакові питомі тиски у контактi шини з ОП спричиняють практично однакову глибину колії при різних розмірностях шин;
- визначальним для формування глибини колії та ущільнення верхніх шарів ґрунту є величина тиску у контактi шини з ОП;
- визначальним для ущільнення нижніх (підорних) шарів ґрунту є величина навантаження на колесо;
- збільшення кратності проїздів, у т.ч. з різними шинами і навантаженнями на перелню і задню осi, обумовлює зростання ущільнення ґрунту за спадаючою експоненціальною залежністю (що співпадає з даними згідно WES- методики [48, 49]).

При незмінному навантаженні на колесо, що обумовлено розмірністю МТА, найбільший ефект на зменшення ущільнення ґрунту дає перехід на низькопрофільні шини з зменшенням тиску повітря в них, (рис. 1.17) [67].

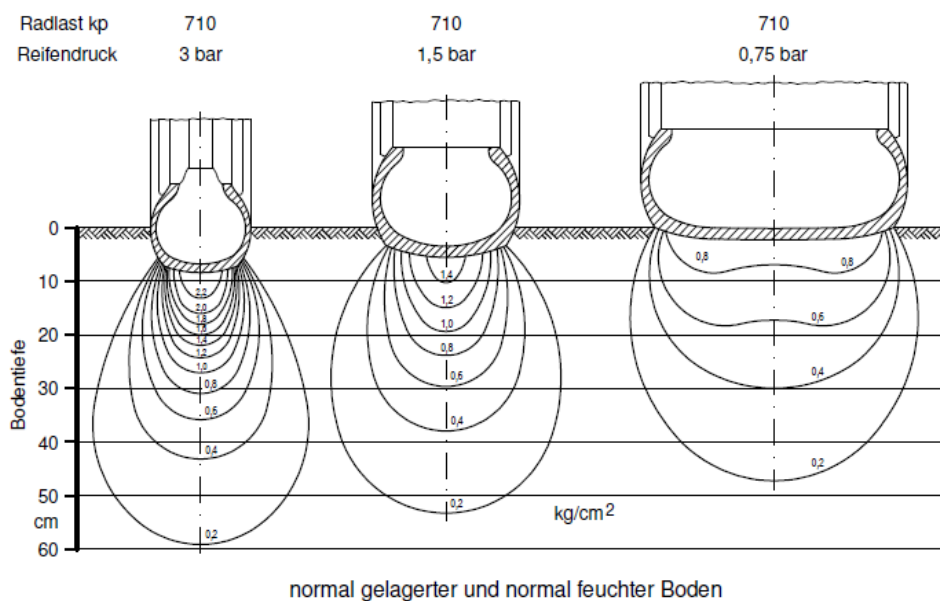


Рисунок 1.17. Вплив типорозміру шин і тиску повітря у шинах (3,0-0,75 бар) на ущільнення ґрунту при незмінному навантаженні на колесо 710 кг [67].

Вплив кратності проїзду МТА по тій самій колії (що практично не досліджувалася у СРСР/СНД) детально розглянуто у дисертаційній роботі І.Н. Bolling [12], табл..1.7 (навантаження на шину 25 кН).

Таблиця 1.7 — Оцінка впливу кратності проїзду шин на глибину колії та тиск в ґрунті (щільність сухого суглинку —1,4 г/см³, вологість 17,5 % об’ємн) [12].

Кількість проїздів	1	6	10
	5	10	13
Тиск в ґрунті (бар) на глибині 20 см	0,8	1,2	1,4
Тиск на глибині 30 см	0,5	0,7	0,9
Тиск на глибині 40 см	0,45	0,55	0,65

В цьому аспекті заслуговує уваги також дисертаційна робота R. Horn [122], де проведено дослідження ущільнення ґрунту при проході тракторів з

різними колесами передньої і задньої осей, у т.ч. і кратності проходів (велика кількість моделей тракторів і уже в Україні, у т.ч. класів 3.0-5.0 обладнані різними колесами та з різним навантаженням на передню і задню осі, вітчизняні дослідження та у СНД зосереджені на моделях ХТЗ Т150/Т170К та К700 з однотипними шинами обох осей). Практичний інтерес представляють і результати оцінки кратності проїздів – 2-кратного з навантаженням 4 т на колесо і 8-кратного з навантаженням 1 т на колесо (тобто формально сумарно однаковим навантаженням на ґрунт), де у останньому випадку зафіксовано практично 2-кратне ущільнення у орному шарі ґрунту, рис.1.18 [123].

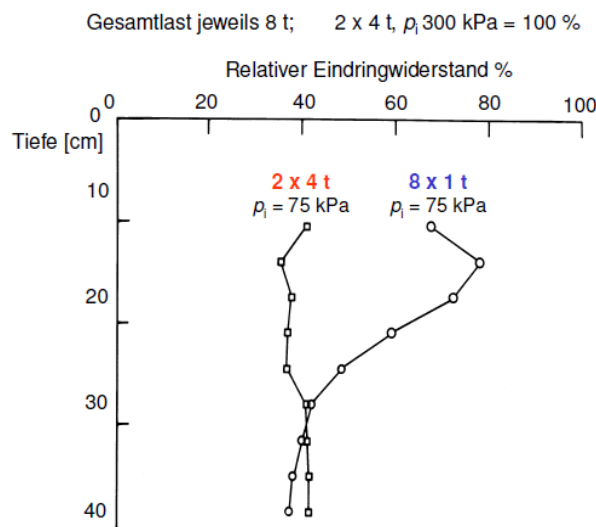


Рисунок 1.18. — Порівняння ущільнення орного шару при різних кратності проїздів і навантажень на колесо (Tiefe – глибина ґрунту, см; Relativer Eindringwiderstand – відносне ущільнення ґрунту) [123]

Визначальною відмінністю Західної наукової школи у сфері оцінки техногенного впливу МТА на ущільнення і родючість сільськогосподарських угідь є акцент на зміни щільності ґрунту та його пористість, включно вміст повітря та вологи, як визначальні чинники родючості [11, 12, 124-126]. Порогові значення щільності та пористості ґрунту (у т.ч. об'ємний вміст повітря, вологи) були визначені ще у 1970- початку 1980-х років – дослідження

W. Czeratzki [124] та Н. Petelkau [125], табл.1.8. Відповідне значення вологості різних видів ґрунту з умов агротехнологій Західної і Східної наукових шкіл практично ідентичні.

Таблиця 1.8.

Критичні, порогові значення щільності та пористості ґрунту [125,126].

Параметри	Значення	Примітка
Щільність сухого ґрунту, г/см куб	$\geq 1,60$	Супісок
	$\geq 1,45$	Суглинок
	$\geq 1,20$	Глина
Пористість ґрунту, % об'ємн.	$\leq 39-44$	Від типу ґрунту
Вміст повітря, % об'ємн,	≤ 15	Шар 0 – 5 см Супісок
	≤ 10	Суглинок
	≤ 12	Глина

Практичний інтерес представляють результати дослідження С. Sommer [126] власне щодо чорнозему з оцінкою впливу зміни тиску в ґрунті (Bodendruck, кПа) на процентну зміну об'єму пористості чорнозему (Porenvolumen, %), (рис.1.19).

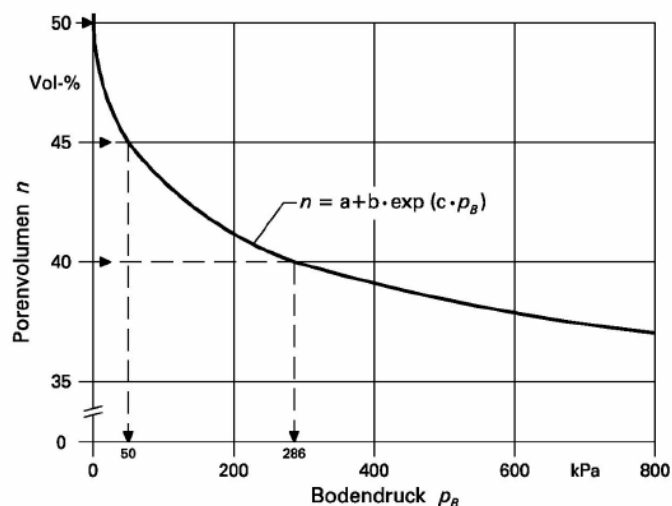


Рисунок 1.19 - Вплив зміни тиску у ґрунті-чорноземі на питому об'ємну частку пор (вологи і повітря) згідно даних [126]

Певні відмінності характерні і щодо розрахункового визначення площі контакту шини з ґрунтом – найбільш поширеною (і прийнятою у певних нормативних рекомендаціях) є формула Е. Diserens [127], що дещо відрізняється від прийнятої у Східній науковій школі [24, 30] – опрацьована щодо радіальних шин, що зараз домінують у МТА, та враховує типорозмір шин на базі емпірично визначених коефіцієнтів регресії :

$$A = (a B D) + (b p) + (c F) \quad (1.10)$$

де: A – площа контакту см^2 ; F – навантаження на шину H ;

p – тиск повітря у шині кПа , (бар); B – ширина шини (мм);

D – статичний діаметр шини мм ; a, b, c – коефіцієнти типу шин, табл.

(1.9)

Таблиця 1.9.

Значення коефіцієнтів типорозміру шин щодо площі контакту [127].

Тип шини	a	B	C
Повнопрофільні	0,260	- 205,944	0,566
Низькопрофільні	0,416	- 457,670	0,186
Підвищеної прохідності	0,420	-1120,680	0,370

Інші, невизначені	0,428	-	0,221
-------------------	-------	---	-------

Визначення - розрахунок середнього ефективного тиску у контакті шини з ґрунтом, як показника впливу МТА з умов агроєкології, теж відрізняється від прийнятого з часів СРСР у вітчизняній практиці [24,31] і базується на формулі Newmark-Sohne [17, 128-131]:

$$\delta_k = \delta_o \left[1 - 1/\sqrt{[(r/z)^2 + 1]}^{vk} \right] \quad (1.11)$$

де: δ_o — тиск безпосередньо у контакті шини з ОП, кПа; r — еквівалентний радіус площі контакту шини з ОП, см; z - відносна глибина колії; vk — фактор концентрації. Значення останнього коливається у діапазоні від 2 до 9 залежно від типу ґрунту і вмісту вологи з зростанням значення для м'якших ґрунтів з зменшенням розповсюдження тиску в глибину (так зв. груші деформації ґрунту під зоною контакту шини з ОП). Переважно $vk = 5$ для м'яких ґрунтів інтенсивного землеробства, $vk = 4$ для твердішого ґрунту з меншою інтенсивністю обробки.

Загалом вищезазначена практика агроєкологічної оцінки, де окрім середнього тиску на ґрунт, акцент зроблено на оцінку зміни щільності та пористості ґрунту під впливом МТА фактично узагальнена у [129] і використовується і державними установами федеральних земель ФРН для проведення практичного моніторингу стану сільськогосподарських земель з точки зору агроєкології під впливом МТА, як приклад [130, 131, 132, 133].

1.3. Висновки по огляду, постановка проблеми, мети та завдань дослідження

Проведений огляд та аналіз літературних джерел щодо оцінки МТА з умов агроєкології в Україні, країнах СНД та ЄС дають підстави зробити наступні висновки [133, 134, 136, 137]:

1. Зростаюче використання в Україні, зрештою як і в ЄС та СНД, важких колісних МТА класів 3-6 у аграрному секторі зумовлює особливу

актуальність оцінки та законодавчого регулювання їхнього впливу на ущільнення та деградацію ґрунтів, що обумовлює і відповідне відчутне зниження урожайності сільськогосподарських культур.

2. Слід констатувати суттєві відмінності у методиках агроекологічної оцінки автомобілів і тракторів / МТА у пострадянських країнах (Східна школа) та у провідних країнах ЄС і США (Західна школа). Це обумовлює і необхідність гармонізації чинної наразі в Україні законодавчої нормативної бази у цій сфері (ДСТУ) з нормативною практикою у ЄС.

3. Методичні засади оцінки фізико-механічних характеристик ґрунтів в аспекті взаємодії коліс МТА з ґрунтами, як опорною поверхнею, та відповідні емпіричні залежності у Східній та Західній наукових школах суттєво відрізняються. Є певні відмінності і між Західною школою агроекології МТА та методологією досліджень прохідності і мобільності руху бездоріжжям військової автотехніки у НАТО (WES – методика армії США), що мають відчутно більші обсяги експериментальних та теоретичних досліджень та опрацьовані засади комп'ютеризованого імітаційного моделювання руху колісних машин бездоріжжям та ґрунтовими дорогами, що практично відсутнє у дослідженнях агроекології.

4. За результатами досліджень Західної школи агроекології (проф. W. Soehne і інш.) очевидно, що при однакових значеннях питомого тиску на ґрунт у контакті з шиною, але різних навантаженнях на колесо з відповідними змінами типорозміру шин, виникають різні за шириною та глибиною розповсюдження картини ущільнення та зміни пористості/ вмісту вологи та повітря ґрунту. Відповідно однакові значення питомого тиску на ґрунт колісних тракторів класів 1,4 та 3,0 (відповідно з різними типорозмірами коліс) обумовлюють різні агроекологічні наслідки, що свідчить про явну недостатність використання питомого тиску у контакті колеса з ґрунтом як єдиного нормативного показника агроекологічної оцінки тракторів і автомобілів / МТА у законодавчій нормативній базі (ДСТУ).

5. У вітчизняних дослідженнях щодо агроекологічної оцінки МТА, зрештою як і у інших пострадянських країнах, практично відсутні методики оцінки комплексів – тракторів з навісним чи причіпним обладнанням, що суттєво змінює навантаження на осі трактора. Недостатньо опрацьовано і процес послідовного проходження коліс передньої і задньої осей, у т.ч. з колесами різних типорозмірів, в одній колії та ефект послідовного ущільнення ґрунту.

6. Для Східної школи характерно також фактична відсутність досліджень динаміки руху МТА та відповідної оцінки в аспекті агроекології, у т.ч. методами комп'ютерного імітаційного моделювання, а також методи і засоби оперативної оцінки фізико-механічних характеристик конкретних полів, що дозволило б опрацювати рекомендації щодо підбору МТА під конкретні ситуації з умов агроекології.

Відповідно *метою дисертаційної роботи* є проведення порівняльного аналізу Східної та Західної наукових шкіл агроекології МТА та наукове обґрунтування і вдосконалення вітчизняної методики агроекологічної оцінки МТА, включно з навісним або причіпним земле обробним обладнанням, у т.ч. методами комп'ютеризованого імітаційного моделювання, а також методів і засобів оперативної оцінки фізико-механічних характеристик ґрунтів з врахуванням сучасної практики країн ЄС. Обґрунтування можливості використання твердості як базового показника стану ґрунту з умов агроекології та опрацювання методики оперативної оцінки машинно-тракторних агрегатів (МТА) з умов агроекології – ущільнення ґрунту у конкретних ситуаціях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

- провести огляд та аналіз досліджень і методик агроекологічної оцінки МТА в Україні/СНД та країнах ЄС (Східна і Західна наукові школи);
- опрацювання методики оперативної оцінки фізико-механічних характеристик конкретних сільськогосподарських угідь з умов агроекологічної оцінки МТА на основі сучасних методів та засобів, що розповсюджуються у

країнах ЄС та оперативної оцінки ґрунтів як опорної поверхні військової автотехніки НАТО.

- опрацювання і обґрунтування використання твердості ґрунту та її оцінки на базі так зв. конусного індексу CI WES – методики НАТО як базового показника стану ґрунту для агроекологічної оцінки колісних машин;

- розробка математичної моделі та алгоритму комп'ютеризованої оцінки з умов агроекології конкретних моделей автомобілів та тракторів, у т.ч. з навісним і причіпним обладнанням та прив'язкою під конкретні сільськогосподарські угіддя.

- проведення експериментальних досліджень по оцінці адекватності опрацьованих пропозицій розвитку агроекологічної оцінки МТА.

- опрацювання пропозицій по вдосконаленню методик і нормативної бази агроекологічної оцінки МТА в Україні з врахуванням розвитку цих досліджень у світі.

Об'єкт дослідження — колісні машинно-тракторні агрегати, автомобілі в аспекті ущільнення ґрунтових опорних поверхонь.

Предмет дослідження - оперативна оцінка ущільнення ґрунту колесами МТА (тракторів і автомобілів) на базі заміру твердості ґрунту – значення конусного індексу CI.

РОЗДІЛ II ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ ОЦІНКИ АГРОЕКОЛОГІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ТРАКТОРІВ ТА АВТОМОБІЛІВ

2.1. Фізико-механічні характеристики ґрунту та їхня оперативна оцінка на базі WES – методики

Базові фізико-механічні характеристики аграрних угідь України детально опрацьовані науковою школою акад. НААН Медведєвим В.В. [138,139], на підставі яких та чинної нормативної бази [29-31] і характеристик сучасного парку колісних тракторів і номенклатури шин проф. Ребровим О.Ю. проведено аналіз відповідності агроекологічним вимогам, (рис. 2.1) [140].

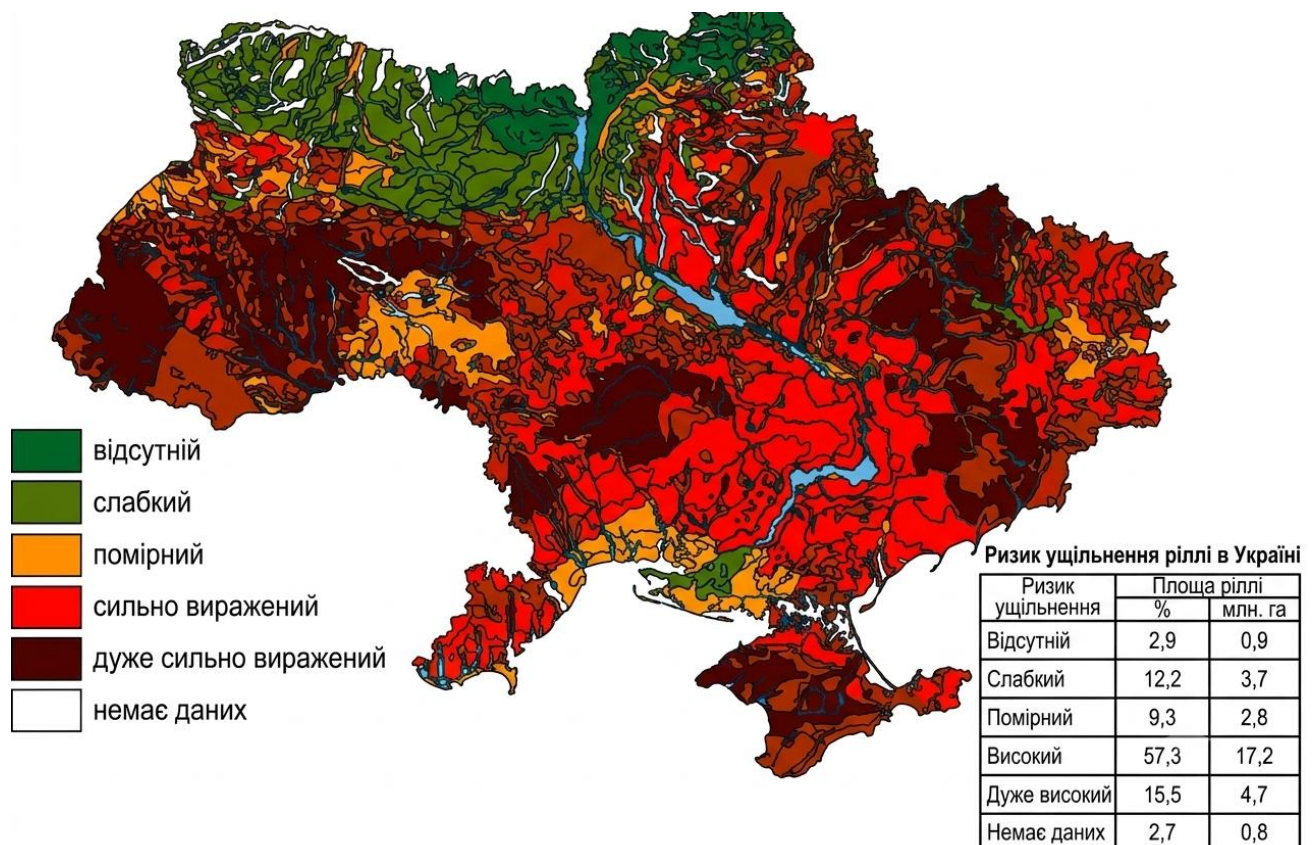


Рисунок 2.1 — Синтезована карта прогнозу ризику переущільнення ґрунтів [138]

З урахуванням узагальненого багаторічного вмісту вологи в ґрунтах підчас підготовки під ранні ярові культури навесні та під озиму пшеницю в

літньо-осінній період (за даними [138, 139], (табл. 2.1) проведений розрахунок питомого тиску на ґрунт колісного трактора ХТЗ класу 3.0 відносно нормативних вимог [29]. Вологість ґрунту у табл. 2.1 представлена у долях фізичної стиглості (ФС), одиниця якої відповідає 0,6-0,8 НВ – найменшій вологоємності, що фігурує при визначенні допустимих тисків, табл.1.1.

Фактично слід констатувати переущільнення земель при використанні існуючого парку колісних тракторів класів 3,0-6,0 з наявними типорозмірами шин при номінальному тиску повітря на домінуючій, понад 85% площі обробітку, та 60-50% з вибірки 182 шин при мінімально доп.,, устимому тиску повітря у шинах [140]. Баластування та здвоєння шин дає відчутний ефект щодо розширення екологічно допустимих площ механічного обробітку землі, але загалом не вирішує даної проблеми [79, 98, 104, 106, 141].

Таблиця 2.1— Вологість ґрунтів під час проведення обробітку [138,139]

Передпосівний обробіток ґрунту			Основний обробіток ґрунту		
Вологість ґрунту в долях фізичної стиглості (ФС)	Площа ріллі		Вологість ґрунту в долях фізичної стиглості (ФС)	Площа ріллі	
	%	млн. га		%	млн. га
—	—	—	< 0,7	4,9	1,5
< 0,8	9,4	2,8	0,7 – 0,8	8,1	2,4
0,8 – 0,9	5,0	1,5	0,8 – 0,9	59,1	17,7
0,9 – 1,0	75,8	22,7	0,9 – 1,0	14,1	4,2
> 1,0	9,9	3,0	> 1,0	13,8	4,2

Фізико-механічні характеристики аграрних угідь згідно чинної нормативної бази щодо агроєкології [29] визначаються щільністю та вмістом води НВ, що, як зазначалось вище, вимагає тривалої, лабораторної оцінки відповідно до вимог [40-42, 45]. Разом з тим керівник колективу розробників нормативної агроєкологічної бази акад. Медведєв В.В. відносно недавно зацентрував увагу щодо оцінки власне твердості ґрунту, як параметра оцінки екологічності машин та механічного обробітку ґрунту [3, 142]. Як показав і

проведений в розділі 1 огляд і аналіз оцінки агроєкології МТА в сучасних зарубіжних дослідженнях домінує саме твердість, як показник оперативної оцінки ґрунту [74-78], що віднедавна починає використовуватись і у вітчизняних дослідженнях оцінки ущільнення та урожайності земель та екології лісу [54, 143, 144].

Згідно вітчизняної нормативної бази [50] вимірювання твердості ґрунту здійснюється (з радянських часів) твердоміром Ревякіна. Однак, конструкція плунжера цього твердоміра опрацьована під схему взаємодії ріжучих елементів засобів механічного обробітку ґрунту (плуг, дискова борона тощо), що не зовсім відповідає схемі ущільнення при взаємодії з колесом (вертикальна деформація і бічний зсув).

В цьому плані наближеним до схеми взаємодії колеса з м'яким ґрунтом є власне конусний наконечник, однак з певною геометрією – кута конуса, що наближена до схеми дії колеса з поверхнею, що деформується (циліндричні наконечники пенетрометрів – для статичних будівельних конструкцій). Існуючі у продажу пенетрометри, що використовуються в аграрному секторі [51-53], обладнані різними конусними наконечниками, здебільшого двома – для м'якших і твердіших ґрунтів, що звично дає певну неоднозначність оцінки.

В цьому плані заслуговує уваги вищезгадана методика оперативної оцінки прохідності автомобілів, що бере свій початок ще від 2 –ї світової війни і розробки Інженерного корпусу армії США – WES – методика (Waterway Experimental Station), що прийнята як чинна нормативна база армій НАТО [48, 49]. Стандартизована форма наконечника пенетрометра НАТО і отримані відповідно значення показника твердості опорних поверхонь, у т.ч. різних ґрунтів у різних станах зволоження, — так зв. конусний індекс CI (cone index), табл. 2.2, покладені і в основу основних емпіричних залежностей розрахунку динаміки руху колісних і гусеничних машин бездоріжжям, що є актуальним як для комп'ютеризованого імітаційного моделювання руху, так і для оцінки деформації – ущільнення ґрунту [145,146].

Таблиця 2.2 - Значення конусного індексу СІ для різних типів опорних поверхонь [145]

Тип опорної поверхні	СІ, мПа
Сніг (свіжий – фірн)	0,01 – 0,04
Заболочені ґрунти, торфовища неущільнені	0,18 – 0,44
Сапропелєві, намулові (ілісті) неущільнені	0,09 – 0,18
Рілля	0,13 – 0,20
Ґрунт, суглинок, текучий пластичний	0,4 – 0,9
Ґрунт, суглинок текучий	0,3 – 0,4
Пісок неущільнений (у колії 0,1-0,2м)	0,013 – 0,03
Пісок ущільнений (у колії 0,1-0,2м)	0,74-1,2

Твердість та щільність ґрунту, як свідчать численні вітчизняні та зарубіжні дослідження [132, 147-152], є тісно взаємопов’язаними параметрами фізико-механічних характеристик ґрунту, що дозволяє дати і відповідну оцінку кількісних значень.

2.2. Кореляція твердості та щільності ґрунту

Найбільш детально це питання опрацьовано у публікації [150], де представлена графічна залежність взаємозв’язку обох параметрів, (рис.2.2) , та наведено відповідну нелінійну кореляційну залежність:

$$\rho = -0,0547N^2 + 0,5592N + 0,1629, \quad (2.1)$$

де N – твердість ґрунту, визначена за методикою Рєвякіна [50], МПа;

ρ — щільність ґрунту, г/см³.

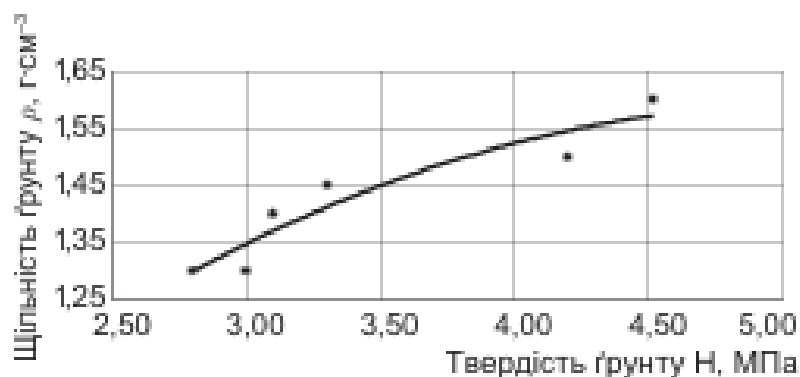


Рисунок 2.2 — Залежність між щільністю ґрунту ρ та твердістю H згідно [150]

Разом з тим відомі і дослідження, що констатують лінійний кореляційний зв'язок даних характеристик ґрунту (рис. 2.3) [152], що, у принципі співпадає з зарубіжними дослідженнями [153, 154].

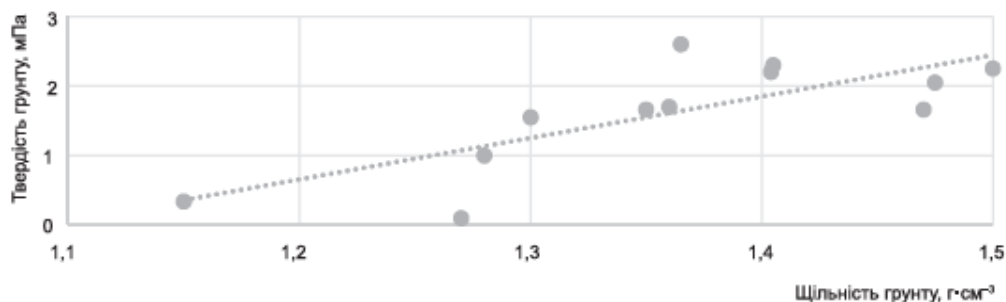


Рис. 2.3 - Залежність між щільністю та твердістю ґрунту згідно [152]

Практично при щільності ґрунту понад $1,35 \text{ г/см}^3$, як свідчать результати ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського», залежність між цими параметрами набуває явно нелінійного характеру, рис. 2.4 [132].

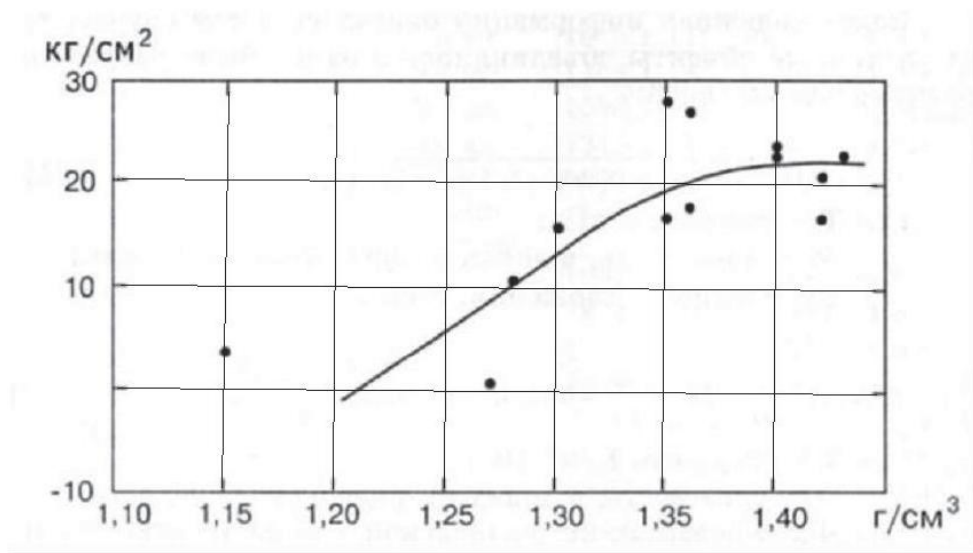


Рисунок — 2.4 - Залежність між щільністю та твердістю ґрунту згідно [132]

Проведений огляд і аналіз інших досліджень (щодо способів обробітку і урожайності) підтверджують однозначність взаємозв'язку твердості та щільності аграрних угідь.

Кількісна оцінка рівня кореляційного зв'язку очевидно ще залежить і від типу ґрунту. Щодо чорноземів, як найбільш актуальних в Україні (але відсутніх серед дослідних полів нашого університету), був проведений пошук і аналіз досліджень по інших тематиках, але де були б наведені дані щодо замірів твердості і щільності чорнозему, бажано і вологості. Звично, що твердість при цьому замірювалась традиційним твердоміром Ревякіна або, деколи, уже пенетрометром іншої моделі (з дещо іншим наконечником, але малий наконечник останнього досить незначно відрізняється від WES-наконечника, а питання співставлення власне кількісної оцінки різним інструментарієм загалом потребує окремого дослідження). Зокрема при нещодавній оцінці гетерогенності агрофізичної якості чорнозему [155] наведені достатньо цікаві дані щодо всіх трьох параметрів чорнозему для трьох ділянок впродовж 4-х місяців, табл.2.5 (щоправда відсутня інформація стосовно глибини замірів та техніки при посіві та збору урожаю). Техніка – 2 моделі колісних сівалок та заміри поза сівалкою представлені у дослідженні ефективності прямої сівби на важко суглинковому чорноземі правобережного степу, табл. 2.6, [156].

Таблиця 2.5 — Агрофізичні характеристик трьох ділянок чорнозему згідно [155]

Ділянка, параметри		До посіву, квітень	Після посіву, травень	Вегетація, серпень	Після збору, вересень
1	Щільність, г/см ³	1,39	1,61	1,25	1,39
	Твердість, кг/см ²	16,1	10,6	9,5	11,7
	Вологість, %	16,58	16,03	20,10	23,33
2	Щільність, г/см ³	1,14	1,58	1,35	1,50
	Твердість, кг/см ²	11,2	11,7	10,8	14,5
	Вологість, %	21,04	17,24	19,53	23,54

3	Щільність, г/см ³	1,35	1,46	1,34	1,43
	Твердість, кг/см ²	11,1	11,6	10,8	13,5
	Вологість, %	18,01	19,29	20,06	21,50

Зменшення рівня кореляційного взаємозв'язку можливо пояснюється зміною агрофізичних характеристик ґрунту з квітня по вересень з 2 циклами замірів при механічному обробітку та 2 циклами без нього (відчутні відповідні перепади щільності та твердості у 1,2-1,5 рази, табл. 2.5). Відсутність даних щодо використаних МТА не дозволяє дати їхню агроекологічну оцінку, але дозволяє констатувати очевидний взаємозв'язок базових показників ґрунту.

Для важкосуглинкового чорнозему представлені дані, табл. 4 [17], теж надані дані характеристик ґрунту щодо 2-х періодів між механічним обробітком і зафіксовані значення щільності ґрунту $< 1,35$ г/см³ дозволяють розрахувати власне лінійну кореляцію між твердістю та щільністю для даного випадку $r = 0,754$. Незначне зниження рівня кореляції у порівнянні з відомим дослідженням щодо цього ж типу ґрунту пояснюється мабуть узагальненням по трьох типах ділянок поля – контрольної та двох з дещо різним механічним обробітком, а також узагальненням по двох періодах часу (повні сходи та перед збиранням врожаю (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 - Зміна характеристик важкосуглинкового чорнозему при сівбі сучасною технікою [156]

	Шар ґрунту, см	Параметри	Контроль	John Deere 730	Great Plains CPH-1500
Повні	0-10	Твердість, кг/см ²	2,830	2,46	2,420
		Щільність, г/см ³	1,195	1,113	1,10

сходи		Вологість, %	6,74	6	8,8
	10-20	Твердість, кг/см ²	9,22	6,21	7,74
		Щільність, г/см ³	1,265	1,213	1,17
		Вологість, %	10,6	9,9	8,9
	20-30	Твердість, кг/см ²	19,90	13,32	17,21
		Щільність, г/см ³	1,31	1,40	1,31
		Вологість, %	8,9	6,2	9,4
Перед збиранням урожаю	0-10	Твердість, кг/см ²	3,41	3,46	4,80
		Щільність, г/см ³	1,183	1,04	1,035
		Вологість, %	10,2	3,8	12,6
	10-20	Твердість, кг/см ²	11,36	13,08	19,10
		Щільність, г/см ³	1,22	1,17	1,17
		Вологість, %	7,5	6,8	9,8
	20-30	Твердість, кг/см ²	23,35	27,38	32,00
		Щільність, г/см ³	1,187	1,212	1,232
		Вологість, %	8,9	8,4	11,1

Для цього ж типу ґрунтів цікавими є дані Харківської наукової школи щодо оцінки ефективності трактора ХТЗ-17221[157], де представлені і результати випробувань щодо оцінки ущільнення ґрунту, табл.2.7. Трактор обладнаний шинами однакового типорозміру передньої і задньої осей з майже однаковим навантаженням на осі, що дозволяє за даними цих досліджень

оцінити і ефект доущільнення ґрунту при проходженні другої осі по колії передньої, визначення якого за вітчизняною нормативною базою [29] і нормативною базою НАТО – WES – методикою [48,49] суттєво відрізняються.

Таблиця 2.7 — Зміна твердості і щільності ґрунту у літній період після коліс передньої та задньої осей трактора ХТЗ-17221 [157]

Глибина, см	Контрольна ділянка		Щільність за мостами, г/см ³		Твердість за мостами, МПа	
	щільність, г/см ³	твердість, МПа	Передній	Задній	Передній	Задній
0-10	1,04	0,76	1,20	1,24	1,50	1,70
10-20	1,16	1,26	1,28	1,30	1,95	2,15
20-30	1,24	1,54	1,32	1,36	2,20	2,44
30-40	1,28	1,80	1,36	1,39	2,48	2,61
40-50	1,31	2,05	1,39	1,41	2,74	2,76

З аналізу табл. 2.7 випливає насамперед доцільність використання для кількісної оцінки кореляційного зв'язку між вищезгаданими параметрами ділянок, що ще не піддавались впливу МТА і ущільненню та механічному впливу (контрольна ділянка). З умов реального поширення так зв. «груші деформації» від коліс на глибину понад 30 см очевидна доцільність глибини заміру до 50 см, це дозволить при різкому зростанні значень зафіксувати наявність так зв. «підорної підшви» та вжити заходи проти деградації ґрунту [137]. Заміри по колії трактора дозволяють оцінити уже наслідки машинного обробітку землі.

Аналогічно це ж стосується і кореляційного зв'язку значень твердості та вологості ґрунту- (рис. 2.5), [], де вплив пори року та механообробітку ще більш відчутний і з умов забезпечення довірчої ймовірності 95% обумовлює розмежування рівня кількісної оцінки взаємозв'язку для різних пор року. Певним чином це підтверджується і існуючою диференціацією норм

допустимого максимального тиску рушіїв МТА залежно від пори року та п'яти діапазонів вмісту вологи в ґрунті [29]).

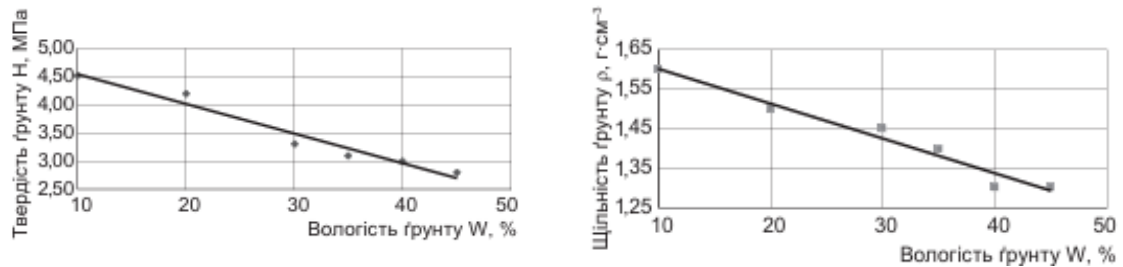


Рисунок — 2.5. Залежність твердості Н та щільності ρ від вологості W ґрунту згідно даних [111]

2.3. Теоретична оцінка площі контакту шин МТА для різних ґрунтів з оперативним визначенням твердості показником СІ

Питомий тиск у контакті шини з опорною поверхнею переважно оцінюють у підручниках і досі як збільшене у 1,2-1,25 рази значення тиску повітря у шині [158, 159]. Однак, очевидно, що для спорядженої чи повної маси автомобіля з можливою двократною зміною навантаження на вісь/ колесо питомий тиск у контакті змінюється. Зрештою і зниження тиску повітря в шині на 50% не спричиняє аналогічне падіння питомого тиску у контакті [80, 85]. Нормативна база [5] не регламентує методику власне розрахунку площі контакту шини з опорною поверхнею і базується на експериментальному замірі площі відбитка плями контакту на жорсткій основі згідно ДСТУ ГОСТ 7057 з наступним збільшенням у 1,6-1,1 рази, залежно від зовнішнього діаметра колеса (відповідно до ДСТУ 4140 [160]. Отримане значення середнього статичного тиску колеса на ґрунт збільшують у 1,5 рази (коефіцієнт поздовжньої нерівномірності розподілення статичного тиску за площею контакту шини, але з приміткою необхідності уточнення з виробниками нових високо еластичних шин, що відсутнє). Питомий тиск у контакті шини з ґрунтом, що деформується, є одним з визначальних чинників як прохідності автомобіля бездоріжжям, так і ущільнення ґрунту з умов агроєкології тракторами і автомобілями на сільськогосподарських угіддях. Очевидно, що формування питомого тиску у контакті з опорною поверхнею

при конструктивно відомому навантаженні на колесо, визначається площею плями контакту, розрахунок якої у відомих дослідженнях базується на розрахунку контакту конкретної шини з бетонною поверхнею під дією заданого вертикального навантаження від автомобіля.

Зокрема у вітчизняних дослідженнях [158] площа плями контакту шини з опорною (твердою) поверхнею визначається комплексом з 7 формул, що у свою чергу є розвитком простіших залежностей визначення радіальної деформації шини, насамперед, під впливом вертикального навантаження на колесо на твердій опорній поверхні [9, 159]:

$$F_k = \frac{\pi}{4} a_k b_k, \quad (2.2)$$

де: a_k — велика напіввісь еліпса — довжина плями контакту, b_k — мала напіввісь — ширина плями контакту. У свою чергу (за статистичними даними шин) останні можуть бути визначені як:

$$a_k = c_3 \sqrt{D f_t - f_t^2} \quad b_k = 2 \sqrt{2 R_{pr} f_t - f_t^2} \quad (2.3)$$

де: D — статичний діаметр колеса (без навантаження), f_t — прогин шини під дією радіального навантаження на колесо, внутрішнього тиску повітря в шині та ще 3-х постійних для даної шини коефіцієнтів [158]; R_{pr} — приведений радіус поперечного перерізу шини, $R_{pr} = \frac{B+H}{2,5}$ (B - ширина шини, H — висота профілю шини); c_3 — коефіцієнт, що залежить від розміру шини та норми шаруватості, ще додатково 4 емпіричні формули [158].

У вітчизняних дослідженнях використовується і більш проста залежність [115, 161, 162]:

$$F_k = \pi h_k \sqrt{(B - h_k)(D - h_k)} \quad (2.4)$$

де: h_k — глибина колії під колесом на ґрунті:

$$h_k = G_k / \pi p_k \sqrt{DB} \quad (2.5)$$

де: G_k — навантаження на колесо, p_k — тиск повітря в шині.

Практично ця ж ситуація характерна і для досліджень та методик у РФ та Білорусії у сфері агроєкології колісної техніки [163, 164], за винятком нещодавніх публікацій проф. І. Гуреєва [165], де на підставі критики існуючої нормативної бази агроєкологічної оцінки – ГОСТ 26953-86, ГОСТ 26953-86 та ГОСТ 26954-86 (що покладені в основу і чинних ДСТУ [3-5]) щодо статичної процедури оцінки нерухомих машин, без врахування перерозподілу навантажень на осі підчас руху з навісним чи причіпним устаткуванням, запропоновано доповнену, розширену залежність розрахунку питомого тиску шин на ґрунт. Однак щодо визначення площі плями контакту змін не пропоновано, тобто методика залишена статичною.

В країнах ЄС розрахункове визначення площі плями контакту на ґрунті, що деформується, дещо відрізняється і в основу залежностей покладено два типи ґрунтів – середньої щільності та вологі, де співвідношення отриманої глибини колії z та діаметру колеса D є у межах $0,025 < z/D < 0,05$ та м'яких, розпушених ґрунтів з $z/D > 0,05$. Різні емпіричні залежності теж можна розділити на 2 групи – використання для розрахунку площі плями контакту а) характеристик шини (типорозміру), тиску повітря в шині та навантаження на колесо і б) радіусу колеса, глибини колії і радіальної деформації шини. З аналізу публікацій слід виділити (по групі а)) дисертаційну роботу Dr.-Ing. M Steiner [166], де однак розглянуто ґрунт середньої щільності та вологі (2.6-2.8), але розділено залежності для радіальних (2.9) та діагональних (2.10) шин на твердій площині (що актуально для сучасної практики в Україні, де залежності (2.2)-(2.5) базуються на діагональних шинах) . Однак емпіричні моделі відпрацьовані для твердої поверхні (бетон):

- діагональні шини

$$F_k = 100G_k / (1,128 + [0,665p_k] + [0,009G_k] - [0,004D]) \quad (2.6)$$

- радіальні шини

$$F_k = 100G_k / (2,677 + [0,575p_k] + [0,011G_k] - [0,016D]) \quad (2.7)$$

У дисертаційній роботі Dr.-Ing. I.Bolling [167] розрахунок площі плями контакту, що базується на вищезазначеній групі параметрів б), запропоновано для обох типів ґрунтів у формі наступної емпіричної залежності

$$F_k = [r_0^2 - (r_0 - h_k)^2]^{-0.5} B, \quad (2.8)$$

де r_0 — статичний (номінальний) радіус кочення колеса: h_k — глибина колії. Разом з тим слід зазначити, що у даній залежності (2.8) не враховується тиск повітря в шині (і його безперечний вплив на площу плями контакту), а вплив навантаження на колесо та опір деформації ґрунту (твердість) – побічно, через глибину колії, що вимагає окремого розрахунку.

У роботі [168] запропоновано просту емпіричну формулу для розрахунку – оцінки площі плями контакту шин на ґрунтових поверхнях:

$$F_k = 0,77 b_c l_c \quad (2.9)$$

де l_c — довжина плями контакту, b_c — ширина контакту. Останні розраховуються як:

$$l_c = (d^*(z+\delta) - (z+\delta)^2)^{0,5} + (d^* \delta - \delta^2)^{0,5} \quad (2.10)$$

де δ та z — прогин шини під навантаженням та глибина колії.

Ширина плями контакту b_c розраховується у свою чергу як:

$$b_c = b + cG / G_N \quad (2.11)$$

де c — емпірична константа несної здатності ґрунту (у діапазоні від 0,03-0,05); b — номінальна ширина шини, G — навантаження на колесо, G_N — номінальне (допустиме) навантаження на колесо.

Практично одночасно у публікації [169] опрацьовано ще одну емпіричну залежність для розрахунку, де фігурує тиск повітря у шині:

$$F_k = (c \bullet G_d^{0,7} \bullet (BD)^{0,5}) / p_i^{0,45} \quad (2.12)$$

де G_d — поточне навантаження на колесо, p_i — тиск повітря у шині.

Проведені експериментальні дослідження щодо лісотransпортних колісних машин [170] засвідчили достатньо високу збіжність розрахунків згідно [168] – 92% та [169] – 86% з експериментальними даними (на відміну від ще 4 емпіричних залежностей, де збіжність була 49-65%, що дало підстави

не розглядати дані роботи). Разом з тим слід зазначити, що експериментальні дані [170] отримані щодо лісогосподарських колісних машин з спеціалізованими шинами Mitas D FOREST 400/60-15,5 для 4 значень вертикальних навантажень — від 670 до 1620 кг на колесо при невизначеній щодо твердості опорній поверхні лісу, що теж суттєво відрізняється від аграрних угідь.

У лісогосподарській сфері цікавим є також обширне дослідження щодо розрахунку площі плями контакту шин, де запропоновано врахування і кількості шарів корду шин [171]:

$$F_k = 282,6 + 3769B + 2369D - 257,2PR - 2,291p_i + 18,41G_k - 2895BD - 7788,5/G_k + 7,46 PR^2 + 17 p_i/G_k + 2768,5 G_k/p_i \quad (2.13)$$

де PR – показник врахування кількості шарів корду у шині (однак не розкрито системи його формування – чи це просто кількість шарів корду, що теж часто не фігурує в характеристиках шин від виробників).

Разом з тим слід врахувати специфіку шин лісогосподарської техніки, де домінують діагональні шини (на відміну від аграрної техніки), а також відмінності опорної поверхні в лісах.

Зростаючого розповсюдження, у т.ч. у нормативних рекомендаціях профільних аграрних міністерств: ФРН, Австрії, Швейцарії, набувають емпіричні залежності розрахунку площі плями контакту згідно робіт Dr. E. Diserens [127], де враховуються, окрім вищезгаданих навантаження на колесо і типорозміру шини, також вплив зміни тиску повітря у шині – (1.10).

Отримані емпіричні коефіцієнти оцінки взаємозв'язку площі та, відповідно, типорозміру шин, тиску повітря у шинах та навантаження на колесо для 4-х типів шин, що характерні і для аграрної колісної техніки, імпортованої у значних обсягах в Україну.

Проведені обширні польові випробування на суглинкових ґрунтах помірної зволоженості для 13 моделей шин 3-х типів – повно - і низькопрофільні (тут повнопрофільні – при співвідношенні висоти H до ширини профіля B шин від 0,7 до 1,0), а також так зв. ґрунтового типу

(Terrareifen) з співвідношенням $H/B < 0,6$, (табл. 1.9.) Окремо виділено універсальну залежність – для всіх типів шин, у т.ч. невизначених, очевидно і діагональних (в основі даного дослідження власне радіальні шини, за винятком шин типу Terrareifen - діагональних). Експериментальна оцінка проводилась на шести типах ґрунтів, суглинкових та супіщаних, з різним вмістом

вологи, після вирощування цукрового буряка, пшениці та ріпаку, а також трав'янистого луку.

Загалом слід констатувати, що вищевикладена методика [127] очевидно є найбільш опрацьованою і використовується у офіційних рекомендаціях і державних структур [135, 172-175], однак, пріоритетно щодо суглинкових і супіщаних ґрунтів у період весняно-польових робіт. Визначальною відмінністю від інших емпіричних формул – пропозицій, (у т.ч. і розглянутих в оглядах [176, 177]) є врахування тиску повітря у шинах, що є одним із реальних засобів – зниження тиску у шинах – на практиці покращення агроекологічності МТА.

Враховуючи вітчизняні реалії парку сільськогосподарських машин та військової колісної автотехніки актуальним є насамперед оцінка відмінностей формування плями контакту діагональних та радіальних шин, різниця між якими є очевидною – (2.9 – 2.10). Згідно даних західноєвропейських досліджень [135, 172] ця різниця (при тотожних типорозмірах шин та навантаженню) є відчутною, (рис. 2.12). Однак, розповсюдження радіальних шин на військових машинах для бездоріжжя стримує підвищена чутливість боковин до механічних пошкоджень. При формуванні колії боковина шини входить у безпосередній контакт – деформації ґрунту на глибину колії, що фактично формує тривимірну пляму контакту шини з опорною поверхнею, з передачею певного часткового тиску і на боковини (на відміну від звичної двовимірної плями контакту на твердих поверхнях, що не деформуються).

Вплив жорсткості боковин шин (різної у радіальних та діагональних шин ідентичного типорозміру) загальновідома і по зміні форми поперечного

перерізу плями контакту при великому зниженні тиску повітря в шині і виділенню найнижчих ліній деформації ґрунту власне по боковинах, на відміну від центральної при номінальному тиску в шині. Відомі і певні дослідження у сфері лісогосподарських колісних машин [178], де при розрахунку площі плями контакту пропонується зменшувати вертикальне

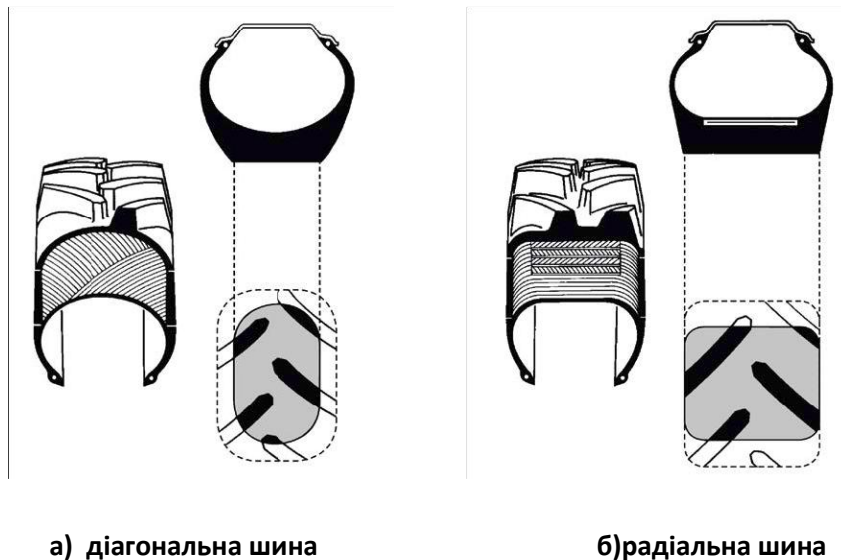


Рисунок 2.12 — Формування плями контакту на м'якому ґрунті діагональної (а) та радіальної (б) шин [135]

навантаження на колесо на 10% за рахунок того, що ця частка підтримується бічними стінками шини. Однак загалом слід констатувати, що

У класичній теорії автомобіля рух шини деформованою поверхнею з утворенням колії окрім звичного зчеплення і опору коченню шини внаслідок її деформації і гістерезисних втрат у самій шині $f_{ш}$ та деформації опорної поверхні з колією певної глибини f_e додатково враховується [9,159 і інш.]. (рис.2.13):

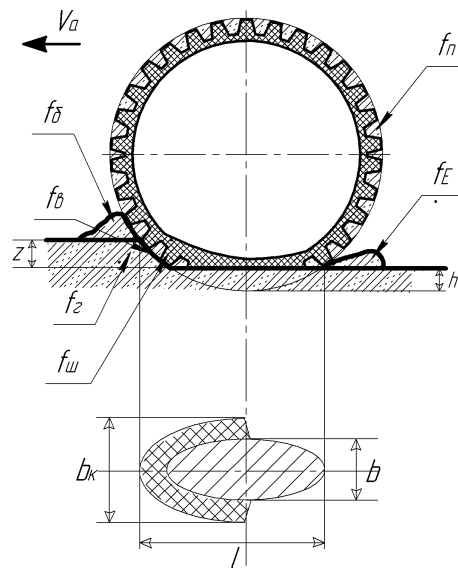


Рисунок 2.13 — Розрахункова схема взаємодії колеса з ґрунтом та формування плями контакту [9, 159]

- опір зміщенню ґрунту (піску) від зсуву вперед (бульдозерний ефект) f_{δ} ;
- опір (додаткова затрата енергії) внаслідок пробуксовування ведучого колеса і додаткового заглиблення в опорну поверхню та переміщення частини ґрунту (піску) із зони контакту у напрямку обертання колеса (т. зв. екскалаційний ефект) f_E ;
- опір горизонтальному зміщенню верхньої частини опорної поверхні, еквівалентної поперечній площині колії, що утворюється внаслідок руху ведучого колеса (тиск відпаду) f_{ϵ} ;
- для зв'язних опорних поверхонь також додатковий опір коченню колеса внаслідок прилипання частинок ґрунту до шини f_n (що актуально насамперед для чорноземів і певним чином нівелює рисунок і висоту протектора шин);

Загалом оцінка площі плями контакту і питомого тиску на ґрунт обмежується статикою ведених коліс, без врахування вищезазначених чинників.

Очевидно, що принаймні у більшості цих ефектів є контакт шини з ґрунтом, зокрема і боковин, що видозмінює площу контакту у порівнянні з фактично плоскою на твердій опорній поверхні – лінія b_k бічного розширення

колії, рис.2.13, що особливо характерно для діагональних шин, розповсюджених власне на техніці для бездоріжжя (контурна лінія плями контакту, рис.2.12).

Зрештою бічну деформацію – ущільнення ґрунту засвідчують і польові дослідження – розподіл ізоліній деформацій вбік стінок колії, рис. 2.14 [169] та корегувальні коефіцієнти збільшення площі плями контакту на твердій поверхні при розповсюджених спрощених визначеннях питомого тиску на ґрунт [31,35,57,58].

Практично слід констатувати тривимірний, об’ємний характер контакту шини у колії, звично з різним розподілом питомого тиску на ґрунт по боковинах і основі плями, але і не коректністю зведення навантаження на колесо тільки до горизонтальної площадки – основи плями. Оцінка площі об’ємного контакту, однак, є проблемною і фактично не досліджуваною. Спроба використання для заміру площі контакту цифрової фотокамери з програмним забезпеченням Software Adobe Photoshop, що дозволяє відповідно розрахувати площу у метричній системі (2.12), теж обмежена фактично двовірним зображенням і знову ж таки побудована на експерименті [179 – 181] :

$$KF = \left[\frac{\left[\frac{H_{pix} \cdot B_{cm}}{B_{pix}} \right] B_{cm}}{N_{pixkam}} \right] * N_{pixpolygon} \quad (2.17)$$

де: KF - площа контакту, $см^2$, H_{pix} - довжина, піксель; B_{pix} - ширина, піксель; B_{cm} - ширина, $см$; N_{pixkam} - піксель камери, кількість $N_{pixpolygon}$ кількість піксель полігон.



Рис.2.14 - Зміщення ліній деформації ґрунту навколо колії від колеса [169]

Однак ця процедура доволі трудомістка (заїзд трактора/автомобіля на поле і виважування та опускання коліс над цільним ґрунтом, використання контрастного барвника на шині, дублювання дослідів), крім цього фактично тривимірну, об'ємну площу плями контакту при утворенні колії фотоапарат фіксує у двомірній площині та відповідну площу.

Визначення - розрахунок середнього ефективного тиску у контакті шини з ґрунтом, як показника впливу МТА з умов агроєкології, теж відрізняється, як зазналось вище, від прийнятого з часів СРСР у вітчизняній практиці [31] і базується на формулі Newmark-Sohne – (1.11) [177,178]. Разом з тим певним суб'єктивізмом (зрештою як і вітчизняній нормативній базі [31] – корегувальний коефіцієнт залежності площі від діаметру шини) є визначення

ν_k - фактора концентрації. Значення останнього коливається у діапазоні від 2 до 9 залежно від типу ґрунту і вмісту вологи з зростанням значення для м'якших ґрунтів з зменшенням розповсюдження тиску в глибину (так зв. груші деформації ґрунту під зоною контакту шини з ОП). Переважно $\nu_k = 5$ для м'яких ґрунтів інтенсивного землекористування, $\nu_k = 4$ для твердішого ґрунту з

меншою інтенсивністю обробітку. Очевидно, що доволі суб'єктивна оцінка v_k та необхідність додаткового розрахунку глибини колії z і еквівалентного радіусу плями контакту r (що відрізняється від статичного радіуса колеса) не є сприятливими чинниками для практичного використання аграріями.

Разом з тим можна констатувати, що власне вирази (1.11) та (2.14) покладені в основу найбільш розповсюдженої в ЄС методики оперативної агроекологічної оцінки використання МТА у аграрному секторі безпроблемним доступом до відповідної комп'ютеризованої програми TASC [182,183] в інтернет – мережі та посиланням на неї у багатьох офіційних рекомендаціях відомчих органів державної влади, напр. [8]. Глибина колії, що необхідно заміряти для агроекологічної оцінки, у даному випадку є найпростішою процедурою (у порівнянні з визначенням щільності, вологості згідно [29] чи твердості, як у WES- методиці [48,49]). Щоправда воно вимагає виїзду техніки безпосередньо на конкретне поле, оцінка ж стану ґрунту на підставі заміру твердості пенетрометром – конусний індекс CI є простішою.

Зрештою у західноєвропейській практиці використовується ще і спрощена емпірична методика теоретичної оцінки – розрахунку площі плями контакту шини з ґрунтом (аналогічно, як і у вітчизняній практиці – (2.4)), але з внесеним орієнтовним значенням співвідношення діаметра та ширини шини при формуванні площі плями контакту для 3 типів ґрунту [184,185]:

$$KF = (B \times D) \times 0,27 \quad (x0,13 \text{ або } x0,50) \quad (2.18)$$

Ще більш спрощена методика, без врахування типорозміру шин, але з врахуванням тиску повітря у них у співвідношенні до ваги трактора, використовується і у нещодавніх вітчизняних дослідженнях [186]. Однак представлені у цьому дослідженні дані щодо розрахунку за такою схемою питомого тиску у контакті шин з ґрунтом для 4-х моделей важких колісних тракторів і отриманими ідентичними даними для 2-х значень тиску повітря у шинах різних тракторів обумовлюють доцільність додаткової порівняльної оцінки результатів за вищенаведеними уточненими методиками (2.12), у тому

числі і щодо констатації ефекту зменшення тиску на ґрунт в середньому на 33-40% при зменшенні тиску повітря у шинах з 1,2 до 0,8 бар [186].

Таблиця 2.8 – Результати агроекологічної оцінки тракторів [186].

Виробник	Модель	Маса (кг)	Тиск в шинах (бар)	Орієнтована контактна площа (м²)	Питомий тиск (кг/см²)
John Deere	8R 370	12 700	1.2	1.038	1.224
John Deere	8R 370	12 700	0.8	1.557	0.816
Fendt	930 Vario	10 260	1.2	0.839	1.224
Fendt	930 Vario	10 260	0.8	1.258	0.816
New Holland	T8.435	11 880	1.2	0.971	1.224
New Holland	T8.435	11 880	0.8	1.457	0.816
Case IH	Magnum 380	14 605	1.2	1.194	1.224
Case IH	Magnum 380	14 605	0.8	1.791	0.816
CLAAS	Axion 960 Terra Trac	16 200	1.2	1.324	1.224
CLAAS	Axion 960 Terra Trac	16 200	0.8	1.987	0.816

Нелінійний характер взаємозв'язку вищезгаданих параметрів наглядно ілюструють результати експериментальних досліджень з трактором ХТЗ Т150К, рис. 2.15 [187]. Представлено і відповідні нелінійні кореляції зв'язку

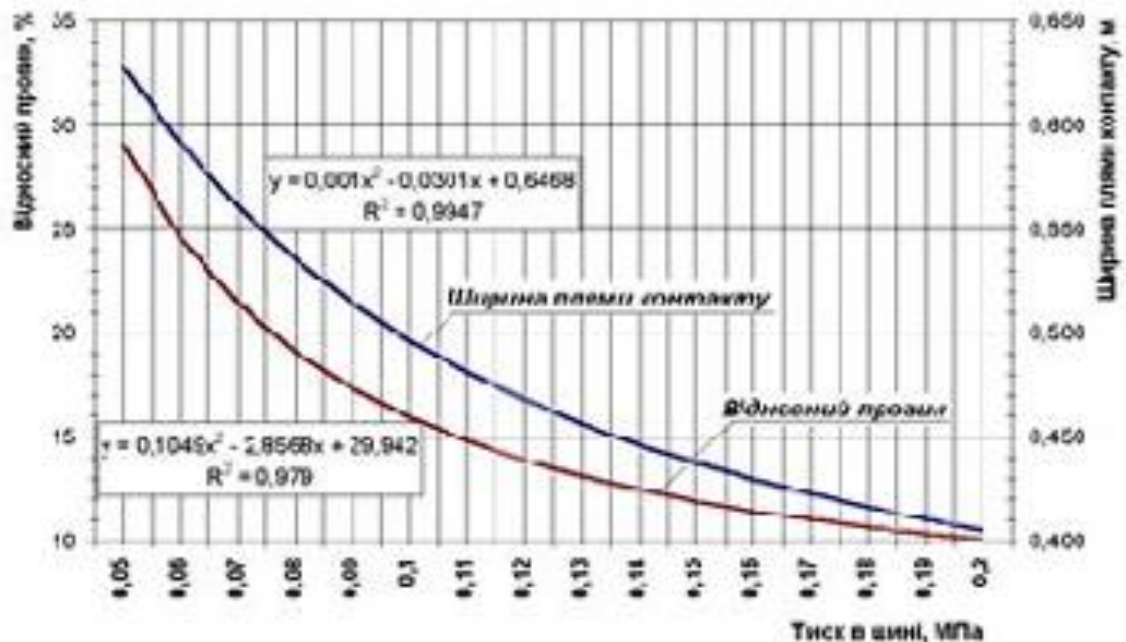


Рис. 2.15. Залежність зміни ширини плями контакту та відносного прогину від тиску для шини 23,1R26 Rosava 153(A8) [187] тиску повітря у

шині і ширини плями контакту з ґрунтом та відносної зміни радіальної деформації (прогину) шини.

У дослідженнях д.т.н. Реброва О.Ю. теж констатовано нелінійність цих залежностей для тієї ж тракторної шини 23,1R26 Rosava 153, рис. 2.16 [188]

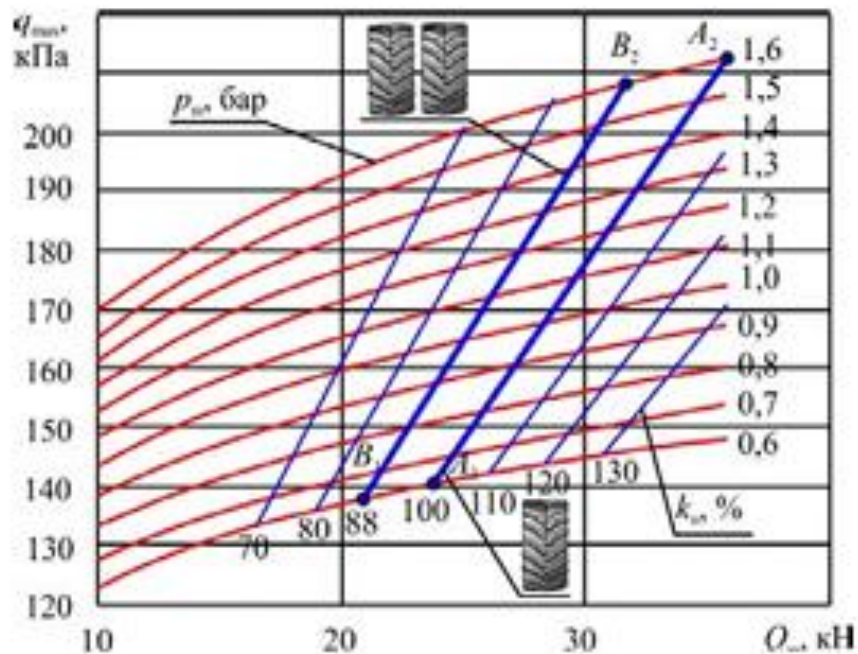


Рис.2.16. Характеристика шини 23,1R26 Rosava 153(A8) [188]

Тут більш деталізовано взаємозв'язок тиску повітря в шині p_r (від 0,6 до 1,6 бар) при різних навантаженнях на шину Q_k безпосередньо на значення питомого тиску шини на ґрунт q_{max} (тобто на збільшення площі плями контакту при фіксованих значеннях навантаження).

Оцінку вищезазначеного розширено щодо інших моделей шин у нещодавній дисертаційній роботі Якуніна М.Є. [189], що підтверджує нелінійний вплив тиску у шинах на ущільнення ґрунту – площу плями контакту.

Нелінійний характер цього взаємозв'язку підтверджується і результатами, що представлені у дисертаційній роботі д.т.н. Погорілого С.П. [190] - рівняння регресії змін площі плями контакту і тиску повітря в шинах для повнопривідного автомобіля КрАЗ 6522 (шини 1300×530-533):

$$F = 2672\rho^2 - 12408\rho + 2442,4 \quad (2.19)$$

де F – площа контакту шини, см²; ρ – тиск повітря в шині, МПа.

Окрім цього представлено і визначені відповідно до норм ДСТУ [29] під 5 порогових значень допустимого питомого тиску необхідні значення площ контакту з ґрунтом (очевидно у діапазоні змін тиску повітря у шинах) щодо колісних тракторів різних тягових класів, табл.. 2.9.

Таблиця 2.9 – Необхідна площа контакту з ґрунтом для різних класів МТА з умов агроєкології – питомого тиску на ґрунт [190]

Тяговий клас	Площа опорної поверхні, м ²									
	за тиску на ґрунт 60 кПа		за тиску на ґрунт 80 кПа		за тиску на ґрунт 100 кПа		за тиску на ґрунт 120 кПа		за тиску на ґрунт 140 кПа	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
0,2	0,03	0,23	0,03	0,17	0,02	0,14	0,02	0,11	0,01	0,10
0,6	0,23	0,34	0,17	0,25	0,14	0,20	0,11	0,17	0,10	0,14
0,9	0,34	0,53	0,25	0,39	0,20	0,32	0,17	0,26	0,14	0,23
1,4	0,53	0,75	0,39	0,56	0,32	0,45	0,26	0,38	0,23	0,32
2	0,75	1,13	0,56	0,84	0,45	0,68	0,38	0,56	0,32	0,48
3	1,13	1,50	0,84	1,13	0,68	0,90	0,56	0,75	0,48	0,64
4	1,50	1,88	1,13	1,41	0,90	1,13	0,75	0,94	0,64	0,80
5	1,88	2,25	1,41	1,69	1,13	1,35	0,94	1,13	0,80	0,96
6	2,25	3,00	1,69	2,25	1,35	1,80	1,13	1,50	0,96	1,29
8	3,00	4,50	2,25	3,38	1,80	2,70	1,50	2,25	1,29	1,93

Загалом нелінійність взаємозв'язку тиску повітря у шинах з питомим тиском на ґрунт – площею плями контакту підтверджується і у багатьох зарубіжних дослідженнях – як приклад можна представити роботи Віденського університету культури ґрунту [191], рис. 2.17, а також ґрунтовні дослідження цього питання у роботах [192, 193 і інш.]. Зокрема питомий тиск у ґрунті на глибині 10 см при падінні тиску повітря у шині у 1,87 рази

зменшився у 1,75 рази, однак на глибині 40 см абсолютна різниця ущільнення уже зменшилась у 3,5 рази, рис. 2.17.

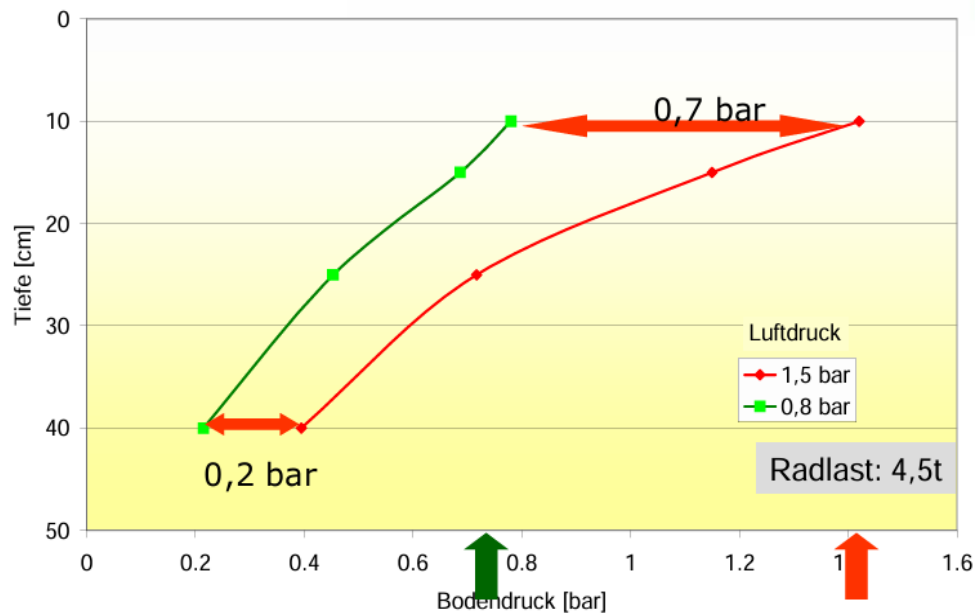
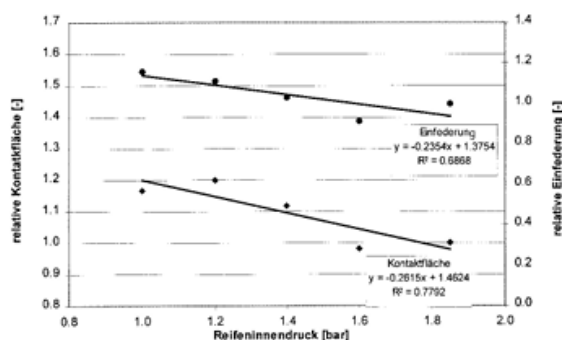
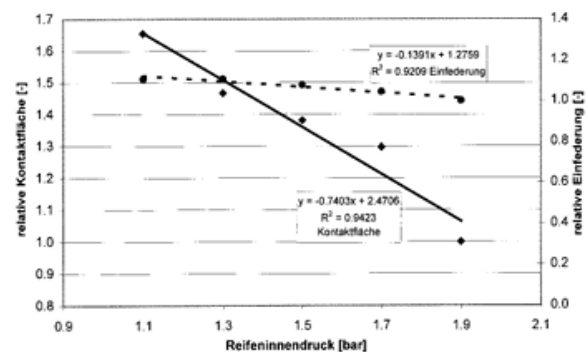


Рис.2.17 - Вплив зниження тиску у шині з 1,5 бар до 0,8 бар на тиск у ґрунті на глибині 10 – 40 см при навантаженні 4,5 т на шину 650/85R38 [191]

У обширному експериментальному дослідженні взаємозв'язку площі плями контакту та тиску повітря у шинах 6 типорозмірів (R32 – R42) [192] однозначно констатовано необхідність врахування тиску повітря при розрахунку площі плями (окрім звичних типорозміру шин та навантаження на колесо) при розрахунковому визначенні площі плями контакту. Зміна тиску повітря в шинах з 1,9 до 1,1 бар зумовлює збільшення площі плями контакту у 1,2 – 1,65 рази, рис. 2.18 (і у 1,1 -1,2 рази щодо радіальної деформації шин), рис.2.18.



а)



б)

Рис.2.18 – Експериментальна оцінка впливу зниження тиску повітря у шинах – 16,9R38 (а) та 800/65R32 (б) на площу плями контакту [192]

З точки зору експлуатації колісних МТА важливим є фіксація прямого впливу площі плями контакту шини з ґрунтом на коефіцієнт зчеплення шин з ґрунтом як опорною поверхнею (у т.ч. при різних значеннях пробуксовування ведучого колеса), що експериментально визначено у роботі [193] – тут на сухому суглинку, рис. 2.19, але очевидно, що і на інших типах і станах (щодо вмісту води) ґрунтах.

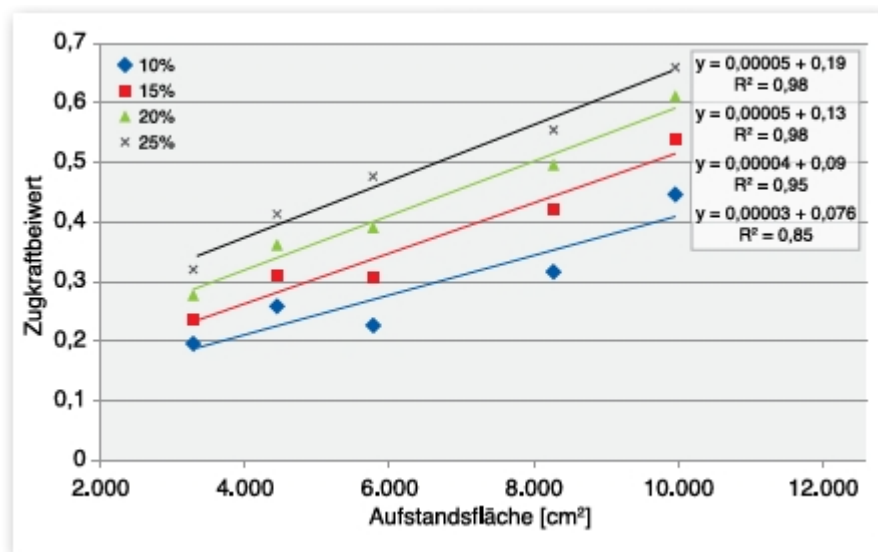


Рис. 2.19 – Вплив площі плями контакту (Aufstandsfläche, cm²) при різних значеннях пробуксовування ведучих коліс (10 – 25%) на коефіцієнт зчеплення шин з сухою ґрунтовою поверхнею [193].

Разом з тим у роботах [192,193] констатовано актуальність кількісних оцінок плями контакту щодо суглинку і потенційне корегування для інших ґрунтів, тобто фактично доцільність врахування ще і твердості/щільності ґрунту. У цьому плані заслуговує уваги практика досліджень взаємодії колісних машин з ґрунтовими поверхнями у військовій сфері, де власне акцент зроблено на твердість ґрунту [48,49].

У військовій WES – методиці відсутня методика прямого розрахунку – визначення площі плями контакту на ґрунтових/піщаних поверхнях, чітко визначена процедура статичної її оцінки на бетонній поверхні, що фігурує надалі у поєднанні з показником твердості – конусним індексом СІ у

опрацьованих емпіричних залежностях розрахунку динаміки і енергетики руху, що є актуальним і для аграрної та інших сфер використання самохідної техніки. Всі параметри типорозміру шини та навантаження і, відповідний радіальний прогин – деформація (при заданому тиску повітря в шині), що і формують площу плями контакту шини з твердою поверхнею у суміщенні з значенням CI (твердості ґрунту) фігурують у WES – методиці з визначення так зв. індексу мобільності машин MN (mobility number/index) [49,194]:

$$MN_{WES} = \frac{CI \times \epsilon \times d}{G_a} \times \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0,5} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{\epsilon}{2d}} \right) \quad (2.20)$$

де: CI – значення конусного індексу для даної поверхні кПа ; G_a – вага автомобіля/трактора, кН, δ – деформація шини під повним номінальним навантаженням на твердій опорній поверхні (м), d – діаметр колеса із шиною, без навантаження (м), b – ширина шини у зоні протектора (м), h – висота шини (м).

Практично у (2.20) враховано як твердість ґрунту CI, так навантаження та типорозмір і деформація шин – тобто весь комплекс чинників, що формують деформацію – питомий тиск на ґрунт. Однак (2.20) в існуючому вигляді опрацьована під звичну військову автотехніку – з однотипною односкатною ошиновкою всіх осей та практично рівномірним розподілом навантаження по осях. Не враховується і ефект доущільнення в колії при проїзді наступних після першої осей, що теж є суттєвим [48,49]. Окрім уже звичних типорозмірів коліс передньої та задньої осей багатьох сучасних колісних тракторів класу тяги 3...6 (а відповідно і різних навантажень та деформацій ґрунту з врахуванням послідовності дії) в аграрній сфері необхідно враховувати і реалії суттєвого донавантаження задньої осі від навісного чи причіпного технологічного обладнання [121,158,165]. Але власне цей комплексний підхід зведення оцінки ущільнення ґрунту під конкретне значення його твердості безумовно заслуговує уваги.

Певним чином це стосується і показника потенційної прохідності військової автотехніки – так зв. ефективного тиску на опорну поверхню - MMP (англ. - Mean maximum pressure), що розроблений центром науково-дослідних робіт у сфері озброєння Великобританії RARDE (англ. – Royal Armament Research and Development Establishment UK) [48,49,195], що визначається як:

$$MMP = \frac{k \times G_a}{2 \times n \times v^{0,85} \times d^{1,15} \times \left(\frac{\delta}{h}\right)^{0,5}} \quad (2.21)$$

де k – коефіцієнт осей (табл.2); n – кількість осей, v – ширина шини у зоні профіля протектора; $\frac{\delta}{h}$ – питома деформація шини на недеформованій твердій поверхні ($\frac{\delta}{h} = 0,18$ при номінальному тиску у шині для номінальної маси і швидкості масових автомобілів для шосе, $\frac{\delta}{h} = 0,25$ при тиску 70% від номінального для повнопривідних позашляховиків з повною масою, 0,35 – аналогічно при зменшенні тиску у шинах до 30% від номінального).

Практично показник потенційної прохідності MMP, що використовується у нормативній базі багатьох європейських армій НАТО, у поєднанні з замірами твердості конкретного ґрунту/бездоріжжя – значеннями конусного індексу СІ дозволяє заздалегідь оцінити прохідність конкретної машини за відповідною шкалою співвідношення значень СІ та MMP.

Таблиця 2.10 – Значення коефіцієнту осей для розрахунку MMP [195]

Кількість осей	Кількість ведучих осей					
	1	2	3	4	5	6
2	4,4	3,65				
3	5,25	4,35	3,9			
4	6,05	4,95	4,44	4,1		

5			4,97		4,32	
6		6,2	5,55	5,15		4,6

Певним чином цей підхід можна застосувати і для оцінки так зв. агроекологічної прохідності МТА – в аспекті допустимості руху конкретної техніки для заміряного фізико-механічного стану (за оцінкою згідно СІ) конкретного поля. Вираз (2.21) дозволяє фактично визначити питомий тиск у контактній шини з твердою поверхнею без проміжного розрахунку площі плями контакту на підставі статистичного узагальнення шин підвищеної прохідності єдиного типорозміру на всіх осях та рівномірного розподілу навантаження. Очевидно, що необхідне опрацювання і розвиток методики ММР під реалії аграрної техніки з різними типорозмірами шин передньої та задньої осей та відповідним нерівномірним розподілом навантажень. У випадку використання формули (2.4), окрім попереднього визначення площі плями та тиску на твердій поверхні, тиск на ґрунт визначається при додатковому розрахунку глибини колії, приведеного радіусу плями контакту та вибору значення фактору концентрації в діапазоні значень від 2 до 9 (доволі суб'єктивному). Суб'єктивності позбавлена оцінка несної здатності ґрунту (як опорної поверхні) на базі стандартизованого конусного індексу СІ, до значень якого прив'язані вже опрацьовані емпіричні залежності визначення коефіцієнтів опору руху, зчеплення шин, глибини колії – ущільнення, енергозатратності руху і т.п. за WES- методикою [48,49]. Не менш важливим є вищезазначена переважно лінійна залежність твердості від вологості ґрунту, що дозволяє для певного типу ґрунту оперативно оцінити допустимий (з 5 рівнів – в діапазоні від 40 до 120 кПа та від 80 до 210 кПа згідно [29]) максимальний тиск на ґрунт ходових систем залежно від зафіксованого на глибині 10-30 см значення твердості СІ.

Разом з тим, попри очевидну привабливість використання і відповідної трансформації WES – методик (2.20)-(2.21) необхідно значний обсяг відповідних досліджень щодо врахування особливостей аграрної колісної

техніки, насамперед щодо різних типорозмірів шин передньої і задньої осей, різних навантажень на осі і реального донавантаження насамперед задньої осі навісним та причіпним обладнанням, що може досягати до 30% від статичного і розглядається як перспективний напрям подальшого розвитку досліджень. Однак однозначна доцільність використання стандартизованого показника характеристики ґрунту – твердості (конусного індексу СІ) щодо агроєкологічної оцінки МТА.

Беручи до уваги відчутно менший діапазон потенційних змін значень СІ підчас сезонів проведення механообробітку ґрунту у порівнянні до умов руху бездоріжжям військової автотехніки і, відповідно, достатню задовільність збігу розрахункових (згідно (2.12)) та експериментально визначених площ плям контакту для сучасних шин МТА згідно [193], рис.2.20, можна констатувати актуальність вибору розрахунку площі плями контакту згідно виразу (2.12) на даному етапі досліджень. Водночас слід мати на увазі і нерівномірність значень СІ (зрештою і щільності ґрунту) на конкретних полях при проведенні механообробітку ґрунту [196].

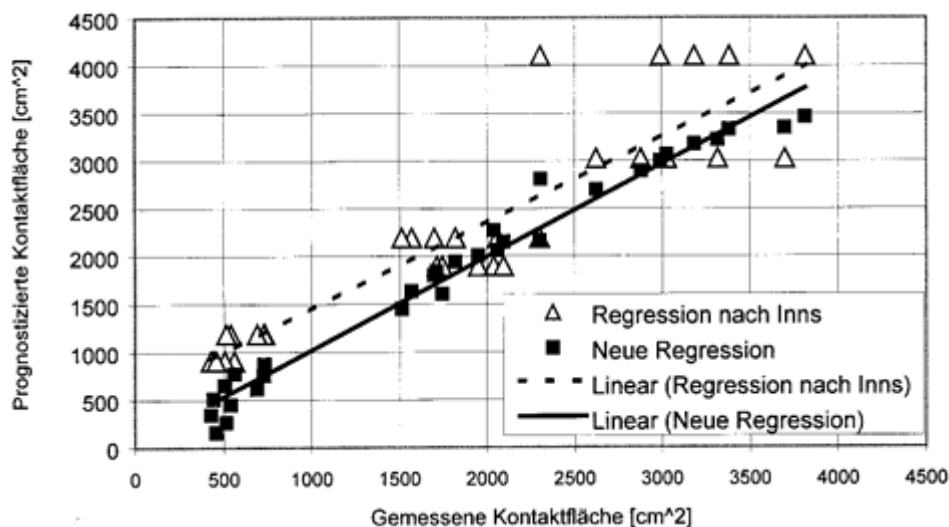


Рис.2.20 – Співвідношення розрахункових (Prognostizierte Kontaktfläche) та заміряних (Gemessene Kontaktfläche) площ плям контакту шин МТА [193]

В аграрній сфері власне з умов агроєкології, на відміну від військової авто- техніки, набувають розповсюдження здвоєння та баластування коліс [141,162,188,189,197-199], що безперечно має вплив на формування площі

плями контакту шин і її розрахунку – власне з врахуванням змін навантаження та тиску повітря у шинах згідно (1.10).

Мало вивченим залишається питання впливу форми та висоти виступів протектора шин як на ущільнення ґрунту (площа контакту, розподіл питомого тиску по площі контакту), так і, особливо, на тягово- зчіпні характеристики коліс, що очевидно матимуть свої відмінності навіть при співставимих площах контакту, рис. 2.21 [193]. Зрештою відомі вже і перші дослідження у цій сфері [200-202], однак особливості формування плям контакту шин з різними типами протектора залишаються практично ще відкритими.



Abbildung 17: Reifenprofile für Ackerschlepper (von links nach rechts): 1. Mitas HC 2000, 2. Vredestein Traxion, 3. Michelin RoadBib, 4. Mitas HCM, 5. Trelleborg TH 500, 6. Nokian TRI 2 (Quelle: Uppenkamp)

Рис.2.21 – Розмаїття форм і насиченості протекторів сучасних шин МТА [193].

2.4. Опрацювання методики експрес-оцінки агроекологічності колісної техніки

Опрацювання методики оперативної оцінки (експрес-оцінки) агроекологічності конкретної моделі МТА щодо конкретного поля, з заміром пенетрометром твердості (значення СІ) на глибині 15 см, у режимі реального часу базується на наступних варіантах:

- з заїздом МТА на поле і фіксацією ущільнення – зміни твердості ґрунту пенетрометром в центрі плями контакту коліс задньої осі (у прокладеній колії колесами передньої осі) та замір твердості ґрунту за межами колії (первинний стан ґрунту). Отримані значення твердості ґрунту за визначеним кореляційним співвідношенням дозволять легко оцінити ущільнення ґрунту (у т.ч. і з пониженням тиску повітря у шині) з умов

агроєкології (у співвідношенні до граничних значень відповідної щільності згідно нормативної бази [29]);

- з заміром пенетрометром значень твердості – СІ на полі, без заїзду і використання МТА. При відомих значеннях відповідних параметрів МТА (експлуатаційна маса, типорозміри шин, розподіл навантажень на осі, бажано включно з донавантаженням від причіпного чи навісного обладнання

механічного обробітку ґрунту) це дозволяє визначити відповідну площу плями контакту шин з ґрунтом та порахувати відповідно ефект ущільнення –

- зміну твердості СІ та за лінійною кореляцією і щільність з відповідним співставленням щодо щодо нормативних обмежень [29].

В останньому випадку необхідне відповідне програмне забезпечення, яке у даному випадку вважаємо доцільним розмежувати на 2 варіанти:

- з використанням програмного середовища MATLAB Simulink і персонального комп'ютера / ноутбука та запропонованою нижче опрацьованою програмою імітаційного моделювання – розрахунком потенційного ущільнення ґрунту і співставлення отриманих результатів з гранично допустимими згідно обмежень [29];

- з використанням спеціальної програми розрахунку, завантаженої на ноутбук чи навіть мобільний телефон з відповідними можливостями розрахунку.

Деталізована структура опрацьованої такої програми розрахунку представлена на рис. 2.22. В блок пам'яті програми слід задати конструктивні параметри конкретних моделей МТА з фіксацією типорозміру коліс передньої та задньої осей, табульованого масиву зміни площі плями контакту шин залежно від тиску повітря в шині (попередньо визначені за формулою Diserens (2.)), навантаження на передню та задню осі, а також табульований масив допустимих з умов агроєкології значень питомого тиску в функції відповідного значення твердості / щільності даної ділянки. На першому етапі здійснюється ввід даних щодо конкретного значення твердості – конусного індексу СІ – відповідного поля. Фіксація первинного значення тиску повітря у

шинах і розрахунок відповідного значення питомого тиску у контакті шини з ґрунтом дозволяє порівняти отримане значення з табульованим значенням допустимого з умов агроєкології тиску, відповідно до твердості / щільності конкретного поля. У випадку перевищення допустимого значення тиску оператором задається зниження тиску повітря у шинах (з відповідною зміною площі плями контакту). Передбачено також і схеми з здвоюванням та баластуванням шин з відповідними змінами у визначенні площі плями контакту. Розрахунок питомого тиску шин у контакті з ґрунтом здійснюється поетапно – першочергово для передньої осі і потім, з врахуванням уже попереднього ущільнення ґрунту в колії колесами передньої осі, розрахунок доущільнення ґрунту колесами задньої осі.

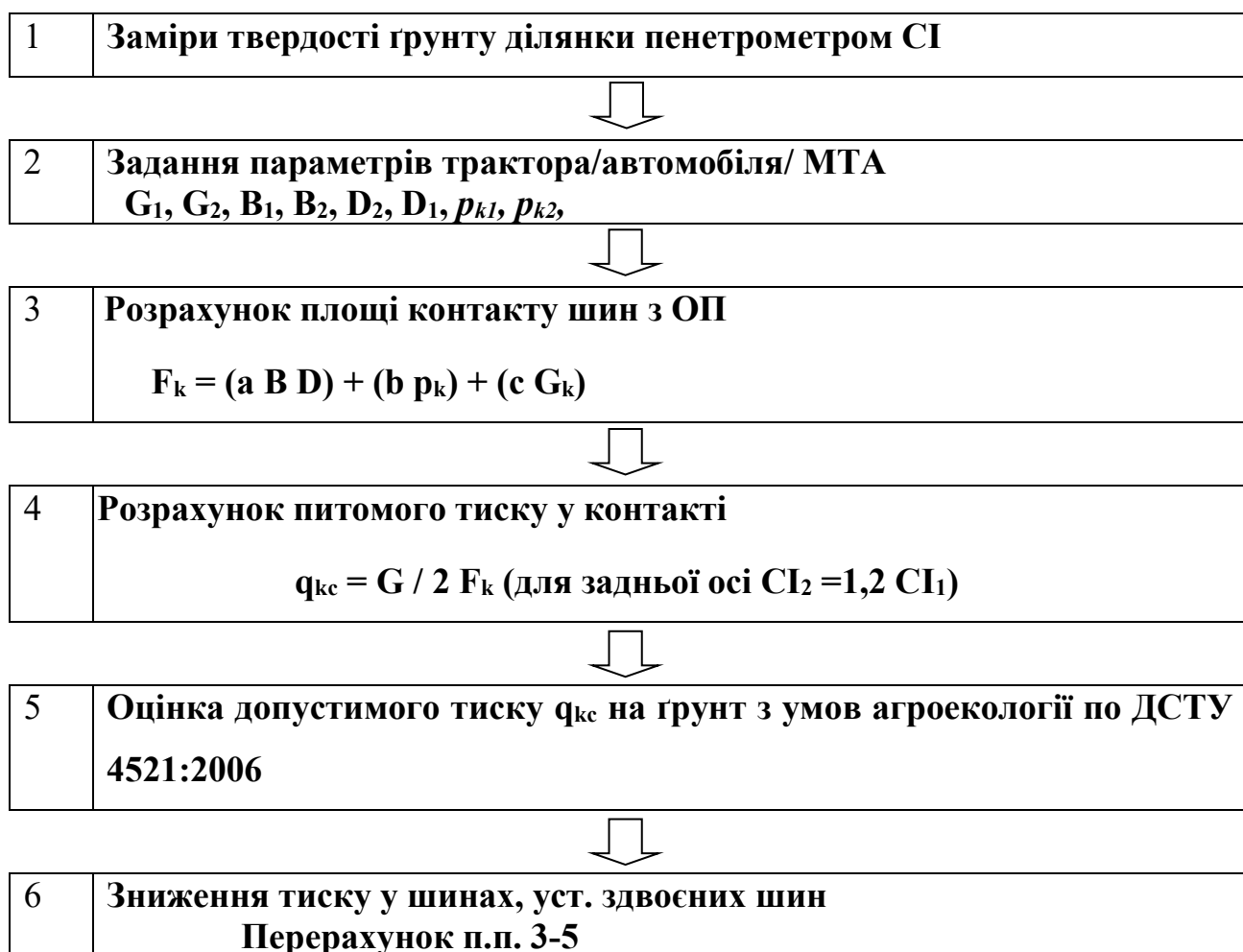


Рис. 2.22. Структура оперативної оцінки питомого тиску коліс на ОП

Доущільнення ґрунту колесами другої осі (при співпаданні колії більш ніж на 2/3) проводиться на базі узагальнення експериментальних даних, отриманих у роботах [80,157,203]. Зокрема в роботі [203] представлено результати експериментальних замірів ущільнення ґрунту (щільності відібраних проб, визначених лабораторно згідно існуючих вимог [45]) трьох розповсюджених в агрохолдингах України колісних тракторів - Claas 850 Axion масою 8096 кг, шини передньої осі – 540/65R30, 650/65R42, John Deere 6195M масою 7500 кг, шини відповідно 600/65R28 та 650/65R42, Fendt Vario 900MT масою 11700 кг (за даними заводу- виробника), шини відповідно - 650/69R34 та 710/70R42, табл. 2.11.

Таблиця 2.11 – Результати експериментальної оцінки ущільнення ґрунту сучасними тракторами [203]

Гли- бина грунту	Щільність ґрунту, г/см ³									
	почат- кова	після проходження трактора Claas 850 Axion			після проходження трактора John Deere 6195M			після проходження трактора Fendt Vario 900 MT		
		кількість проходів			кількість проходів			кількість проходів		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
0–10	1,143	1,288	1,403	1,422	1,249	1,398	1,401	1,303	1,427	1,438
10–20	1,185	1,304	1,411	1,430	1,298	1,401	1,426	1,341	1,436	1,459
20–30	1,166	1,336	1,450	1,471	1,322	1,422	1,443	1,369	1,456	1,465
30–40	1,143	1, 249	1,448	1,462	1,203	1,418	1,437	1,251	1,361	1,409
40–50	1,140	1,216	1,458	1,469	1,212	1,407	1,439	1,261	1,351	1,401

Дані ущільнення ґрунту вітчизняним трактором класу тяги 3.0 представлені і у табл. 2.7 [157].

Більш досконалим є імітаційне моделювання – розрахунок у програмному середовищі MATLAB Simulink, що уже достатньо опрацьовано в інших дослідженнях щодо прохідності та мобільності руху колісної техніки, автомобілів бездоріжжям [49,204-205]. Це дозволяє провести оцінку змін питомого тиску у контакті шин з ґрунтовою поверхнею і у динаміці та з врахуванням змін рельєфу, відповідного перерозподілу навантажень на осі та, практично мало вивченого, впливу тягового зусилля на ведучих колесах на

зміну значення і розподілу питомого тиску у площині контакту. Моделювання взаємодії пневматичної шини з ґрунтом, що деформується, базується на емпіричних залежностях, відомих з досліджень [206-209], та щодо врахування ущільнення ґрунту колії після проходження коліс передньої осі [157,210]. На рис. 2.23 представлена узагальнена структура побудованої відповідно до загальних засад програмного середовища MATLAB Simulink [211,212] моделі «ґрунт – шина – ущільнення».



Рис. 2.23 – Структура моделі «ґрунт – шина – ущільнення»

Дана модель є спрощеною версією вже опрацьованої моделі руху колісних машин бездоріжжям / полем [204] – це статика контакту шини з ґрунтом, що деформується, однак більш деталізована і розвинута власне щодо розрахунку площі плями контакту згідно залежності (1.10) та табл. 1. 9 і, відповідно, розрахунку питомого тиску на поверхню ґрунту. На рис. 2.24 – 25 деталізовано структури «Data», «Soil» та «Tires».

і характеристик конкретних моделей шин та розділенням щодо типів конструкції згідно табл. 2.8 і відповідним вибором значень коефіцієнтів емпіричної залежності (1.10). Розрахунок статичного узагальненого питомого тиску у плямі контакту, з врахуванням методик [208,209], здійснюється у розрахунковому модулі підсистеми «Tires», рис.2.26 , у т.ч. з врахуванням послідовності дії на ґрунт в колії коліс передньої та задньої осей. Окрім цього оператором задаються навантаження на шину та тиск повітря у шині (можливими змінами цих значень, відповідно до яких визначається і радіальна деформація шини).

Очевидно, що розвиток моделі у середовищі MATLAB Simulink дозволяє і врахувати ефект прикладання до колеса тягового чи гальмового зусиль та пробуксовування / просковзування шини у контакті з ґрунтом, як опорною поверхнею, що, природньо, впливає на взаємодію з опорною поверхнею і формування питомого тиску [215]. Однак чинна нормативна база регламентує фактично статичний режим веденого колеса, щодо якого і опрацьовань масив допустимих значень питомого тиску для певних фізико-механічних характеристик ґрунту, табл. 1.1 [29].

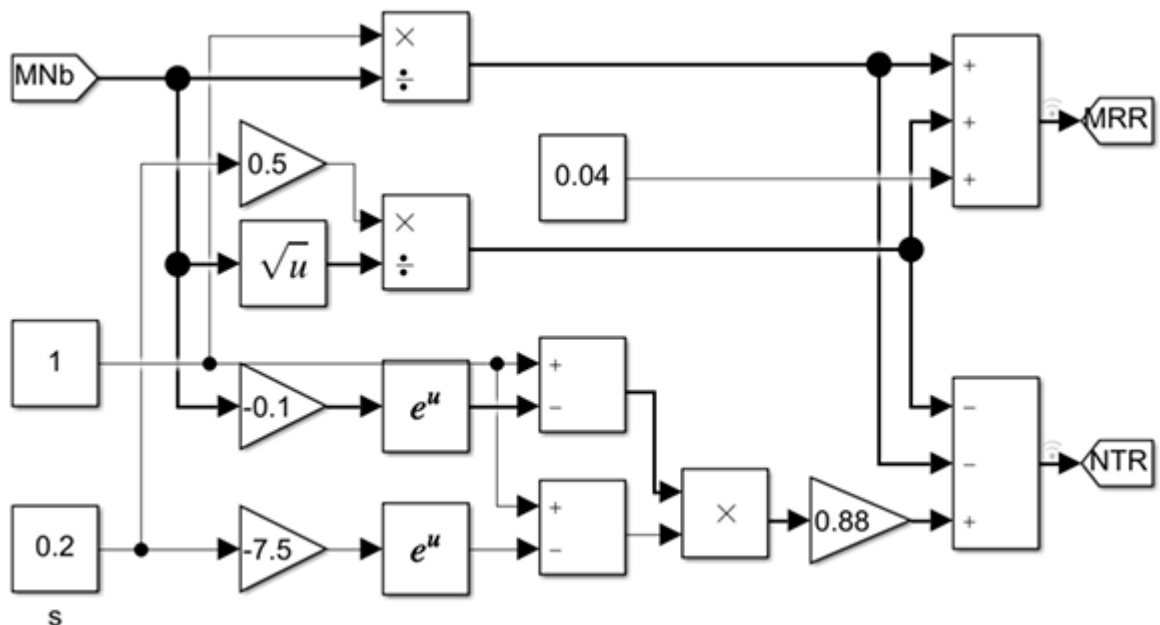


Рис. 2.26 – Модуль підсистеми «Tires» розрахунку взаємодії шини з ґрунтом з умов ASAE D497.4 [213]

Беручи до уваги, що метою даної роботи є опрацювання експрес – методики агроекологічної оцінки колісної техніки (тракторів та автомобілів насамперед) на базі оцінки твердості ґрунту як опорної поверхні в аспекті кореляції з відповідними значеннями щільності, а не перегляд критично допустимих значень питомого тиску у контакті шини з ґрунтом, то обмежуємось власне тим режимом кочення колеса, що і заданий у нормативній базі [29]. Однак при цьому все-таки додатково враховуємо очевидний факт доущільнення ґрунту при проходженні по колії коліс другої осі та реалії можливих різних типорозмірів шин передньої та задньої осей, а також і можливі різні навантаження на осі.

2.5. Приклади оцінки агроекологічності колісних машин

Беручи до уваги принаймні 5 базових типів ґрунтів України щодо гранулометричного складу, рис. 2.27 [216], можна припустити певні потенційні відмінності щодо деформації, ущільнення піщаних, супіщаних земель та глинистих чорноземів. Тим паче, що і у нормативній базі [29] закладено збільшення на 20% норм максимального тиску на ґрунт для супіщаних і піщаних ґрунтів. Разом з тим територіально на Львівщині однозначно домінують легко- та середньосуглинкові ґрунти (у межах дослідних полів університету та Львівської філії державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки та технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» у с. Магерів), що зумовлює відповідне обмеження щодо польових досліджень та оцінку адекватності проведених теоретичних, розрахункових досліджень ущільнення ґрунту МТА.

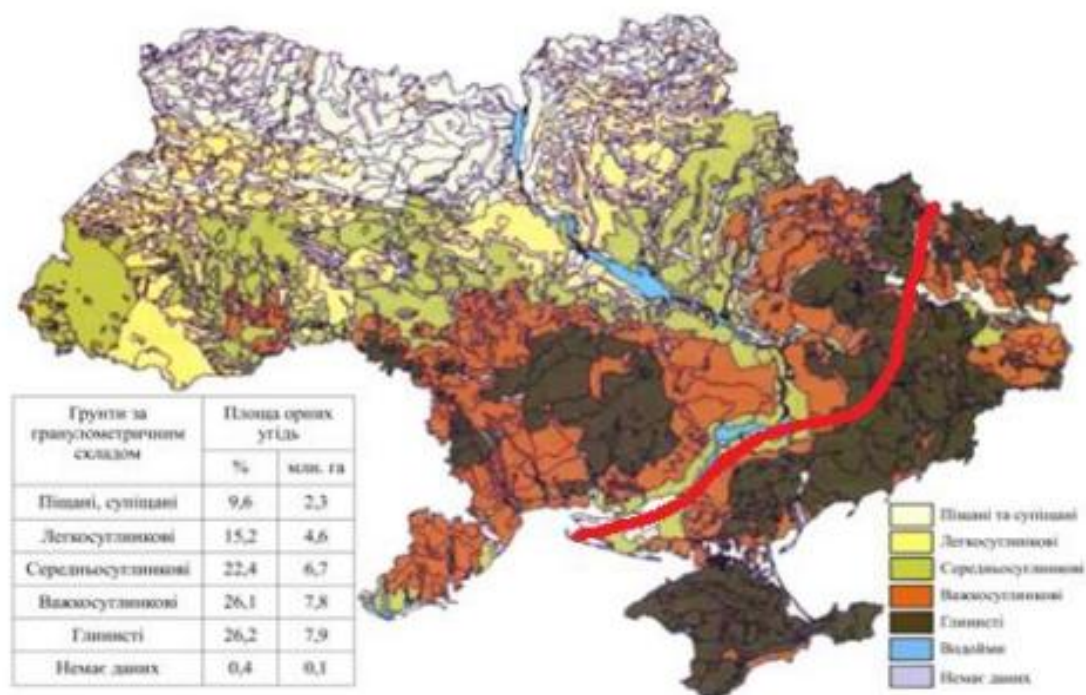


Рис. 2.27 – Гранулометричний склад ґрунтів України [216]

Теоретична оцінка агроекологічності колісних машин на базі існуючих в Україні та опрацьованої методик проведена щодо доступної техніки, що дає можливість провести і відповідні експериментальні дослідження на ґрунтових поверхнях з оцінкою рівня адекватності теоретичних оцінок. У нашому випадку – це колісні трактори Fendt 1038 Vario та ХТЗ Т150К, а також повнопривідний автомобіль КамАЗ 4310. Окрім цього проведений обширний огляд та аналіз відомих публікацій (у більшості не пов'язаних з агроекологією, але де наявні дані щодо ущільнення ґрунту при використанні колісної техніки) також дозволяє провести теоретичні розрахунки для порівняння з наведеними у цих роботах експериментально визначеними значеннями щільності/твердості ґрунтів у колії та поза її межами (так зв. контрольні ділянки). Звично, що значний вплив на оцінку адекватності теоретичної оцінки має реальність нестабільності реальних значень твердості/щільності ґрунту на ділянці поля [191] – теоретичний розрахунок базується на фіксованому значенні характеристик ґрунту (нехай і опосередкованому для певної ділянки, але реальні заміри на полі мають певний діапазон значень).

На прикладі одного з найважчих колісних тракторів, що використовується аграріями в Україні - Fendt 1038/1050 Vario [217,218] та є найважчим в модельній гаммі (14 т) і обладнаний шинами різних типорозмірів на передній та задній осях, табл.2.12. У традиційному для країн ЄС звіті про польові випробування трактора цієї моделі однак відсутні дані щодо плями контакту та ущільнення ґрунту [219].

Таблиця 2.12 – Базові параметри трактора Fendt 1038/1050 Vario [217,218]

Параметри		Значення
Повна маса (без навісного обладнання), кг		14 300
Навантаження на осі: передня/задня, кг		6200/ 8100
Розмірність шин : передні	650/65R34; <u>650/65R38</u> ; 710/65R38	
задні	710/75 R42; <u>750/75R46</u> ; 900/65R46	

тут – підкреслений типорозмір шин підчас експерименту з Fendt 1038

Діапазон можливої зміни тиску повітря у шинах наявного підчас досліджень трактора Fendt 1038 Vario (типорозмір – табл..2.12) – від 0,4 бар при швидкостях до 30 км/год до 1,8 бар – до 50 км/год [220]. Відповідно згідно вищенаведених методик (рис.2.22 та окремо у програмному середовищі MATLAB Simulink) були проведені розрахункові визначення площ плям контакту шин передньої та задньої осей для тиску повітря 0,4 і 1,8 бар при статичних навантаження на осі (табл..2.12), а також при донавантаженні навісним обладнанням, табл..2.13. Останнє прораховано у 2-х варіантах – згідно вимог ДСТУ 4428:2005 [31] – з врахуванням найбільшого тягового зусилля трактора (таке значення однак не фігурує у технічних характеристиках тракторів з ЄС, по співвідношенню маси трактора і тягового зусилля, рис.1.11, приймаємо 7.0) та орієнтовного кута нахилу нижніх тяг навіски згідно ДСТУ ГОСТ 10677-2003 [220] – з замірів

на тракторі. Другий варіант – з практики у ЄС [221] – донавантаження коліс задньої осі при оранці складає 45-60% від статичного навантаження на вісь трактора без навісного обладнання (фактично в залежності від кількості корпусів плуга – ширини оранки). Окрім цього проведені розрахунки і згідно спрощених формул визначення плями контакту – вітчизняних досліджень [186] та [115,161,162] , а також вищерозглянутих у розд 2.3 зарубіжних [166] та [184] стосовно рівноважного суглинка, де співвідношення глибини колії z і діаметра колеса D є у межах $0,025 < z/D < 0,05$ [127]. Щодо цікавої методики, запропонованої у [168], де через фіксацію глибини колії z (2.13) фактично враховується твердість ґрунту, то власне відсутність емпіричної залежності щодо її розрахунку обумовлює все-таки заїзд конкретної машини на поле і унеможливорює чисто розрахункову оцінку площі плями контакту. Відповідна емпірична залежність відсутня і у наступних публікаціях автора [222,223].

Шини на Fendt 1038/1050 Vario – радіальні і за співвідношенням ширини протектора B до висоти самої шини H - передні є низькопрофільні, задні – повнопрофільні (з різними емпіричними залежностями розрахунку площ плям контакту згідно [127] – табл. 1.9). Розрахунки площі плями контакту згідно [127] проводились як згідно опрацьованої спеціально комп'ютеризованої програми (рис.2.22), так і відповідної програми у середовищі MATLAB Simulink, що базуються на ідентичному математичному апараті і відповідно забезпечили однакові результати.

Таблиця 2.13 – Результати розрахунку площі плям контакту шин (см²) трактора Fendt 1038 Vario за різними методиками

Площа контакту, см ²	Передня вісь		Задня вісь	
Тиск повітря у шині, бар	1,8	0,4	1,8	0,4

[127]	Експ. маса	4648	5288	6344	6682
	Плуг [221]	4648	5288	7233	7521
	плуг [31]	4648	5288	7150	7440
[184]	0,27DB	3177	3177	4637	4637
	0,87B0,31D	3173	3173	4632	4632
[161-164] а)		1613	4291	1953	7475
б)		1825	5883	2556	8225
[224]		5882	5882	8587	8587
[225]		1150	6975	2025	9112
[226]		1722	7750	2250	10125
[192]		10571	10656	9539	9624
[158,189] а)		3045	4291	3746	5337
б)		2212	2301	3052	3337

Додатково площу плями контакту за методикою Dr. E. Diserens [127] було прораховано і під додаткове навантаження під плуг при оранці з збільшенням вертикального навантаження на колеса задньої осі згідно розрахунку за двома методиками – європейської практики [221] та вимог чинної вітчизняної нормативної бази [31], що засвідчило близькі результати, табл. 2.13. (Звично, що розрахунок під вимоги ДСТУ [31] є орієнтовним з фіксацією кута нахилу нижніх тяг навіски трактора Fendt 1038 Vario з габаритного зображення трактора на сайті Fendt [217] під вимоги [220]. Окрім цього при цих розрахунках не враховувались реалії динаміки перерозподілу навантажень між

осями, що вимагає окремого дослідження і не нормативними актами – все додаткове навантаження приведено до задньої осі.).

Для порівняльного аналізу інших існуючих методик теоретичного розрахунку площі плями контакту шин з опорною поверхнею проведено відповідні розрахунки для даної моделі трактора Fendt і за іншими емпіричними залежностями, табл. 2.13. Зокрема за донедавна найбільш розповсюдженим в західному світі простим виразом [184,227], де враховується тільки діаметр D та ширина B шини, безвідносно навантаження та тиску повітря, а також спрощеною залежністю (2.4) і у вітчизняних дослідженнях з часів СРСР, однак що враховує радіальну деформацію шини (2.5), а отже і навантаження на шину та тиск повітря у шині [161-164]. Радіальна деформація шин при цьому визначалась як з емпіричних даних (варіант а) у табл. 2.13), так і за відомою формулою Хендекеля (2.5) [217] (варіант б) у табл. 2.13). Визначені різниці значень радіальної деформації шин доволі суттєво відрізняються. Емпіричні значення для тиску повітря у шинах 1,8 бар склали 5 см, для тиску 0,4 бар – 15 см. Визначені згідно (2.5) для передніх шин відповідно 5,46 см та 23 см при навантаженні 3100 кг, для шин задньої осі – 5,74 см та 26,42 см при навантаженні 4050 кг. Різниця у значеннях площ контакту для відповідних тисків 0,4 та 1,8 бар майже трикратна, що малоймовірно у реаліях, причому ближче до фактичних є власне значення для тиску 0,4 бар. Загалом отримані значення суттєво відрізняються від отриманих згідно європейської методики [184,228] у табл. 2.13.

Детально опрацьовано варіант з більш сучасною вітчизняною методикою розрахунку площі плями контакту шин з ґрунтовою поверхнею, що використана у харківській науковій школі проф. Кальченка Б.І. та проф. Реброва О.Ю. [158,189]. При цьому аналогічно для оцінки радіальної деформації шин було використано вищезазначені варіанти а) та б), табл. 2.13. Очевидно більш точна оцінка радіальної деформації шин згідно [80,158] для оперативної оцінки а умов агроєкології обумовлює отримання додаткових

характеристик шин від виробників і безперечно актуальна для наукових досліджень, особливо в аспекті розвитку високо еластичних шин типу IF та VF, що не досліджувались в інших роботах, але власне необхідність уточнення додаткових характеристик шин є певним бар'єром для аграріїв. Зрештою це питання у перспективі доцільно пов'язати і з формуванням реально об'ємної форми контакту шини з ґрунтом, що деформується [80,229]. Отримані результати значно ближчі до значень згідно емпіричної залежності Е. Дізеренс [127].

Враховуючи практичну цілеспрямованість даної роботи щодо швидкої оцінки агроекологічності застосування колісної техніки опрацьовано також розповсюджений в Україні колісний трактор ХТЗ Т 150К (у версії наявного Т 150К-09), що був предметом багатьох відомих досліджень у агросфері [106, 107, 158,189].

Розрахункова оцінка агроекологічності трактора Т 150К базувалась на використанні вищенаведених виразів, насамперед опрацьованих у НТУ «ХП» . [158,189]. та Е. Дізеренс [127]. У табл. 2.14 представлені відповідно отримані результати оцінки площ плям контакту та значень питомого тиску колеса на ґрунт. Діапазон зміни тиску повітря у шинах прийнято 0,6 – 2,0 бар. Додатково до серійних шин 21,3R24 розглянуті і рекомендовані рядом дослідників 28,1R26.

Таблиця 2.14 – Результати розрахунку площі плями контакту та питомого тиску на ґрунт трактора ХТЗ Т150К-09 за різними методиками

	Шина 21,3 R 24		Шина 28,1 R 26	
	тиск 0,6 бар	тиск 2,0 бар	тиск 0,6 бар	тиск 2,0 бар
[127]			4915	

Площа, см ²	3381	3093		4595
Тиск, кПа	58	62	68	52
[158,189]				
Площа, см ²	3285	540	2842	321
Тиск, кПа	59,7	362	68	610
[161-164]				
Площа, см ²	2872	951	3059	1009
Тиск, кПа	68	206	64	194
[184]	2466	2466	4020	4020

Як свідчать отримані результати є значні розбіжності отриманих результатів за даними методиками, насамперед у зоні високих значень тиску повітря у шинах, табл.. 2.14. Відповідно і суттєво відрізняються значення питомих тисків у контакті шин з ґрунтом, що, незалежно від методик розрахунку, суттєво перевищують допустимі з умов агроєкології значення згідно табл.. 1.1 [29].

В цьому плані актуальним є і оцінка агроєкологічності ще донедавна найбільш масового у сільському господарстві вантажного автомобіля ГАЗ 53А / ГАЗ 3307, повна маса якого дуже близька до трактора Т 150К [229,230].

Таблиця 2.15. – Базові характеристики ГАЗ 53А / ГАЗ 3307 [229]

Довжина / ширина, мм	6395 / 2380
Маса, повна / споряджена, кг	7700 / 3700
Допустима маса причепа, кг	4000
Колія, передня / задня, мм	1630 / 2170
Типорозмір шин	240 – 508 (8,25 – 20)

Беручи до уваги розвиток агрохолдингів і практику великих аграрних виробників у країнах ЄС очевидне зростання повнопривідних

великотоннажних автомобілів з причепами. В цьому плані повнопривідну вантажівку уже категорії N3 вітчизняного виробництва КрАЗ 6322 [231] (у т.ч. з причепом КрАЗ А141Н2 вантажністю 10т і повною масою 14,1т з однаковою колією з тягачем [232]), що є аналогом по тоннажності і повному приводу MAN, MB, Iveco, Renault у великих аграрних господарствах ЄС, та набувають використання у вітчизняних агрохолдингах[136].

Безперечно, як альтернатива до тривісної моделі КрАЗ 6322 для агрохолдингів є і дещо дешевша двовісна модель КрАЗ 5233 [233], але з точки зору як співвідношення ціна – вантажність та тиск на ґрунт – прохідність і суттєво більший причеп перевагу слід віддати власне тривісній машині. Навантаження на вісь у КрАЗ 6322 біля 8 т (що вже більше колісних тракторів класу тяги 5 – 7 при значно менших колесах і площах контакту) і вантажність складає 12 т. У КрАЗ 5233 вантажність 6-7т і навантаження на задню вісь 9,5 т, що відчутно як з умов агроєкології, так і прохідності. Окрім цього суттєво відрізняються і допустимі повні маси причепів – відповідно 10т і 7 т. Автомобілі обладнані практично ідентичними силовими агрегатами і коробками передач та, відповідно, мають незначну різницю у витраті на паливе і технічний сервіс.

При спорядженій масі біля 12 т вантажність КрАЗ 6322 на бездоріжжі складає 12 т та забезпечується можливість буксирування причепа КрАЗ А141Н2 вантажністю 10 т при повній масі 14,1 т [232]. Шини тягача – з регулюванням тиску повітря, типорозмір 1300х530 – 533 (530/70 – 21). Шини причепа – 385/55R22,5. Колісна колія однотипна.

Досвід країн ЄС свідчить, що до 60–70% внутрішньогосподарських перевезень здійснюється саме автомобілями через їх вищу продуктивність і нижчу собівартість перевезень порівняно з колісними тракторами з причепами.

Очевидно, що формування автопарку в сучасному агросекторі України у розвитку і необхідність мінімізації агроєкологічного впливу вантажівок внутрішньогосподарського типу є очевидною.

Особливістю конструкції ГАЗ 53/ ГАЗ 3307 з умов руху аграрними угіддями, фактично бездоріжжям, нехай сухим або зволженим, є здвоєні колеса задньої осі та відсутність повного приводу (на відміну від військового аналога з тим же силовим агрегатом – ГАЗ 66). Неоднакові навантаження на передню і майже вдвічі більше на задню формують практично близькі вертикальні навантаження на колеса. Однак власне здвоєні колеса задньої осі і ефект такого доущільнення колії, утвореної від передньої осі загалом не розглядається у WES – методиці оцінки прохідності і мобільності руху колісної техніки НАТО [48,49]. З аналізу значень передньої (1630 мм) та задньої (2170) колій випливає, що зовнішні половини обидвох задніх шин виходять за межі колії коліс передньої осі і процес доущільнення ґрунту задніми колесами у межах половини площі плям контакту є близьким до взаємодії з опорною поверхнею коліс передньої осі.

На цих автомобілях ГАЗ, окрім стандартних діагональних шин 240-508 (8,25 -20) з різним тиском повітря на передній (2,8 бар) та задній (4-5 бар), можливе і використання більш сучасних радіальних того типорозміру, однак з зміненими тисками повітря у шинах – 3,9 бар для передньої осі та 6,2 бар для задньої. Відповідно і розрахунки проводимо для цих варіантів. Щодо методики Е. Дізеренс різницю формування плями контакту діагональних та радіальних шин спробували врахувати за рахунок залежності для типу шин – «інші, невизначені», табл..1.9.

У табл.. 2.16 представлено результати розрахунку площ плями контакту та питомого тиску на ґрунт для ГАЗ 3307 та КрАЗ 6322.

Таблиця 2.16 – Розрахунок агроекологічних характеристик ГАЗ 3307/КрАЗ 6322

Методики	ГАЗ 3307/ГАЗ 53А				КрАЗ 6322	
	діагональні		радіальні		1,0 бар	3.8 бар
	2.8бар	5 бар	3.9бар	6 бар		

НУ ХПІ [158,189]						
Площа, см ²	809	466	591	385	1358	394
Питомий тиск,кПа	158	274	216	331	267	921
Diserens [127]						
Площа, см ² (повн.)	764	311	460	286	3645	3068
(низькопрофільні)					3041	1760
Питомий тиск, кПа	167	410	330	445	119	206
ІІІs [39], см ²	639	639	639	639	1822	1822

Враховуючи, що на вантажівках ГАЗ 53А / ГАЗ 3307, окрім серійних діагональних шин 240-508 (8,25 – 20) почали використовувати і радіальні шини того ж типорозміру, але з дещо іншими характеристиками корду і деформацій, а у методиці Е.Дізеренс [127] базові залежності (табл.1.9) опрацьовані власне під радіальні шини, провели спробу прорахунку власне діагональних шин згідно виразу:

- для невизначених, інших типів шин:

$$F_k = 0,428 B D - 650,215 p_k + 0,221 G_k$$

Отримані результати, однак, засвідчили явно нереальні результати.

Очевидно це стосується специфічних причіпного аграрного знаряддя, комбайнів і т.п.

Для автомобілів КрАЗ, враховуючи розмірність шин 530/70- 21 на межі повно- і низькопрофільних розрахунки проведені згідно обох залежностей, табл. 2.2. Очевидно ближче до реалій власне розрахунок для низькопрофільних шин.

Отримані результати за методикою НУ «ХП» [12,28], як розвитку методу ще з часів СРСР, є співставними з результатами по методиці Е. Дізеренс щодо вантажівки ГАЗ (табл..2.16), однак суттєво відрізняються щодо отриманих результатів по КрАЗ, табл.. 2.16.

Для порівняння в табл.. 2.16 представлено і результати розрахунку площі плями контакту шини з твердою опорною поверхнею (бетон) за найбільш розповсюдженою США та ЄС формулою Ills [39], що однак не враховує зміни тиску повітря у шині та навантаження на неї :

$$F_k = 0,87 B \times 0,31 D \quad (2.22)$$

2.6. Аналіз та висновки теоретичної оцінки агроекологічності колісних машин

Проведені дослідження дозволяють констатувати значну кореляцію між значеннями твердості ґрунту (як конусного індексу CI) та його щільності і вологості (у межах діапазону значень, характерних для аграрних операцій обробітку). Звично, що чисельні значення коефіцієнтів кореляції для різних типів ґрунтів (тут чорнозем, суглинок, мабуть і для супіску) відрізняються. Однак у всіх випадках кореляція вищезазначених параметрів є сильною, що дозволяє реальність оперативної агроекологічної оцінки МТА для конкретного поля з заміром значень твердості сучасними пенетрометрами з стандартизованим конусним наконечником (CI) під вимоги WES – методики. Очевидна, відповідно, актуальність прийняття в Україні як ДСТУ міжнародного стандарту ISO 22476-1:2012 та подальшого розвитку вітчизняної нормативної бази - ДСТУ 4428:2005, ДСТУ 4521:2006 та ДСТУ 4977:2008, що дозволило б проводити агроекологічну оцінку МТА в конкретних умовах в режимі реального часу. При цьому слід врахувати реалії різних типорозмірів коліс передньої та задньої осей і ефект додаткового ущільнення ґрунту колесами задньої осі при послідовному проходженні в одній колії. Потребує розвитку і нормативна оцінка площі плями контакту шин, що реально є більшою на ґрунтах у порівнянні з передбаченою ДСТУ оцінкою – заміром на твердій, бетонній поверхні, а також відповідної корекції

її значення залежно від навантаження на колесо, тиску повітря в шині та типу шин (діагональні, радіальні).

Значний вплив твердості / щільності ґрунту і його типу (супісок, глина) наглядно демонструють і результати експериментальних досліджень, представлених на рис. 2.28 [127].

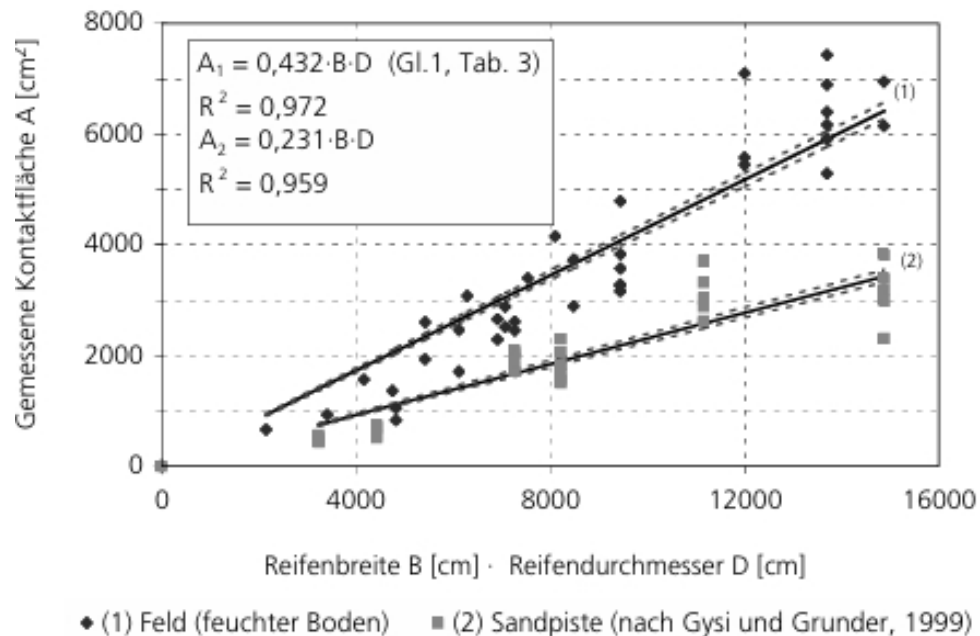


Рис. 2.28 – Залежність площі плями контакту шин від типу ґрунту [127].

Тут – по осі ординат заміряна площа плями контакту, по осі абсцис – типорозмір шин : $B \times D$ (ширина $\times$ діаметр); (1) – глина середньої вологості;
(2) – супісок

Також відомі дослідження, включно з заміром глибини колії, зміни реальної площі плями контакту однотипної шини при незмінному навантаженні і тиску повітря в шині, рис. 2.29 [234].

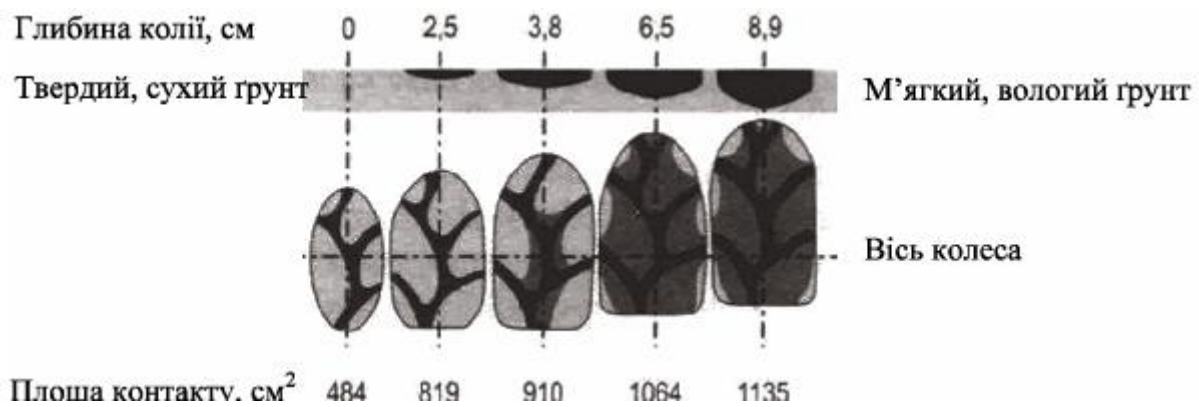


Рис. 2.29 – Залежність площі плями контакту і глибини колії від вмісту води у ґрунті [234].

Щодо неоднозначної кількісної оцінки впливу тиску повітря у шині на формування площі плями контакту у емпіричних залежностях у [158,189] та [127], то слід зауважити, що у їхню основу закладено насамперед різні типи шин – радіальні у [127] та діагональні [158,189]. Але загалом різниця занадто відчутна. Щодо реалій, то на рис. 2.30 представлені результати відповідної експериментальної оцінки [190].

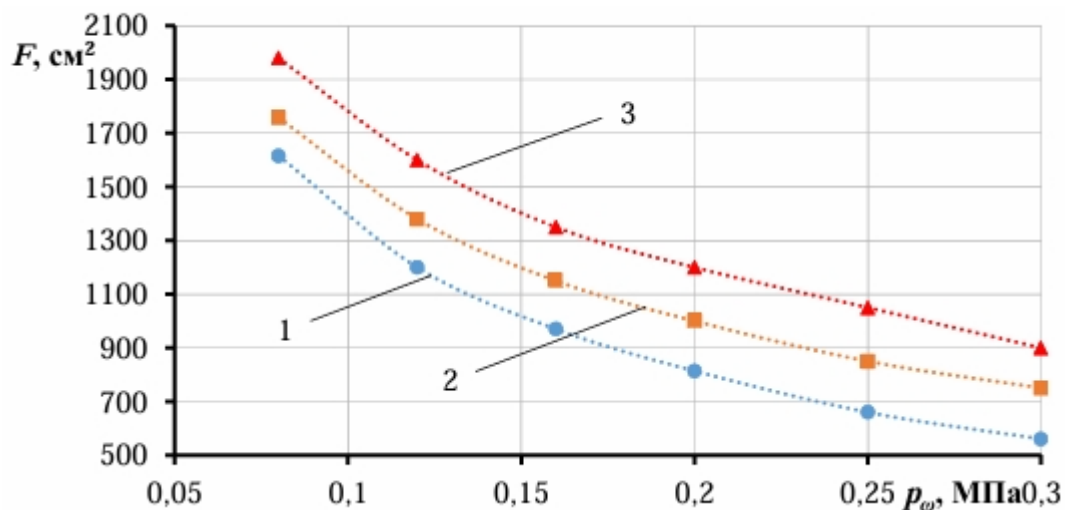


Рис. 2.30 – Зміна площі плями контакту шини 530/70 – 21 залежно від тиску повітря у шині та навантаження на шину [190]

Тут: 1,2,3 – навантаження на шину 16,7; 24,3 та 32,5 кН

Відповідно радіальному прогину шини змінюється і достатньо відчутно радіус кочення колеса, рис. 2.31:

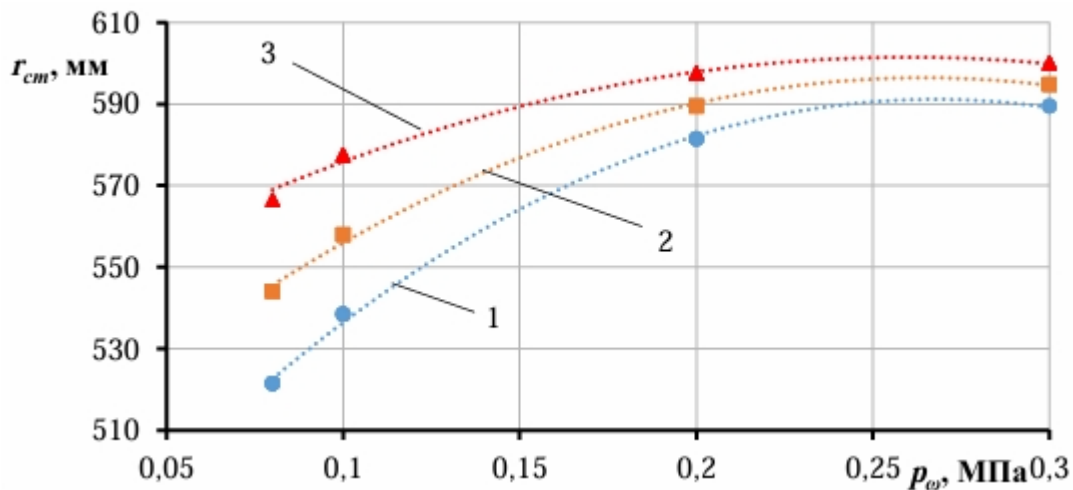


Рис. 2.31 – Залежність статичного радіуса колеса з шиною 530/70 – 21 від тиску повітря у шині [190].

Загалом слід зазначити, що пляма контакту пневматичної шини з ґрунтом, що деформується, як зазначено у [85,235], є об'ємною і складається з двох зон – плоскої еліптичної поверхні (що і є в основі існуючих методик) та криволінійної об'ємної поверхні контакту передньої частини шини з ґрунтом, рис. 2.32.

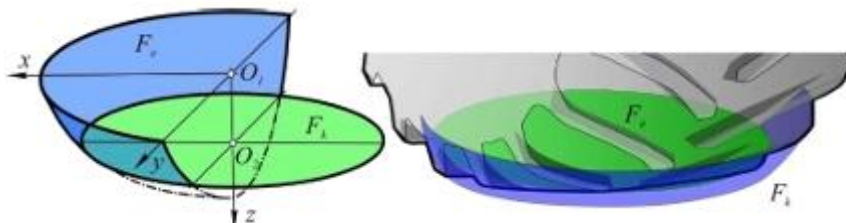


Рис. 2.32 – Форма контакту шини з ґрунтом, що деформується [85,235],

Окремого, детальнішого дослідження потребує і оцінка площі плями контакту здвоєних шин, що власне з умов агроєкології часто використовуються як засіб зменшення ущільнення ґрунту [21 і ін.]. Крім цього, на формування плями контакту здвоєних шин впливає міжколісна відстань (утворення міжколісних бортів колій), однак площа плями контакту не збільшується лінійно вдвічі – додаткова маса другого колеса та зменшення вдвічі навантаження на кожне з коліс поряд з, як правило, зміною тиску повітря у здвоєних шинах обумовлюють необхідність окремого дослідження формоутворення [21, 22]. Зміна тиску повітря в шинах теж не має лінійного

впливу на формування площі плями контакту, зрештою як і на розподіл тиску у зоні контакту колеса з ґрунтом [23], що ще донедавна (і досі у багатьох підручниках) визначався як збільшений у 1,3-1,5 тиск повітря у шинах. Зміна плями контакту залежно від тиску повітря в шинах має нелінійний характер і пов'язана, окрім навантаження на колесо і типорозміру шин, також і з твердістю опорної поверхні – ґрунту. Найбільш опрацьованою методикою оцінки питомого тиску у контакті шини з ґрунтом з умов агроєкології (а відповідно і розрахунку площі плями контакту), як показує проведений огляд та аналіз публікацій, є швейцарсько-данська комп'ютеризована програма розрахунку Terranimo [24], що базується і на вищезгаданому дослідженні E. Diserens [11] та враховує і твердість ґрунту (з прив'язкою щодо питомого вмісту глини і вологи). Допустимість/шкідливість конкретного значення тиску у контакті оцінюється дво параметровою діаграмою „твердість ґрунту – питомий тиск у контакті”. Однак програма опрацьована фактично для типових для Данії суглинків з вмістом глини 5 -18% та діапазону вологості, характерного для даної кліматичної зони.

РОЗДІЛ ІІ ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Методика, об'єкти дослідження та апаратура експериментальної агроекологічної оцінки МТА

Щодо дослідного поля університету – темно-сірого легкосуглинкового опідзоленого, підготовленого до сівби [236] – були проведені заміри значень твердості – значень конусного індексу СІ з використанням доопрацьованого з заводом-виробником промислового пенетрометра «ЛАН-М PRO» [237] з заміною конусних наконечників на конус з регламентованою геометрією згідно WES – методики НАТО [48,49,238] та відповідними змінами у програмному блоці приладу (рис.3.1).

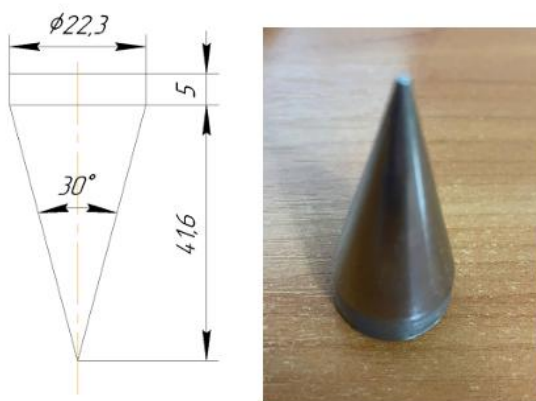


Рис. 3.1 – Конусний наконечник СІ під вимоги WES – методики НАТО та інтерфейс пенетрометра «ЛАН-М PRO» з фіксацією значень СІ по глибині занурення в ґрунт



Рисунок 3.2 – Пьезоелектричний пенетрометр «ЛАН-М PRO» [237]

Заміри навантаження на колесо здійснювалось з використанням метрологічно повірених ваг автомобільних підкладних INTERCOMP PT300DW №0412AB07453 та №0412AB07457 (рік випуску 2007; межа зважування до 5000 кг; (відносна похибка вимірювань не більше $\pm 1\%$) від ВАТ «Укравтобуспром», рис. 3.3.



Рис. 3.3 – Автомобільні ваги INTERCOMP PT300DW заміру навантаження на колесо

Територіально еспериментальні дослідження обмежені щодо типу ґрунтів в смт.Дублян та с. Магерів (Львівська філія Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого)). Дослідні поля – в основному темно-сірого легкосуглинкового опідзоленого ґрунту з відомими фізико-механічними характеристиками [236]. При цьому слід брати до уваги і нерівномірність показників твердості, щільності ґрунту по території поля [239]. Однак власне заміри плями контакту колеса з ґрунтом нормативно є статичними і, відповідно, слід передбачити тільки замір твердості ґрунту до опускання колеса МТА і уже з повторним заміром зміни твердості після колеса. Заміри щодо коліс передньої і задньої осей машин проводились окремо, на близьких (2-3м) ділянках поля – з умов близьких значень твердості

грунту СІ, але також додатково щодо коліс задньої осі у колії після передньої з метою оцінки ефекту доущільнення ґрунту задньою віссю, що поки що не передбачено ДСТУ [29-31], але є реальним і передбачено у нормативній базі WES – методики НАТО [48,49] та є і предметом оцінки у ряді сучасних досліджень [12,100,157].

Для експериментальної оцінки реальних значень площі плями контакту проведено польові дослідження на прикладі одного з найважливіших колісних тракторів, що використовується аграріями в Україні - Fendt 1038 Vario, рис. 3.4, а також розповсюджений в Україні ХТЗ Т 150К, рис.3.5. Базові параметри Fendt 1038 Vario представлено у табл.. 2.12.



Рисунок 3.4 – Трактор Fendt 1038 Vario на дослідному полі

Окрім колісних тракторів експериментальні дослідження оцінки площі плями контакту шин з опорною поверхнею прооводились і для зазначених вище 2-х моделей вантажних автомобілів:

- ГАЗ 53А / ГАЗ 3307, як донедавна ще найбільш масової моделі у сільському господарстві України, повна маса якого (7,5 -7,7 т) є співставна з трактором Т 150К, але значно менший типорозмір коліс (8,25 – 20), попри

їхню більшу кількість (6 шт.) з меншою сумарною площею плям контакту з ґрунтом (табл.. 2.14, 2.16), обумовлює актуальність теми;

-



Рисунок 3.5 – Трактор ХТЗ Т 150К-09

- КрАЗ 6322, повнопривідний 6х6, повною масою 24 т та вантажністю 12т що передбачає експлуатацію з причепом КрАЗ А141Н2 повною масою 14 т, рис 3.6. Використання автомобілів такого класу характерне для крупних аграрних підприємств у країнах ЄС [136] і очевидно є актуальним і для нас.



3.2. Експериментальна оцінка ущільнення ґрунту МТА на базі WES

– методики

У порівнянні з заміром площі плями контакту шини з твердою бетонною поверхнею практичний інтерес представляє оцінка реальних площ плям на ґрунтових поверхнях, що деформуються і власне які і формують реальні значення питомого тиску у контакті (рис.2.29). Вище опрацьовані емпіричні залежності теоретичного розрахунку площі плями практично не враховують твердість ґрунту, як опорної поверхні, та відповідне збільшення площі плями контакту. (Радіальна деформація шини, тиск повітря у шині враховуються в аспекті взаємодії з твердою опорною поверхнею. Природне збільшення площі контакту на ґрунті, що деформується, звичайно обумовлює і певне зменшення радіального прогину шини). Для коректності експерименту було використано «повзучий» з'їзд колеса з підставної опори (дерев'яна дошка товщиною 80 мм), рис.3.7, до моменту повного скочування колеса за межі контакту з дошкою та фіксації плями контакту і замірів ущільнення, рис.3.8.



Рисунок 3.7 - Визначення плями контакту шини задньої осі трактора Fendt 1038 Vario



Рисунок 3. 8 -Фіксація плями контакту заднього колеса трактора на ґрунті і вимірювання твердості ґрунту



Рисунок 3.9 - Інтерфейс твердоміра «ЛАН-М PRO» з записом вимірювання твердості ґрунту

Природньо, що попередньо здійснювався замір твердості ділянки ґрунту до заїзду колеса та потім уже ущільненої після від'їзду колеса назад, рис. 3.9. Всі заміри здійснювались з 3-кратним дублюванням (окрім ГАЗ 53А, де з-за незадовільного технічного стану автомобіля обмежились фіксацією фактичної площі плями контакту шини передньої осі на бетонну поверхню з відбитком контакту на картоні та виважуванням і опускання колеса домкратом).

У табл. 3.1 представлено результати експериментальних досліджень щодо трактора Fendt 1038 Vario. Відчутна різниця у розмірах шин передньої та задньої осей а, відповідно, і заміряних площ контакту з опорною поверхнею (4937,7 см² та 6476,3 см²) та різне навантаження зумовили різне ущільнення – зміну твердості ґрунту в центрі плями контакту шин кожної з осей (табл. 3.1) (триразове дублювання дослідів). Оцінка щільності ґрунту та вмісту води базувалась на звичній лабораторній процедурі із забором проб ґрунту на трьох рівнях глибини – 5, 10–15 та 20 см для трьох місць у доколі 0,4–0,6 м плям контакту та з використанням терезів ВЛТК 5000 і сушильної електрошафи з

нагрівом проб до 150° С , рис.3.10 (табл.3.1). Забір проб здійснювався для плями заднього колеса і на ділянці поза межами контакту коліс трактора з ґрунтом (так звана контрольна ділянка).

Таблиця 3.1 -. Результати замірів твердості ґрунту СІ та вибірки проб оцінки щільності та вологості (дослідне поле ЛНУП) з Fendt 1038 Vario

Глиби- на, см	Значення твердості СІ, кПа / щільності ґрунту, г/см ³ (вологість,%)								
	Заднє колесо			Переднє колесо			Поза колесами		
2,5	765,6	669	722	986	757	801	528	458	537
5	1100/ 1,2(7)	1135/ 1,3(7)	1135/ 1,3(7)	994	906	1047	563/1,12 (5,1)	519/1,04 (5,7)	607/1,2 (4,8)
7,5	1082	1320	1250	1179	1082	1153	590	572	651
10	1135	1373	1390	1276	1223	1267	968	810	906
12,5	1003/ 1,3(9,6)	1294/ 1,5(11)	1320/ 1,6(11)	1373	1302	1382	1126/1,4 (8,6)	950/1,2 (9,8)	1091/1,3 (8,8)
15	10,3	14,1	1223	1390	1390	1443	1047	968	1030
17,5	1214	1769	1646	1575	1505	1566	1179	1241	1197
20	1593/ 1,4(12)	1971/ 1,6(16)	1866/ 1,6(13)	1663	1690	1742	1549/1,5 (13,9)	1593/1,4 (14,7)	1540/1,4 (13,4)
22,5	1716	2033	1927	1936	1830	1901	1584	1566	1681

Однак загалом цей процес оцінки є тривалим і обмеженим для реального використання в реаліях АПК та достатнього обсягу вибірки з умов статистичної значимості. Розрахунки кореляції між значеннями твердості і щільності та вмісту води ґрунту здійснювались комп'ютеризовано згідно з рекомендаціями проф. Надикто В. Т. [152] у програмному середовищі Microsoft Excell версії 2016.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Терези ВЛТК 5000 (а) та сушильна шафа (б)

Отримані результати підтверджують за співвідношенням F критерію: $F_{\text{факт}} \leq F_{\text{табл}}$) лінійну кореляційну залежність між щільністю ρ та твердістю N ґрунту дослідної ділянки із значенням коефіцієнта кореляції $r = 0,758$ при статистичному рівні значущості 0,05 (опосередковані значення узагальнення шести замірів під колесами трактора та трьох замірів на ділянці поза колією коліс). Лінійна залежність характерна, як вище зазначено, для ґрунтів із щільністю у глибині замірів до 1,35 г/см³. Заміри реальних площ контакту шин трактора Fendt 1038 Varіo на полі – опорній поверхні, що деформується, рис.3.11, дозволяють дати і фактичну оцінку тиску ходової системи у цьому конкретному випадку з умов агроєкології. За відомого статичного навантаження на вісь (табл. 1) отримуємо: 62 кПа для коліс передньої осі та 61,4 кПа для задньої. Відповідно до нормативної бази [29], з урахуванням щільності ґрунту в шарі глибиною 0–10 см та вмісту води (табл. 3.1) це гранично допустимо для літньо осіннього періоду (але перевищує гранично допустимі значення для весни). Однак слід відзначити два важливі практичні аспекти, що суттєво впливають на коректність отриманих результатів:

1) Не враховано (згідно ДСТУ [29] не враховується) ефект проходу коліс задньої осі по колії передніх коліс і, відповідно, ефект додаткового ущільнення ґрунту [48,49, 12, 100,157];

2) Не враховано ефект донавантаження принаймні коліс задньої осі причіпним чи навісним знаряддям механічного обробітку ґрунту, у випадку оботи з плугом – згідно табл. 2.13 навантаження зростає на 13-16%.



Рисунок 3.11 - Визначення плями контакту шини передньої осі трактора Fendt 1038 Vario

Відповідно було проведено оцінку зміни плями контакту і твердості ґрунту у ній коліс задньої осі при проїзді уже утвореною колією колесами передньої осі з ущільненням ґрунту на глибині 2,5 см до 840 кПа (487 кПа до проїзду коліс передньої осі). Отримане значення твердості ґрунту СІ у плямі контакту з колією передніх коліс склало 1210 кПа (опосередковані дані за трьома замірами згідно схеми рис. 3.7). Практично це на 8-12 % більше у порівнянні до ущільнення ґрунту задніми колесами на ділянці без попереднього проходу коліс передньої осі, табл. 3.1. При цьому пляма контакту практично залишилась незмінною (в межах 3-4%). Це, в принципі, співпадає з результатами замірів твердості ґрунту в колії послідовно за колесами передньої та задньої осей трактора ХТЗ 17221 [157], табл. 2.7, де ефект ущільнення досягає до 14%. Але при цьому слід брати до уваги

однаковий типорозмір передніх і задніх коліс ХТЗ 17221, що забезпечує повну тотожність ширини колії передніх і задніх коліс. У нашому випадку ширина передніх (650 мм) і задніх (750 мм) відрізняються, що зумовлює зминання задніми шинами і частини неущільненого ґрунту.

Якщо врахувати додаткове навантаження коліс при оранці, то за методиками (вітчизняною [31] та західноєвропейською [221]) при збільшенні площі плями контакту шин на 14-16% вертикальне зусилля на колесо зростає відчутно більше – до 25-30%, що у свою чергу збільшує питомий тиск у контакті з ґрунтом на 18-20%.

Отримані значення площ плям контакту та фізико-механічних характеристик ґрунту (твердості, щільності та вмісту вологи) дозволяють визначити і відповідні значення питомого тиску на ґрунт у контакті коліс Fendt 1038 Varіo з ґрунтом при виконанні оранки – з врахуванням вищезазначеного доущільнення колії колесами задньої осі. Відповідне значення питомого тиску на ґрунт становить уже 78.2 кПа (при тиску повітря у шині 2,0 бар) та 67,5 кПа (при тиску 0,4 бар). Це свідчить уже про перевищення допустимих для даного стану ґрунту (табл. 3.1 – поза колесами) значень питомого тиску з кмов агроєкології, табл. 1.1 [29], як для весняного періоду, так і літньо-осіннього. Фактично це обумовлює необхідність використання здвоювання коліс (принаймні задньої осі), ефективність чого (в т.ч. і умов агроєкології) детально розглянута і підтверджена в роботах [35,80,85 і інш.]. Це продиктовано і тим, що і при оранці, де ефект ущільнення землі в колії певним чином нівелюється на глибину оранки, зберігається ущільнення ґрунту у глибших шарах ґрунту, що підтверджується з вищенаведених досліджень (рис. 1.16, рис.1.18). Відповідно і формування так зв. підорної підшви з значним погіршенням родючості угідь і необхідністю додаткових затрат, пов'язаних з розорюванням підорного шару – чизелювання.

Окрім цього нормативна база – ДСТУ 4428 [31] передбачає збільшення площі плями контакту, визначеної на бетонній поверхні, шляхом множення

на коефіцієнт, значення якого залежить від зовнішнього діаметра колеса. У нашому випадку це $K_l = 1,1$ (зовнішній діаметр колеса понад 1500 мм). Однак у даному випадку при експериментальному визначенні площі плями контакту безпосередньо на конкретному ґрунті ця вимога позбавлена змісту і має сенс тільки до випадків заміру чи розрахунку на бетонній опорній поверхні.

Загалом визначені експериментально (опосередковані з 3-х замірів) значення площ плям контакту коліс трактора Fendt 1038 Vario - 4937,7 см² для коліс передньої осі та 6476,3 см² для задніх коліс на ґрунті з твердістю біля 700-800 кПа на глибині 2,5 см достатньо близькі до розрахункових значень (для тиску повітря у шинах 1,8 бар) за методикою Е. Дізеренса, табл. 2.15 – відповідно 4648 см² та 6544 см², що свідчить про розбіжність у межах 6,5 – 2 %. Щодо розповсюджених в Україні методик теоретичного розрахунку площі плями контакту, табл. 2.13, то слід насамперед зауважити, що вони опрацьовані щодо діагональних шин, що досі домінують у вітчизняних колісних тракторах ХТЗ та автомобілях КрАЗ. Очевидно це одна з базових причин значного відхилення розрахункових значень площі плями контакту від експериментально визначених, насамперед при номінальному значенні тиску повітря у шинах, табл. 2.13. Радіальні шини формують відчутно більшу площу плями контакту, рис. 2.12. Разом з тим значення розрахункових площ при зниженому тиску повітря у шинах практично наближаються до розрахованих за методикою Е. Дізеренса, табл. 2.13. Очевидно діагональні шини більш «чутливі» до збільшення площі плями контакту при зниженні тиску повітря. Перевірити це припущення на тракторі Fendt 1038 Vario не було можливості (дилер не ризикнув експериментувати з трактором для продажу), але експериментальну оцінку з зниженням тиску повітря у шинах та здвоювання коліс в аспекті агроєкології на базі заміру твердості ґрунту було проведено щодо трактора ХТЗ Т 150К – 09, рис. 3.5.

Характеристика поля при експерименті з Т150К-09 практично близька до вищезазначеної (темносірий важкий суглинок) з дещо більшою твердістю, табл. 3.2, та вологістю, значення якої оцінювалось на підставі прямого кореляційного зв'язку, рис. 2.5 на основі значень твердості ґрунту ділянки поза колією (заміром плями контакту шини). Заміри твердості ґрунту проводились з необхідним дублюванням вищезгаданим пенетрометром, рис. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати замірів твердості ґрунту (мПа) з трактором Т 150К

	Глибина заміру в ґрунті, см			
	3 -5	8-10	12-15	18-20
Поза колесами, мПа	0,68	1,32	1,65	1,71
Вологість, %	23,9	23	22,2	21,7
Т 150 К-09 (4 кол)	2,6	3,1	3,5	3,7
Т 150К-09 (8 кол)	2,4	2,84	3,1	3,3

Враховуючи наявність комплекту коліс рекомендованої заводом-виробником розмірності 21,3 R24 проведено і заміри зміни твердості ґрунту та плям контакту шин для варіанту здвоєння коліс, табл. 3.2. Графічно отримані результати – зміна твердості ґрунту Т в функції глибини Н представлені на рис. 3.12.

Враховуючи співпадання колії передніх та задніх коліс та неминучість вищезазначеного ефекту доущільнення ґрунту в колії колесами задньої осі заміри твердості ґрунту (табл. 3.2) здійснювались уже після проходження обидвох коліс. Пляма контакту шин задньої осі фіксувалась уже в колії передніх коліс і внаслідок попереднього ущільнення ґрунту переднім колесом характеризувалась певним зменшенням площі. (Заміри проводились при

експлуатаційній масі трактора, без навісного чи причіпного обладнання і відповідного донавантаження трактора).

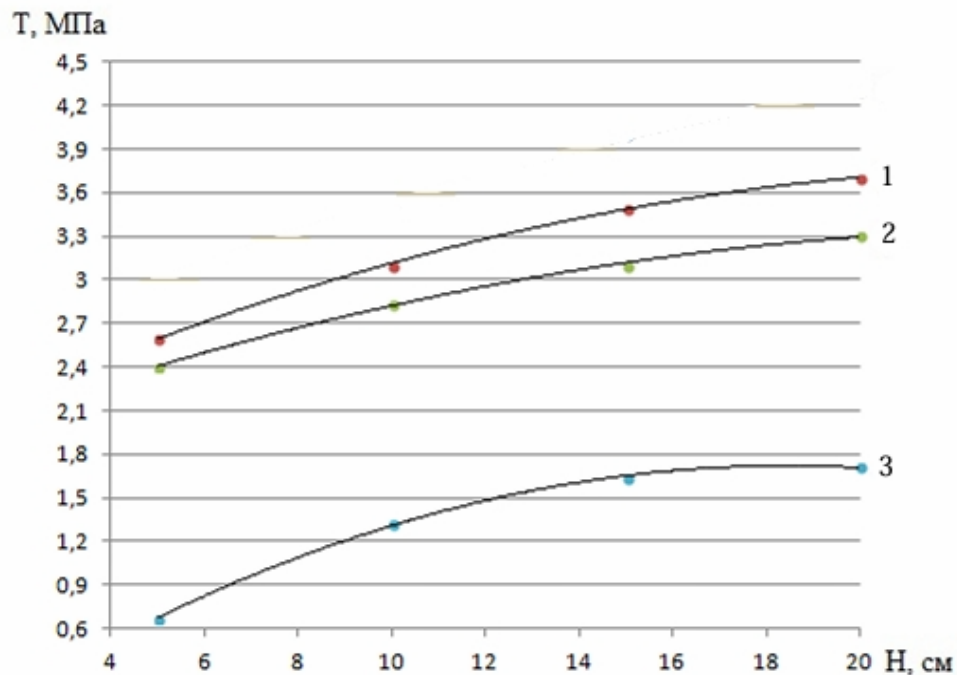


Рисунок 3.12 - Залежність зміни твердості ґрунту T від глибини H . де:

1 – одинарні колеса; 2 – здвоєні колеса; 3 – поза межами колії

Як свідчать отримані результати, рис. 3.12, здвоювання коліс (рис. 3.13) при незмінному тиску повітря у шинах не забезпечує очікуваного значного ефекту (подвійного зниження питомого тиску у контакті шин з ґрунтом). Загалом динаміка взаємодії здвоєних шин з ґрунтом не є простим дублюванням одинарного колеса [240], але ефективність здвоювання коліс в операціях механічного обробітку землі є очевидною з-за збільшення зчеплення шин з опорною поверхнею та, відповідно, реалізації тягових зусиль трактора [241]. Очевидно актуальним є оцінка ефективності зниження тиску повітря у шинах, навантаження на які вдвічі менше, що дозволяє збільшити площу плями контакту (табл. 2.14) та знизити питомий тиск на ґрунт. Проведені заміри плям контакту шин передньої осі (тиск 1,2 бар) та задньої – у колії після передньої з твердістю ґрунту 2,2 МПа (1,0 бар) засвідчили опосередковані значення у 1140 см² та 1010 см², рис.3.14.

Отримані результати загалом співпадають з дослідженням ефективності здвоєння коліс Т 150К проф. Реброва О. Ю. [188], теж щодо діагональних шин мод. «Росава» ИЯВ 794, рис. 2.16.



Рисунок 3.13 – Т 150К
з здвоєними колесами



Рисунок 3.14 – Замір плями
контакту шини Т 150К на ґрунті

Зокрема щодо співставності площ плям контакту шин з опорними поверхнями – з аналізу поданих у [188] даних щодо питомого тиску 163,5 - 175 кПа одинарної шини при навантаженні 2,5 -3 т і тиску 1,1 бар та зниження питомого тиску до 128 -132 кПа при навантаженні на колесо 1,3-1,5 т та тиску повітря в шині 0,6 бар. Для отриманих експериментально значень площі контакту 1010 см² при навантаженні на колесо 2 т і тиску повітря у шині 1,0 бар це відповідає питомому тиску на ґрунт 194 кПа – тут для заднього колеса у ущільненій колії після переднього колеса і, відповідно, дещо меншій площі плями контакту. Разом з тим слід відзначити суттєві розбіжності з результатами теоретичної оцінки площ плями контакту, табл. 2.14, насамперед щодо розрахованих площ плям контакту у зоні низьких тисків повітря у шинв (0,6 бар). Значення коефіцієнтів емпіричної залежності за методикою Е. Дізеренс опрацьовані для радіальних шин і у випадку з оцінкою агроєкологічності трактора Fendt 1038 Vario це забезпечило достатню адекватність теоретичного розрахунку. Плями контакту радіальних і діагональних шин достатньо відчутно відрізняються, рис. 2.12, причому більша власне у радіальних шин. Вітчизняні методики, що однак побічно

враховують тиск повітря у шині та навантаження на колесо через прогностичний розрахунок радіальної деформації шини, є близькими до експериментально отриманих результатів, насамперед в зоні високих значень тиску повітря у шинах (табл.2.14). Для Т 150К появились і радіальні шини вітчизняного виробництва – Росава TR 302, однак протестувати трактор на цих шинах не було змоги.

Поява колісних Т 150К і «Кировец» К 700 на полях у 1980-х р.р. і зумовила актуалізацію проблеми переущільнення земель і агроекологічні дослідження. Однак десятиліттям раніше базовою вантажівкою в аграріїв став вантажний автомобіль ГАЗ 53А (і самоскидні версії) повною масою 7,5-7,7 т, що поступово витісняли менш тонажні (до 4-5т повної маси) ГАЗ 51 / ГАЗ 52. Відчутно менший типорозмір шин цих вантажівок попри комплектацію здвоєними колесами задньої осі зумовлює актуальність агроекологічної оцінки цього автомобіля, що досі використовується у аграрній сфері. Однак практично невідомі відповідні дослідження, хоча повна маса ГАЗ 53А є практично однакова з Т 150К. (Хоча слід зазначити, що у другій половині 1980-х р.р. було розпочато серійне виробництво спеціально спроектованого сільськогосподарського повнопривідного самоскида КАЗ 4540 з причепом ГКБ 8535, як заміни ГАЗ 53А, з односкатною ошиновкою колесами більшого типорозміру 370/80К508). Заміри плями контакту шин передньої осі на твердій бетонній основі та на зволоженому ґрунті (з визначеною пенетрометром твердістю 420 кПа), рис. 3.15, засвідчили значення 420 см^2 та 540 см^2 (навантаження на колесо біля 0,9 т, тиск повітря 3.7 бар) . Відповідно питомий тиск у контакті шин з опорною поверхнею склав 210 та 163 кПа, що суттєво перевищує допустимі значення з умов агроекології (табл. 1.1) і більше у порівнянні з трактором Т 150К. (Автомобіль був у спорядженому стані і відсутність баласту у 4,5 т позбавила змісту заміри щодо здвоєних коліс задньої осі, в шинах якої регламентовано вищий тиск – 5 бар і дещо більше навантаження на одне колесо при повній масі. Це дозволяє прогнозувати і більші значення питомого тиску у контакті).



а)



б)

Рисунок 3.15 – Заміри площі плями контакту шин передньої осі ГАЗ 53А на твердій основі (а) та ґрунтовій поверхні (б)

Якщо брати до уваги ДСТУ 4428 [31] коефіцієнт врахування зовнішнього діаметра шини ГАЗ 53А, що становить 1,3 при діаметрі до 1000 мм та фіксації площі плями контакту на твердій основі, то значення питомого тиску незначно зменшиться – 165 кПа, дуже близьку до отриманого на м'якому ґрунті. Однак і для коліс трактора Т 150К значення цього коефіцієнта становить 1,1 при діаметрі коліс понад 1,5 м та несуттєво змінює значення питомого тиску на ґрунт. Порівняльний аналіз з результатами теоретичної оцінки (табл. 2.16) дозволяє констатувати для даного тиску у шині і навантаження певні відмінностей для обох методик розрахунку, табл. 2.16, однак загалом близькі значення.

Експериментальна оцінка площі плями контакту шин повнопривідного автомобіля КрАЗ 6322 здійснювалась на зволоженому суглинку з твердістю $SI = 610$ кПа в рамках співпраці ВАТ «Укравтобуспром» з НАСВ ім. гетьмана П. Сагайдачного по військовій автотехніці, рис. 3.16.



Рисунок 3.16 – Випробування КрАЗ з шинами 530/70-21 на зволоженому суглинку з твердістю $CI = 610$ кПа

Отримані результати заміру площі плями контакту шини передньої осі автомобіля і навантаженні на колесо 2600 кг та тиску повітря у шині 2,0 бар засвідчили значення $F_k = 1260$ см², що відповідає питомому тиску у контакті з ґрунтом 202 кПа. Ці дані най ближчі до розрахункової оцінки за залежністю др. Е. Дізеренс для низькопрофільних шин, табл. 2.16 та корелює з результатами досліджень д.т.н. Погорілого С.П. [190] щодо оцінки використання шасі КрАЗ 6322 як універсального колісного тягово-транспортного засобу типу «Унімог / Автотрак», рис. 3.17.



а



б

Рисунок 3.17 – Плями контакту шини 530/70-21 при навантаженні 17,1 кН і тиску повітря в шині : а) 0,2 мПа і б) 0,08 мПа на твердій поверхні [190]

При цьому слід зауважити, що оцінка взаємозв'язку тиску повітря у шині і площі плями контакту в роботі здійснювалась на твердій бетонній поверхні, у нашому випадку на зволоженому суглинку з формуванням колії глибиною 8 – 10 см (рис. 3.16). Формально, згідно ДСТУ 4428 [31], визначену на бетонній основі площу плями контакту шини слід для КрАЗ 6322 (рис. 2.9) слід збільшити у 1,1 рази, але фактично на м'якому суглинку вона зростає у 1,5 рази, що відповідно впливає і на значення питомого тиску у контакті шини з опорною поверхнею. Відповідно і отримані для бетонної поверхні залежності зміни площі контакту (рис. 3.18) та питомого тиску на опорну поверхню (рис. 3.19) для бетонної поверхні слід трансформувати з врахуванням твердості /щільності конкретного ґрунту.

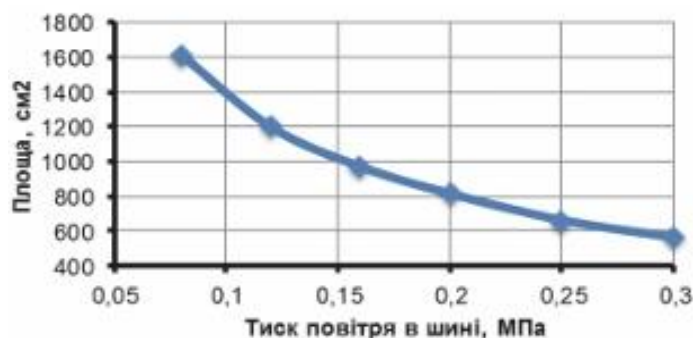


Рисунок 3.18 – Залежність площі плями контакту шини 530/70-21 на бетонній поверхні від тиску повітря у шині [190].

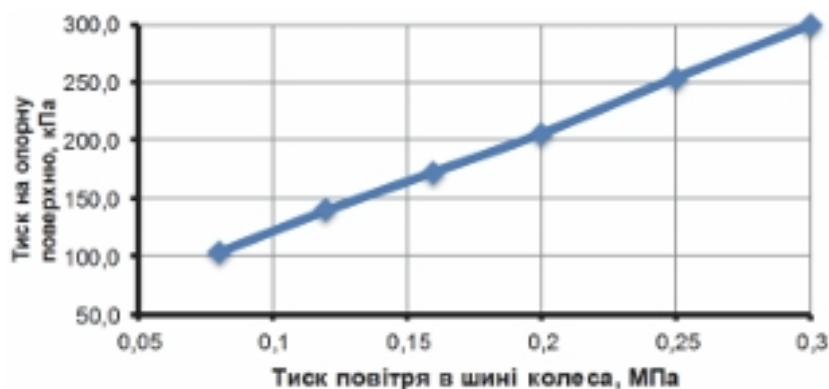


Рисунок 3.19 – Залежність тиску у контактній зоні шини 530/70-21 з твердою опорною поверхнею від тиску повітря у шині [190]

3.3. Практичні рекомендації щодо розвитку національної нормативної бази оцінки МТА з умов агроекології

На фоні розвитку сучасних засобів інструментальної оперативної оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту та зростаючого розповсюдження в аграрному секторі високопродуктивних важких МТА з реаліями переущільнення і деградації орних земель необхідний подальший розвиток і оновлення вітчизняної нормативної бази агроекологічної оцінки, основи якої були сформовані понад 35-40 років тому.

Очевидно доцільно доповнити національні стандарти [29 -31] положеннями щодо оперативної оцінки агроекологічності використання МТА в режимі реального часу під конкретні угіддя з використанням оцінки твердості ґрунту сучасними пенетрометрами з стандартизованим конусним наконечником і введенням таблиці кореляційного зв'язку значень твердості з щільністю та вологістю ґрунту для трьох базових в Україні ґрунто-кліматичних зон.

Вслід за країнами ЄС (і навіть РФ, де це вже зроблено) ввести як національний стандарт ДСТУ – ISO 22476-1 для узаконення уже існуючого в аграрній сфері України сучасних пенетрометрів – твердомірів ґрунту (що необхідно і у військовій сфері та будівництві).

Проведені експериментальні дослідження щодо агроекологічної оцінки 4-х різних моделей колісних тракторів та автомобілів засвідчили необхідність доповнення існуючої вітчизняної нормативної бази (у т.ч. і з огляду гармонізації з нормативними базами країн ЄС), що дозволять враховувати такі реальні чинники, як:

- Різний ефект ущільнення ґрунту при послідовному проходженні коліс передньої та задньої осей трактора.
- Вплив навісного та причіпного устаткування на динаміку перерозподілу навантажень на осі та, відповідно, на характер ущільнення.
- Аналітична оцінка впливу використання коліс різних типорозмірів на передній та задній осях.

- Кумулятивний ефект від кратності проїздів по одній і тій самій ділянці.
- Оцінка появи і заходи по усуненню підорної підшви внаслідок надмірного ущільнення ґрунту під шаром, що піддається механічній обробці.

Очевидна необхідність введення у процес сертифікації / схвалення типу МТА, у т.ч. при імпорті, і оцінки агроекологічності на базі оновлених ДСТУ 4498, 4521 та 4977.

3.4. Висновки по розділу

Проведені експериментальні дослідження на прикладі 4-х зразків різнотипних колісних тракторів і вантажних автомобілів не охопили ще агроекологічної оцінки різних класів комбайнів, причепів і напівпричепів та іншої техніки, що використовується на аграрних угіддях і має вплив на гостру для України проблему деградації плодючих земель.

Проведені експериментальні дослідження 4-х різних зразків колісної техніки засвідчили значну залежність площі плями контакту шин від характеристик ґрунту – твердості та пов'язаних з нею щільністю і вологістю. Існуючі емпіричні залежності розрахунку площі контакту враховують безпосередньо або опосередковано через радіальну деформацію – прогин шини тільки конструктивні параметри колісної машини і шини – типорозмір шини і співвідношення висоти і ширини шини, тиск повітря в шині та вертикальне навантаження на колесо. Необхідне окреме дослідження і взаємозв'язку твердості конкретного типу ґрунту і зміни площі контакту шини, вплив чого може досягати півкратного значення щодо площі контакту шини з твердою поверхнею.

Результати експериментальної оцінки агроекологічності колісних тракторів Fendt 1038 Vario і ХТЗ Т 150К, а також вантажних автомобілів ГАЗ 53А / ГАЗ 3307 та КрАЗ 6322 засвідчили в принципі достатню адекватність опрацьованої методики експрес – оцінки агроекологічності колісних машин на базі заміру твердості ґрунту пенетрометром з стандартизованим конусним індексом СІ.

Проїзд коліс задньої осі у колії коліс передньої осі обумовлює додаткове ущільнення ґрунту у 1,15 – 1,2 рази (залежно від розподілу навантажень на осі та типорозмірів коліс), що не враховано у чинній нормативній базі і потребує внесення відповідних змін.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Зростаюче використання важких високопродуктивних МТА експлуатаційною масою понад 6 т, насамперед у агрохолдингах і великих фермерських господарствах з обробітком більше половини всіх сільськогосподарських угідь України, загострює проблему надмірного ущільнення ґрунту та їхню деградацію, що набуло загальнодержавного значення.

2. Існуюча нормативна база у цій сфері – ДСТУ 4528, ДСТУ 4428, ДСТУ 4977 – опрацьована ще у 1980-х роках, є трудомісткою і базується на використанні лабораторної оцінки щільності та вологості ґрунту та не враховує сучасного розвитку інструментальної бази та розвитку агроекологічної оцінки МТА у країнах ЄС та США.

3. Враховуючи пряму кореляційну залежність між показниками твердості та щільності і вологості ґрунту запропоновано оперативну оцінку фізико-механічних характеристик ґрунту власне на базі замірів твердості з використанням пенетрометрів, виробництво яких налагоджено і в Україні та які набувають зростаючого розповсюдження у аграрному виробництві.

4. Емпірична оцінка твердості ґрунту опрацьована власне на використанні стандартизованого наконечника пенетрометра, закладеного у нормативну базу НАТО (WES – методика), та відповідних значень твердості – так зв. конусного індексу CI (cone index), на базі значень якого у сучасній террамеханіці опрацьовано цілий комплекс оцінки руху колісних і гусеничних машин на опорних поверхнях, що деформуються. Слід зазначити, що використання WES – методики вже набуває реалій у дослідженнях трелювання деревини у лісовому господарстві Фінляндії, Карелії (РФ), Австрії, ФРН і ряді інших країн, а окремі елементи і у нещодавніх дослідженнях у аграрному секторі країн ЄС.

5. Проведені теоретичні та експериментальні (польові) дослідження на прикладі двох моделей важких колісних тракторів - Fendt 1038 Vario і ХТЗ Т150К та вантажних автомобілів ГАЗ 53А і КрАЗ 6322 засвідчили достатню збіжність результатів (у межах 8-14%) оцінки ущільнення ґрунту (тут суглинку) колесами на базі значень конусного індексу твердості СІ та можливість оперативної агроекологічної оцінки МТА для даного стану і умов конкретного поля.

6. Опрацьована методика розрахунку – оцінки питомого тиску у контакті шин, насамперед радіальних, з ґрунтом при відомих параметрах МТА (навантаження на осі) та типорозміру шин і тиску повітря у них для конкретного поля з відомим (заміряним) значенням твердості – конусного індексу СІ та використанням емпіричної залежності розрахунку площі контакту за формулою Dr. E. Diserens, що прийнята в ЄС та враховує діаметр, ширину та тиск повітря у шині та вертикальне навантаження на колесо.

7. Опрацьована методика розрахунку ущільнення ґрунту МТА при різних типорозмірах шин передньої та задньої осі та навантаження на них, а також додаткового ущільнення ґрунту при співпаданні колії руху коліс.

8. Беручи до уваги сучасний розвиток вимірювальної техніки і реалії її розповсюдження в аграрній та військовій сферах України є необхідність прийняття в Україні як ДСТУ – ISO 22476 . Окрім цього експериментальні дослідження та розвиток, внесення змін в існуючу нормативну базу ДСТУ з деталізацією процедури визначення площі плями контакту шини на різних, базових типах ґрунтів з оперативною оцінкою твердості – конусного індексу СІ та відповідними даними щодо гранично допустимих значень тиску у контакті шини з ґрунтом з умов агроекології.

9. Результати дисертаційної роботи, методика агроекологічної оцінки колісної техніки на базі заміру твердості ґрунту та відомих конструктивних параметрах колісних машин впроваджена у практику досліджень Львівської

філії Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для

сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (УкрНДШПВТ ім. Л. Погорілого) та в учбовий процес профільних кафедр університету.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Куценко О.М., Писаренко В.М. Агроєкологія / Київ, Урожай, 1995-254с.
2. Городній М.М., Шикула М.К. та інші. Агроєкологія / Київ, Вища школа, 1993. – 416 с.
3. Медведєв В.В. Екологізація в конструюванні та експлуатації землеробських машинно-тракторних агрегатів / Вісник аграрної науки, № 10, 2012. – С.39-45
4. Bernhardt H. Landwirtschaftliche Transporte. Wo stehen wir und was sind die Herausforderungen / Landshuter Landtechniktag, 31. Januar 2014. -16S.
5. Кашбулганов Р.А., Панасюк А.Н., Липкань А.В. Методика вибору енергетических средств в технологиях растениеводства по экологическим, энергетическим и экономическим критериям / Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства, 2019. № 2(99).- С.139-148.
6. Надикто В.Т. Величко О.В. Прогноз розвитку енергонасиченості сільськогосподарських тракторів / Механізація та електрифікація сільського господарства, 2015, вип..1, - С.146-151
7. Погорелый Л.В. Сельскохозяйственная техника и технологии будущего / Киев, Урожай, 1988. – 176 с.
8. Шалягин В.Н. Комплексное повышение эффективности МТА с энергонасыщенными тракторами / Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1988, № 5.- С.23-25.
9. Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая часть – почва – урожай / Москва, Агропромиздат, 1985. – 304 с.
10. Писаренко В.М., Писаренко П.В., Писаренко В.В. Агроєкологія. Навч. Посібник / Полтава, РВВ ПДАА, 2006. 255с.

11. Geischeder R. Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen. Dissertation Dr. Agrarwissen., TU Muenchen, 2014, - 167 S.
12. Bolling I.H. Bodenverdichtung und Triekraftverhalten bei Reifen – Neue Mess – und Rechenmethoden. Dissertation Dr. Agrarwissen., TU Muenchen, 1987. – 159 S.
13. Прудникова А.Г. Теоретическое обоснование земледельческих технологий экологизации воспроизводства нормативного агрофизического состояния дерново-подзолистых почв в современных системах земледелия. Автореферат дисс. д-ра с.-х. наук, Курск, Всероссийский НИИ земледелия и защиты почв от эрозии, 2005. – 48 с.
14. Froehlich O. K. Druckverteilung im Baugrunde / Springer Verlag, Wien, 1934.- 178 S.
15. Soehne W. Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Raedern sowie bei der Bodenbearbeitung /Grundlagen der Landtechnik, H. 1 (1).1951. –S. 87-94
16. Soehne W. Die Verformbarkeit des Ackerbodens / Grundlagen der Landtechnik, H.2 (3). 1952.– S.51-59
17. Soehne W. Druckverteilung im Boden und Bodenveformung unter Schlepperreifen / Grundlagen der Landtechnik, H.2 (5).1953. – S. 44-52
18. Бабков В.Ф., Бируля А.К., Сиденко В.М. Проходимость колесных машин по грунтам / Автотрансиздат, Москва, 1959. – 326 с.
19. Цытович Н.А. Механика грунтов. Изд. 4 / Госстройиздат, Москва, 1963. – 311 с.
20. Тейлор Д. Основы механики грунтов / Госстройиздат, Москва, 1961.252 с.
21. Терцаги К. Теория механики грунтов / Госстройиздат, Москва, 1961.- 271с.

22. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. Учебник для студентов автомобильно-дорожных вузов / Москва, Высшая школа, 1976. – 328 с.
23. Кувшинов Н.М. Деградация серых лесных почв под действием машинно-тракторных агрегатов и некоторые пути ее устранения / С.30-37
24. ГОСТ СССР 26953-86. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. / Москва, Госстандарт, 1986. 12 с.
25. ГОСТ СССР 26954-86. Техника сельскохозяйственная мобильная. Метод определения максимального нормального напряжения в почве / Москва, Госстандарт, 1986. 8с.
26. ГОСТ СССР 26955-86. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву / Москва, Госстандарт, 1986. 8с.
27. Медведев В.В., Слободюк П.Н. Нормирование допустимых нагрузок ходовых систем МТА на почву / Воздействие движителей на почву. Москва, 1988.- С.57-67
28. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения / Воздействие движителей на почву. Москва, 1988. – С.6-45
29. ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт / Київ, Держспоживстандарт, 2006. 8с.
30. ДСТУ 4977:2008. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем/ Київ, Держспоживстандарт, 2008. 10с.
31. ДСТУ 4428:2005. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт / Київ, Держспоживстандарт. 2005. 10 с.
32. Ребров О.Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України / Вісник НТУ «ХП». Серія

«Математичне моделювання в техніці та технологіях», № 27, 2018. Харків – С.110-116.

33. Ребров О.Ю. Інтегральна ймовірнісна оцінка відповідності тракторної шини агроекологічним вимогам в ґрунто-кліматичних умовах України / Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях», № 26, 2017, Харків – С. 127-136.

34. Шкарівський Г.В., Присяжний В.Г., Погорілий С.П. Дослідження техногенного впливу параметрів ходової частини колісних тракторів ХТЗ на ґрунт / Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 97. 2013. – С. 90 – 97.

35. Білецький В.Р. Переуцільнення ґрунту рушіями мобільної сільськогосподарської техніки. /Житомир, вид. ДААУ, 2000. – 43 с.

36. Слюсаренко В.В. Механико-технологическое совершенствование двигателей энергонасыщенных сельскохозяйственных тракторов и их влияние на агроэкологическое состояние почвы и ее продуктивность. Дисс. .. д-ра техн.. наук. Саратовский сель.-хоз. ин-т. 2000. 484 с.

37. Русинов А.В. Улучшение агротехнической проходимости энергонасыщенных сельскохозяйственных тракторов путем оптимизации параметров ходовой системы. Дисс. д-ра техн. наук, Саратов сель-хоз. ин-т, 2001. 452 с.

38. Водяник И.И. Воздействие ходовых систем на почву. / Москва. ВО Агромиздат. 1990. 176 с.

39. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв двигателями и эффективные пути ее решения / Москва, ВИМ. 1998. – 368 с.

40. ДСТУ ISO 10573-2001. Якість ґрунту. Визначення вмісту води в не-насиченій зоні. Методи глибинного зонда. (ISO 10573:1995, IDT). Київ, Держспоживстандарт, 2001. 19 с.

41. ДСТУ ISO 11461-2004. Якість ґрунту. Визначення вмісту води в ґрунті як частки за об'ємом із застосуванням керновирізувальних трубок.

Гравіметричний метод. (ISO 11461:2001)./ Київ, Держспоживстандарт, 2004. 10 с.

42. ДСТУ ISO 16586 -2005. Якість ґрунту. Визначення об'ємної вологості ґрунту за відомою щільністю складення на суху масу. Гравіметричний метод (ISO 16586 : 2003. IDT) / Київ, Держспоживстандарт, 2005. 10 с.

43. EOSDA Crop Monitoring [Електронний ресурс] Режим доступу: [https:// eos.com /uk/blog/volohist-gruntu](https://eos.com/uk/blog/volohist-gruntu)

44. ДСТУ 4362:2004. Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів. / Київ, Держспоживстандарт, 2004. 12 с.

45. ДСТУ 4745:2007. Якість ґрунту. Визначення щільності твердої фази пікнометричним методом / Київ, Держспоживстандарт, 2007. 12 с.

46. ДСТУ Б В.2.1-21:2009. Ґрунти. Визначення щільності ґрунтів методом заміщення об'єму. / Київ, Держспоживстандарт, 2009. 10с.

47. LFG – малогабаритний вимірювач щільності ґрунту – HLR [Електронний ресурс] Режим доступу : [https: // industry.hlr.ua / bulding-materials-testing/ control-rfzestva-story-place/lfg](https://industry.hlr.ua/bulding-materials-testing/control-rfzestva-story-place/lfg)

48. Wong Y.J. Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. / Butterworth. London. 2010.- 482 p.

49. Грубель М.Г., Крайник Л.В. Прохідність військових автомобілів. Монографія / Київ, Професіонал, 2023. - 182 с.

50. ДСТУ 5096:2008. Якість ґрунту. Визначення твердості ґрунту твердоміром Ревякіна. Київ. Держспоживстандарт.2008. 8 с.

51..Комісар Є.О., Зубко В.М. Твердість ґрунту – огляд сучасних методів та пристроїв / Вісник Сумського НАУ. Серія „Механізація та автоматизація виробничих процесів”. Випуск 4 (42), 2020. – С.26-31.

52. Край землі – українські твердоміри заглибились в щільні ґрунти Австралії [Електронний ресурс] Режим доступу: [http:// agroday.com.ua/2018/04/27/ tochne – popadannya – ukrainski – prylady – tochno – zemlu- popaly-v- avstraliyu](http://agroday.com.ua/2018/04/27/tochne-popadannya-ukrainski-prylady-tochno-zemlu-popaly-v-avstraliyu)

53. Виробництво пенетрометрів [Електронний ресурс] Режим доступу: [https:// Datafield.com.ua](https://Datafield.com.ua)
54. Іванишин В.В., Рудь А.В., Мошенко І.О. Визначення переущільнення ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України / Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Вип.. 27, 2017, Подільський ДАТУ. – С. 146 -158.
55. Richter R., Hoffmann B. Probleme des Einsatzes von Fahrzeugen auf landwirtschaftlich genutzten Boden / Agrartechnik 31 (9).1981. – S.419-421.
56. Raghaven G.S., Mc Kyes E., Chasse M. Effects of wheel slip on soil compaction / Journal Agricult. Engineering, 22. 1977. – pp. 79-83.
57. Sommer C., Petelkau H. Bodenverdichtung. / Landtechnik 45 (11), 1990. – S. 404 – 406.
58. Bolling I.H., Soehne W. Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge / Landtechnik 37 (2), 1982. – S. 54-57.
59. Bundesgesetz zum Schutz vor schaedlicher Bodenveraenderungen und zur Sanierung von Altlasten. / Bundesgetzblatt. 1998, 502 FNA 2129-32, geaendert durch Art. 3G vom 09/12/2004.
60. Закон України. Про охорону землі. № 962- IV від 19.06.2009.
61. Закон України. Про державний контроль за використанням та охороною землі № 963 – IV від 19. 06.2009.
- 62.. DIN 19682 – 1-10. Bodenuntersuchungsverfahren in Landwirtschaftlichen Wasserbau- Felduntersuchungen. Telen 1 -10. 1998. Verlag Beuth, Berlin
63. DIN 19863 – 1-9. Bodenuntersuchungsverfahren in Landwirtschaftlichen Wasserbau – Physikalische Laboruntersuchungen. Teile 1-9. 1998. Verlag Beuth, Berlin.
64. DIN 19688. Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Boden. 2001. Verlag Beuth. Berlin
65. DIN 11272. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockendichte. 2001. Verlag Beuth. Berlin

66. VDI- Richtlinie 6101. Maschineneinsatz unter Beruecksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Boeden. VDI Verlag. Duesseldorf. 2007. – S. 32 – 39.

67. Tijink F.G.J., Spoor G. Technische Leitlinien zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtung / Zuckerindustrie 129/9. 2004/ - S.647 – 652.

68. Frielinghaus D., Petelkau H., Seidel K. Schadverdichtungen in Ackerboeden – Entstehung, Folgen, Gegenmassnahmen / 14. Wissen. Fachtagung Landwirtschaftliche Fakultaet der Universitaet Bonn, 5. Dezember 2001. 88 S.

69. Chamen W.C.T. et al., Preventiob strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part.2: Equipment and field practices / Soil Till. Resume. 47, 2003 pp.161-174.

70. Tiijink F.G.J., van der Linden J.P. Engineering approaches to prevent subsoil compaction in cropping systems with sugar beet / Advances in Geocology, 32. 2000. – pp.442-452

71. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.

72. Антипчук Б.О. Сучасні вимірювачі щільності ґрунту: їх огляд та дослідження застосування ультразвуку для оперативного визначення переущільненої ділянки поля, яке обробляється / Вісник Сумського НАУ, вип.. 4 (46), 2021 – с.3-11

73. Зубко В.М., Комісар С.О., Нунек Р., Шелест М.С. і інші. Твердість ґрунту – опис сучасних методів та пристроїв / [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https: // www. tsatu.edu.ua](https://www.tsatu.edu.ua) >tstt>wp=content>uploads>sites>zubko 2021

74. Saarlahti M., Antilla T/ Rut depth model for timber transport on moraine soils. / Proceedings of the 13 ISVTS Conference, September 1999, Munich, Germany.- pp. 29-37

75. Saarlahti M. Soil interaction model / Univercity of Helsinki, Departament of forest resource management, Np.QLK5-1999-00991. 2002. 86 p.

76. Marusiak M., Neruda J. Dynamic soil pressures Caused by travelling forest machines / Croat. Journal Forest. Engineering 39, 2018. Pp. 233-245

77. Хитров Е.Г., Хахина А.М., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И. Расчет тягово-сцепных свойств колесных лесных машин с использованием WES – метода / Лесотехнический журнал, № 3, 2016. – С.196 – 202.

78. Хахина А.М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин. Дисс... д-ра техн. наук : 05.21.01, Санкт-Петербург, 2017. 432 с.

79. Ребров О.Ю., Кальченко Б.І., Макаров В.А., Якунін М.С., Бучко І.Г., Реброва О.М., Артюшенко О.В., Леленко О.М. Оціночний аналіз дії на ґрунт ходових систем колісних сільськогосподарських тракторів / Вісник НТУ «ХПІ». Серія Автомобіле- та тракторобудування, № 1, 2022. – С. 36 – 43

80. Ребров О.Ю. Наукове обґрунтування підвищення ефективності колісних рушіїв сільськогосподарських тракторів на енергоємних технологічних операціях обробітку ґрунту. Дис....д-р техн.. наук: 05.22.02. Харків, НТУ «ХПІ», 2021. 423 с.

81. Ребров О.Ю. Теоретичне обґрунтування основних параметрів колісних сільськогосподарських тракторів / Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів, № 8, 2017. – С. 243 – 254

82. Гуськов В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов. Выбор и обоснование некоторых параметров / Москва, Машиностроение, 1966. 196 с.

83. Ксенович И.П., Солонский А.С., Войчинский С.М. Проектирование универсально-пропашных тракторов . Минск, Наука и техника. 1980. 320с.

86. Зезетко Н.И. Эксплуатационная и конструктивная массы проектируемого колесного трактора 4К4 / Вестник Белорусско-Российского университета № 2 (43), 2014. – С.26-36.

84. Ким Ю.А., Зеленый П.В., Франкевич И.В. Влияние конструктивных параметров колесных движителей на изменение физико-механических свойств

почвогрунта и тяговые качества трактора / Вестник Белорусско-Российского университета, № 4 (21). 2018. – С. 34 – 42

85 Ребров О.Ю. Вибір параметрів шин сільськогосподарських тракторів. Монографія. Харків, вид. О.А. Мірошніченко, 2021. 304 с.

87. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет. Под ред.. Ксеновича И.П. / Москва, Машиностроение,, 1991. 514 с.

88. Колобов Г.Г., Парфенов А.П. Тяговые характеристики тракторов. Москва, Машиностроение,, 1972. 151 с.

89. Гуськов В.В., Ксенович И.П., Атаманов Ю.Е. Тракторы : теория. / Москва, Машиностроение, 1988. 376 с.

90. Самсонов В.А. Численные методъ в теории трактора / Тракторъ и сельскохозяйственныѣ машинь. ч.1. № 10, 2004.- С.8-11; ч.2. № 8. 2005. – С. 12-14. ч.3. № 9.2005. – С.9-12, ч.4. № 11. 2005. – С. 13-16, ч.5. № 4. 2006.- С.16-19, ч.6. № 8.2006. – С. 14-17

91. Пукаров А.М. Методика расчета эксплуатационной массы трактора по ограничению воздействия на почву / Тракторы и сельхозмашины, № 2, 1988. – С.12-15.

92. Кононов А.М. Исследование реализации тягово-скоростных свойств и агротехнической проходимости колесных тракторов на суглинистых почвах Белоруссии. Автореф. дисс....д-ра техн. наук. Горки, 1974 – 41 с.

93. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. 2-е изд., доп. И перераб. Москва, Машиностроение, 1990. 352 с.

94. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. Москва. Машиностроение, 1981. 230 с.

95. Ляско М.И. Уплотняющее воздействие сельскохозяйственных тракторов и машин на почву и методы его оценки / Тракторы и сельхозмашины , № 10, 1982. – С.7 - 11.

96. Кравченко В.И., Кулаков Я.А. Сопротивление обработке уплотненного движителем К-701 серозема/ Механизация и электрификация сельского хозяйства, № 5, 1983. Минск – С.16-17.

97. Слободюк П.І., Чернова М.С., Дунай М.Ф. та інш. Зміна фізичних властивостей ґрунту під дією ходових систем тракторів / Вісник сільськогосподарської науки, № 2, 1978. Київ. Урожай – С.12-18.

98. Уткин-Любовцов О.Л., Кутин Л.Н., Шабаров А.А., Ляско М.И. Оценка сдваивания колес тракторов классов 30 и 50 кН по некоторым показателям

99. Русанов В.А., Небогин И.С., Фиронов Н.Н. Изменение затрат энергии на обработку почв при ее уплотнении различными ходовыми системами / Труды ВИМ, т. 91. 1981. – С. 69-78.

100. Гапоненко В.С. О путях снижения уплотняющего воздействия машинно-тракторных агрегатов на почву / Труды Почвенного института им.В.В. Докучаева. Влияние сельскохозяйственной техники на почву. 1981. – С.56-61.

101. Рудельсон В.Г., Красний Ф.Л., Прокопець Є.А. та інш. Досвід створення тракторного пневмогусеничного рушія з низьким тиском на ґрунт / Праці УСГА Вдосконалення організації і технології ремонту сільськогосподарських машин. Київ, 1982. – С.114-116.

102. Щитов С.В. Пути повышения агротехнической проходимости колесных тракторов в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур Дальнего востока / Автореф. дисс. д.т.н. по спец. 05.20.01, Благовещенск, 2009. 46 с.

103. Гуськов А.В. Сравнение тягово-скоростных свойств колесных тракторов класса 5,0 со всеми ведущими колесами, выполненных по схеме 4К4 и 6К6 / Вестник Белорусско-Российского университета, № 2 (23), 2009. – С.24-35.

104. Надикто В.Т. Проблеми баластування колісних тракторів / Техніка і технології АПК, № 2. 2013. – С.7-9

105. Філоненко О.Р., Кувачов В.П. Потенційні можливості баластування колісного трактора / Зб. матеріалів IV Всеукраїнської НТІК студентів та магістрантів за підсумками наукових досліджень 2016 року «Проблеми

механізації та електрифікації технологічних процесів», Таврійський ДАТУ, Херсон, 2017. – С.107-109.

106. Кувачов В.П., Мітков В.Б., Аюбов А.М., Шульга О.В. Потенційні можливості баластування колісного трактора за умовою екофільності шини в залежності від тиску повітря в неї / Науковий вісник ТДАТУ, вип..6, т.3. 2016. – С.26-32.

107. Білецький В.Р. Обґрунтування параметрів колісних рушіїв машинно-тракторних агрегатів на основі взаємодії з ґрунтовим середовищем. Дис. ...к.т.н. за спец. 05.05.11. Львівський ДАУ, 2006. – 167с.

108. Балака М.М. Методика розрахунку і побудови тягової характеристики окремого колеса з пневматичною шиною / Вестник ХНАДУ, вип.. 73, 2016. – С. 87 – 91.

109. Балака М.М., Пелевін Л.Є., Аржаєв Г.О., Василенко А.В. Експериментальні дослідження роботи колеса з пневматичною шиною на опорній поверхні, що деформується / Науковий вісник Херсонської держ. морської академії, № 1 (8), 2013. – С.132-139.

110. Лисий О.О. Методика досліджень та її реалізація з визначення напружень у ґрунтовому середовищі від рушіїв машинно-тракторних агрегатів / Механізація та електрифікація сільського господарства, вип.. 97, 2013. – С.149-153.

111. Адамчук В.В., Погорілий С.П., Черняк Р.Є., Дунь С.В. Шляхи зниження впливу ходових систем сільськогосподарських агрегатів на базі автомобільного шасі на ґрунт / Інженерія природокористування № 1 (7), 2017. – С. 11-15.

112. Адамчук В.В., Погорілий С.П. Використання автомобільного шасі на внесення добрив / Зб. наук. праць УкрНДІПВТ ім.. Л.Погорілого «Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України», вип.. 20 (34). 2016. Дослідницьке. – С.62-70.

113. Дзоценидзе Т.Д., Левшин А.Г., Евтушенко Н.Е., Козловская М.А., Мягков А.Е. Функциональное назначение автомобилей для сельского хозяйства / Тракторы и сельхозмашины, № 4, 2012. – С.8-11.
114. Елисеев В.Г., Лабодаев В.Д., Черноморец Н.А. Использование
115. Болдовський В.Н. Оцінка впливу рушіїв колісних тяглових транспортних засобів на ґрунт. Дис...канд. техн. наук. по спец. 05.22.02, ХНАДУ, Харків, 2011. – 171 с.
116. Ковбаса В.П. Механіка взаємодії робочих органів з ґрунтом. Монографія. Київ – Ніжин, Вид. ПП Лисенко М.М., 2016. 300с.
117. Ковбаса В.П. Механо-технологічне обґрунтування оптимізації взаємодії робочих органів з ґрунтом. Дис... д.т.н. спец. 05.22.11
118. Артьомов М.П. Вплив зміни вертикальних прискорень машинно-тракторних агрегатів на ущільнення ґрунту при виконанні агротехнічних операцій / Інженерія природокористування, № 2 (8), 2017. – С. 90-95
119. Бідило М.І., Пашенко В.Ф., Ульянченко О.В. Економіко-екологічні засади формування та використання машинно-тракторного парку : монографія / ХНАУ ім. В.В. Докучаєва, Харків. 2010. 209 с.
120. Smith D.L., Dickson J.W. Contributions to vehicle weight and ground pressure to soil compaction / Journal of Agricultural Engineering Research, 46, 1990. – pp.13-29.
121. Kuehner S. Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschaetzung der dadurch induzierten Bodenbelastungen. Dissert. / Schriftenreihe des Institutes fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde der CAU zu Kiel. Band 39. 1997. 168 S.
122. Horn R. Die Verformung von Boden – Ursachen und Folgen fuer eine nachhaltige Landnutzung / 14. Wissenschaftl. Fachtagung der Landwirtschaftlichen Fakultaeet der Universitaet Bonn. 2002. S.75-79.
123. Tijink K.G., Doell H., Vermeulen G. D. Towards managment of soil comparation, technical and economical ground pressure / Proc. Of the 2h Int.

Coonf. "Protection of Soil Enviroment by Adoiance of Compaction & Proper Soil Tillage", August 1993, Melitopol, Ukraine.

124. Czeratzki W. Die Ansprueche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand / Landbauforschung Voelkenrode 22 (1), 1972. – S. 29-36.

125. Petelkau H., Seidel H. Rompreelibilitaet von Bodenproben unterschiedlicher Substrate bei stufenweiser uniaxialer Belastung in Abhaengigkeit vom Wassergehalt / Bodenkunde 26 (6), 1982. – S.389-393.

126. Sommer C. Bodenschonende und Bodenschuetzende Pflanzenproduktion – dargestellt an Beispielen der Bodenbearbeitung / Landtechnik 41, Heft 9.1986.- S. 236-243.

127. Diserens E. Ermittlung der Reifen-Kontaktflaechen im Feld mittels Rechenmodell / FAT Berichte, Nr. 613, 2002. Schweiz. – S. 1-16.

128. Eckert H., Breitschuh G., Sauerbeck D. Kriterien umweltvertraeglicher Landberschaftung – ein Verfahren zur oekologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben / Agrobiol, Res.52, 1999. – S.57-76.

129. DVWK Merkblatt 234. Bodenverdichtung – Grundlagen fuer eine nachhaltige Landbewirtschaftung aus bodenkundlichen Sicht / Komis. Verbandvertrieb GmbH, Bonn. 1998. -48 S.

130. Stahl H., Marschall K., Goetze H. Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. Schriftenreihe der Saechsische Landesanstetlle fuer Landwirtschaft. Heft 15. Leipzig. 2005. 132 S.

131. Koolen A.J., Kupers H. Agricultural Soil Mechanics. 2. Ed.,/ Springer-Verlag, Berln Heidelberg-New York-Tokyo. 2012. 262 p.

132. Медведєв В.В. Плотность сложения почв / Медведєв В.В., Лындина Т.Е., Лактионова Т.Н.// 13 типографія, Харків. 2004. – 243с.

133. Карташов С.Г., Городецький Е.Ю., Дудка В.С., Москалюк А.А. Вплив оптимальної щільності ґрунту для різних сільськогосподарських культур на врожайність // Таврійський науковий вісник, № 78, 2018. – С. 21-26

134. Ребров О. Ю. Аналіз розподілу сільськогосподарських угідь України за питомим опором ґрунту при оранці / О. Ю. Ребров // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – № 3. – С. 51–56.

135. Brunotte J., Brandhuber R., Vorderbruegge R., Schrader S. Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. 3. Vorsorge gegen Bodenverdichtungen. / Bundesanstalt fuer Landwirtschaft und Ernährung. Berlin, 2018. - 62 S.

136. Krainyk L. V., Syvulka P. M., Khudaverdian H. A., Gabriel Y. I. Agricultural transport – the type and structure formation of the wheeled vehicles fleet в міжнародному журналі ТЕКА. Quarterly journal of agri-food industry – 2021, Vol. 21, No. 1, 51-58 pp.

137. Сивулька П. Порівняльний аналіз методик агроекологічної оцінки МТА в Україні/снд та країнах ЄС // Вісник ЛНУП «Агроінженерні дослідження», № 28, 2024. –С. 218-226. <https://>

138. Медведев В.В., Лактионова Т.Н. Почвенно-технологическое районирование пахотных земель Украины / Харків, вид. «13 типографія», 2007. 395 с.

139. Медведев В.В. Физические свойства и обработка почв в Украине / Харків, «Городская типография», 2013. 224 с.

140. Ребров О.Ю. Аналіз відповідності максимального тиску на ґрунт тракторної шини агроекологічним вимогам ймовірностним методом з урахуванням ґрунто-кліматичних умов України / Вісник НТУ «ХП». Серія: Транспортне машинобудування, 2017- № 14 (1236) – С.58-64.

141. Ребров О.Ю. Баластування сільськогосподарських агроекологічних норм дії на ґрунт та здвоєння тракторів шин за колісних умов виконання / Вісник НТУ «ХП». Серія Автомобіле- та тракторобудування №2, 2022 – с. 98-107 doi: 10.20998/2078-6840.2022.2.11

142. Медведев, В.В. Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій технічних засобів з його обробітку/ Вісник аграрної науки, 2010. № 4. С.14-18.

143. Цизь, І.Є., Голій, В.О. Результати дослідження твердості ґрунту полів ДПЕДГ «Еліта» / *Сільськогосподарські машини*. 2024. № 50. С. 25-36
144. Стиранівський О.А., Стиранівський Ю.О. Показники екологічної сприйнятливості трелювання деревини / *Науковий вісник НЛТУ*, 2007, вип. 17.4. Львів – С. 83-90
145. Грубель М.Г., Крайник Л.В., Купріненко О.М. Методологія оцінки опорної прохідності колісної військової автомобільної техніки // *Науково-технічний журнал «Озброєння та військова техніка»*. — № 4(24). ЦНДІ ОВТ МОУ. Київ, 2019. — С. 22-35
146. Л. В. Крайник, П. М. Сивулька, О.М. Сукач . Конусний індекс СІ (cone index) – базовий показник оцінки руху машин на ґрунтових поверхнях / Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту –2025»: Збірник тез. [Електронне видання] – Вінниця: ВНТУ. – 2025.– С.272-273. (PDF) ISBN 978-617-8163-51-8
147. Rohani, B. and Baladi, G. Y. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. US Army Corps of Engineers, US Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi: US Army, 1981. Miscellaneous Paper SL81-4, available at: <https://www.citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1029.7249&rep=rep1&type=pdf>.
148. Л.В. Крайник, П.М. Сивулька Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів у сільському господарстві: проблемні питання та сучасні підходи удосконалення // 2025 • № 4 • Агроекологічний журнал, № 4, 2025. НААН України, - С. 205-212
149. Крайник Л., Сивулька П. Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів на базі WES-методики / *Вісник ЛНУП «Агроінженерні дослідження»*, № 29, 2025. –С. 48-56.
150. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Кувачов В.П., Головач І.В., Ігнат'єв Є.І., Черниш О.М. Дослідження властивостей постійної технологічної колії,

яку використовують при мостовому землеробстві/ Вісник аграрної науки 2020, №8 (809). С. 63-68.DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-08>

151. . Кушнарєв А.С. Мониторинг плотности почвы пахотного горизонта в системе точного (управляемого) земледелия / Кушнарєв А.С., Кравчук В.И., Кушнарєв С.А., Дюжаєв В.П. // Техніка і технології АПК. – 2010. – №9(12). – С. 12 – 16.

152. Надикто В.Т. Обґрунтування методу апроксимації експериментальних даних / Вісник аграрної науки 2024, № 9 (858). С.38- 44 DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202409-05>

.153. Kumar A., Chen Y., Sadek M.A.A. et al. Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. Research in Agricultural Engineering: CIGR J. 2012. V. 14. Is. 1. P. 26 – 37.

154. Sayedahmed A. Modeling and Correlation of Soil Cone Index for Bulk Density, Moisture Content and Penetration Depth Levels in a Sandy Loam Soil. J. of Soil Sciences and Agricultural Engineering. 2015. V. 6. Is. 2. P. 259 – 273

155. Погромська Я.А. Динаміка гетерогенності агрофізичної якості чорнозему звичайного у межах сільськогосподарського поля. Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. збірник. 2023. Вип. 94. Харків: ННЦ “ІА ім. О.Н. Соколовського”. С. 39-53.. <https://doi.org/10.31073/acss94-05>.

156. Черячукін М.І., Григор’єва О.М. Ефективність прямої сівби на чорноземі звичайному важкосуглинковому правобережного степу / Вісник аграрної науки 2019, №10 (799). – С.5-11 DOI: <https://doi.org/20.31073/agrovisnyk201910-0>

157. Лебедев С., Коробко А., Лебедев А., Шуляк М. Технологічна адаптація тракторів загального призначення до природних умов ґрунтообробки / Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України, 2023, т.2, № 33 (47). С. 57-67 [https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33\(47\)-5](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33(47)-5)

158. Кальченко Б.І., Ребров О.Ю., Кожушко А.П., Мамонтов А.Г., Якунін М.Є.

Динаміка руху колісних тракторів Харків, Вид. В.А. Мірошніченко, 2021. 320 с.

159. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Москва, Машиностроение, 1972. – 184 с.

160. Шини пневматичні для сільськогосподарських транспортних засобів та причепів до них. Загальні технічні умови [Текст]. - На заміну ДСТУ 4140:2002/ГОСТ 7463-2003 ; Чинний від 2021-06-01. - Київ : УкрНДНЦ, 2021. - III, 14 с. : табл. (Національний стандарт України). - Бібліогр.: с. 14.

161. Бойков В П Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин / В П Бойков В Н Белковский. – Москва : Агропромиздат, 1988. – 240 с.

162. Надикто В.Т. Проблеми баластування колісних тракторів / Техніка і технології в АПК, № 2, 2013. – С. 7 – 9

163. Липкань А. В. Обоснование выбора способа определения параметров пятна контакта пневмоколесного движителя с опорным основанием / А. В. Липкань, А. Н. Панасюк, Р. А. Кашбулгаянов // Бюллетень науки и практики. – 2019. Т. 5. – №6. – С. 212-228

164. Продан М. О теоретической основе уплотнения почв ходовыми системами машин / Москва: Высшая школа, 2003. – 258 с.

165. Гуреев И. И. Экологическая безопасность комплексной механизации агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 5. С. 62–64.

166. Steiner M. Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik (MEG) 33 (1979). Dissertation, Muenchen.–178 S.

167. Bolling I. Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 133 (1987). Dissertation, Muenchen. – 174 S.

168. Schwanghart, H. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. Proc. 10th ISTVS Conf, Kobe Aug 20-24, 1990. Vol.I: p.193-204.
169. Komandi, G. Establishment of soil-mechanical parameters which determine traction on deforming soil./ Journal of Terramechanics 27(2),1990.p. 115-124.
170. Marusiak M., Neruda J. Dynamic Soil Pressures Caused by Travelling Forest Machines. / Croatishe Journal Forest. Engineering, No.39, 2018. p. 233-245.
171. Ziesak, M. & Matthies, D. Untersuchungen zur last- und innendruckabhängigen Aufstandsfläche von Forstspezialreifen./ KWF, Forsttechnische Informationen, FTI (9+10). 2001. S. 104-110.
172. Martina Just. Bodenverdichtung und physikalischer Bodenschutz - Bodenverdichtung in der Landwirtschaft (eBook) Ursachen, Folgen für die Bodenfunktionen, Prävention und Sanierung. 2008 | 1. Auflage. GRIN Verlag 978-3-638-02868-4 (ISBN)
173. Moitzi G. Bodenverdichtung im Pflanzenbau / Biogas Spezialberaterfortbildung 14.10.2010.Unversitaet fuer Bodenkultur .Wien.46 S.
174. Kutzbach H-D., Boettinger S. Reifen- Reifen/Boden – Verhalten /Jahrbuch Agrartechnik. 2014, S. 1-12 <http://digibib.tu-bs.de/?docid=00055050>
175. Koolen A.J., Kupers H. Agricultural Soil Mechanics.2 ed.,/ Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo. 2012. 262 p.
176. Бешун О.А., Ачкевич В.І., Меланченко Я.Д., Шеремет Д.О. Аналіз існуючих моделей взаємодії колеса з опорною поверхнею./ Machinery&Energetics (Техніка та енергетика), № 282, НУБІП, Київ, 2018. – С.395-404.
177. . Сивулька , П., Сукач , О. Оцінка площі плями контакту шини на ґрунтових поверхнях / Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, №1(24), ЛНТУ, Луцьк, 2025. - С.399-408. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1747>

178. Silversides, C. R. & Sundberg, U. Operational efficiency in forestry. Vol 2. Practice. Kluwer Academic Publishers, Dortrecht / Boston / London. 169 p. ISBN 0-7923-0063.

179. Schwieger H. Untersuchung neuartiger Laufwerke und lasergestuezte Erfassung der Reifen-/Bodenformung / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 181 (1996). Dissertation, Kiel. – 162 S.

180. Denker, S. (2011). Landtechnische Methoden zur Erfassung von Bodenverdichtungen. [Doctoral dissertation, Georg-August Universitaet, Goettingen, BRD]. PQDT Open <http://dx.doi.org/10.53846/goediss1874>.

181. Śliczniak, T.; Pytko, J.; Gardyński, Leszek Czajka, Aleksander; Tarkowski, S.: Determination of the tractive forces of a tractor based on the reconstruction of tire-soil contact surface obtained by means of photogrammetry. 16th European-African Regional Conference of the ISTVS (2023), 11.-13.10.2023, Lublin, Polen. In: Pytko, J.; Tomilo, P.; Martelli, M. (Hrsg.): Proceedings of the 16th European-African Regional Conference of the ISTVS, Lublin 2023, S. 114-120.

182. Diserens, E.; Battiato, A. and Sartori, L.: Soil compaction, soil shearing and fuel consumption: TASC V3.0 – A practical tool for decision-making in farming./ *Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering*, Zürich, 06.-10.07.2014

183. Diserens, E., Spiess, E. TASC – eine PC-Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. / *Agrarforschung* 2005. H. 12 (1). S. 22–29

184. Inns F.M., Kilgour J., 1978. Agricultural tyres. London, Dunlop, 69 p

185. B.D. Soane, P.S. Blackwell, J.W. Dickson, D.J. Painter Compaction by agricultural vehicles: A review I. Soil and wheel characteristics / *Soil and Tillage Research* Volume 1, 1980-1981, Pages 207-237 <https://www.science-direct.com/science/article/abs/pii/0167198780900264>

186. Голотюк М.В., Налобіна О.О., Бундза О.З. Аналіз впливу елементів рушія важких тракторів на величину тиску на ґрунт / Сучасні технології в

машинобудуванні та транспорті, 2(24), ЛНТУ, Луцьк, 2025, №2 (25) - с.131-139

187. В. Р. Білецький, В. О. Шубенко, І. С. Томашевський Теоретичне обґрунтування стану ґрунту під колісним рушієм машинно-тракторного агрегату \ Вісник ЖНАЕУ. – 2014. – № 1 (39), т. 1. – С. 176-186.
<http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/848>

188. Ребров О.Ю. Аналіз ефективності здвоювання тракторних шин / Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки Том 30 (69) Ч. 2 № 5 2019 – с. 19-22

189. Якунін М. Є. Обґрунтування раціональних параметрів і режимів навантаження пневматичних шин колісних тракторів сільськогосподарського призначення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 – Галузеве машинобудування (13 – Механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2023. 184 с.

190. Погорілий С. П. «Механіко-технологічні основи створення мобільних енергетичних засобів типу «Автотрактор». – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» Національної академії аграрних наук України, Глеваха, 2020. 353 с.

191. Bodenverdichtung im Pflanzenbau Allgemeine Problematik Vereinfachte Grundlagen Situation und Vermeidungsstrategien Zusammenfassung Biogas Spezialberaterfortbildung Universität für Bodenkultur Wien. Department für Nachhaltige Agrarsysteme 14. Dezember 2010. 46 S.

192. Michael Gysi, Fred Grunder, Zusammenhang zwischen Kontaktfläche und Pneuinnendruck / Agrarforschung 6 (1) , 1999 – S. 9-12

193. Uppenkamp N., Volk L., Weissbach M. Massnahmen zur Optimierung der Traktion / DLG – Merkblatt 461, Frankfurt am Main, 2020 - 34 S.

194. Freitag D.R. A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on clay. /Journal of Terramechanics, 1966; No3. pp.51–68.

195. Rowland, D., 1975. A review of vehicle design for soft ground operation. In: Proc. of the 5th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, Detroit-Houghton, Michigan, U.S.A., Vol. I, pp. 179-219.

196. Іванюк В., Іванюк Г. Вплив неоднорідності ґрунтового покриття і сільськогосподарських культур на твердість ґрунту. Вісник Львівського національного аграрного університету: Агрономія. 2020. № 24. С. 33-37 doi: 10.31734/agronomy2020.01.033

197. Потенційні можливості баластування колісного трактора за умовою екофільності шини в залежності від тиску повітря в ній / В. П. Кувачов, В. Б. Мітков, А. М. Аюбов, О. В. Шульга // Науковий вісник ТДАТУ. – 2016. – Вип. 6, т. 3. – С. 26–32.

198. Кувачов В. П. До питання вибору шин спеціалізованих ширококолієвих засобів сільськогосподарського призначення / В. П. Кувачов // Науковий вісник ТДАТУ. – 2015. – Вип. 5, т. 1. – С. 14–20.

199. Надикто В.Т. Умови доцільності застосування подвоєння (потроєння) шин колісних енергетичних засобів // Техніка і технології АПК. – 2012. – № 5. с.7-8.

200. L. Angelucci, M. Varani, F. Pinet at all. The role of tyres and soil conditions in enhancing the efficiency of agricultural tractors./ Soil and Tillage Research, V. 251, 2025, 106570, <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106570>. . 201. A. Grecenko, P. Prikner. Tire rating based on soil compaction capacity./ Journal of Terramechanics, V. 52, 2014, P. 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.08.001>.

202. A.C. Bailey, R.L. Raper, T.R. Way, E.C. Burt, C.E. Johnson. Soil stresses under a tractor tire at various loads and inflation pressures. / Journal of

Terramechanics, V. 33, Issue 1, 1996, P. 1-11, [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(96\)00004-3](https://doi.org/10.1016/0022-4898(96)00004-3).

203. Налобіна, О. О., Голотюк, М. В., & Пуць, В. С. (2023). Дослідження впливу ущільнення ґрунту на його основні характеристики. Сільськогосподарські машини, № 49 – С. 39- 45.
204. Худавердян, Г., Хома, В. ., Крайник, Л. . (2023). Імітаційне моделювання руху полем повнопривідної колісної техніки у програмному середовищі MATLAB Simulink. Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження,(26),164–170. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.164>
205. Антощенко Р. В., Галич І. В., Череватенко Г. І. Динаміка та енергетика руху машинно-тракторного агрегату з урахуванням профілю опорної поверхні: монографія. – Харків: ДБТУ, 2024. – 100 с.
206. Антощенко Р. В., Антощенко В. В., Фабричнікова І. А., Сміцков Д. С., Кісь О. В. Визначення динаміки колеса мобільної машини. /Український журнал прикладної економіки та техніки. 2023. Том 8. № 4. С. 115 – 120.
207. Ключові аспекти взаємодії шини з опорною поверхнею : монографія / В. В. Біліченко, О. Л. Добровольський, В. М. Ребедайло. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с. ISBN 978-966-641-548-9
208. C. Senatorea, C. Sandu, Off-road tire modeling and the multi-pass effect for vehicle dynamics simulation / <https://www.anter.it> /csenatore/ docs /Multipass _Senatore _Sandu.pdf
209. B. J. Chan and C. Sandu. A semi-analytical approach to off-road tire modeling for vehicle dynamics simulations./ In Proceedings of 16th ISTVS International Conference, Turin, Italy, 2008.
210. I. C. Holm. Multi-pass behaviour of pneumatic tires./ Journal of Terramechanics, 6(3): pp.47–71, 1969.
211. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.
212. Дащенко О.Ф., Кириллов В.Х., Коломієць Л.В., Оробей В.Ф., MATLAB в інженерних та наукових розрахунках: Монографія. – Одеса: Астропринт, 2003. – 214 с.

213. ASAE. Machinery management data. ASAE standards. D230.4. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1987. p. 89–147.

214. Road Vehicle Dynamics Fundamentals and Modeling with MATLAB® Second Edition Georg Rill Abel Arrieta Castro \ 2020 Taylor & Francis Group, LLC 351 p.

215. Arwid Meiners, Stefan Böttinger, Nicolò Regazzi Triebkraft/Schlupf-Verhalten von Ackerschlepperreifen – praxisnahe Messung und Simulation mit dem Hohenheimer Maschinenmodell / LANDTECHNIK 75(1), 2020, 1–13 DOI:10.15150/lt.2020.3226

216. О. Ю. Ребров, О. Г. Петренко Аналіз методів визначення раціональних типорозмірів шин для підвищення технічного рівня транспортних засобів подвійного призначення за рахунок зниження питомого тиску на ґрунт / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування № 2, 2025 – С.160-166

217. Fendt 1000 Vario [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.fendt.com/de/geneva-assets/article/26673/228925-fendt1000vario-1902-td-de.pdf>

218. Трактор Fendt 1000 генерація 3 [Електронний ресурс] Режим доступу: https://dam.agcocorp.com/content/dam/multisite/fendt/marketing/multi-region/documents/marketing-material/brochures/tractors/1000-vario-gen3/uk/Fendt1000VarioGen3_UK_web.pdf

219. FENDT 1046 VARIO. DLG-анерkannt: "powermix" Leistung und Kraft stoffverbrauch im Feld- und Transporteinsatz.DLG –Pruefbericht 7533

220. ДСТУ ГОСТ 10677-2003 Пристрій навісний задній сільськогосподарських тракторів класів 0,6-8. Типи, основні параметри і розміри (ГОСТ 10677-2001, IDT) . Київ. Держспоживстандарт України – 2003. – 9 с

221. Brunotte, Joachim; Nolting, Klaus; Fröba, Norbert and Ortmeier, Berthold. Bodenschutz beim Pflügen: Wie hoch ist die Radlast am Furchenrad? / Landtechnik 67 (2012), no. 4, pp. 265–269

222. Schwanghart, H.: Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil / Journal of Terramechanics 28 (1991) H.4, pp.309 - 318
223. Schwanghart, H.: Reifen - Reifen/Boden - Verhalten / Jahrbuch Agrartechnik. Hrsg. J. Matthies, F. Meier. Frankfurt/M.: Maschinenbauverlag, 1991 4 S.46-50, 199 – 201
224. Mellgren P.G. Terrain Classification for Canadian Forestry. Canadian Pulp and Paper Association, 1980. – 13 p.
225. Silversides C.R., Sundberg U. Operational Efficiency in Forestry. Volume 2. Boston: Forest Science, 1989. – 169 p.
226. Голотюк М.В., Налобіна О.О., Бундза О.З. Аналіз впливу елементів рушія важких тракторів на величину тиску на ґрунт / / Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, №2(25), ЛНТУ, Луцьк, 2025. С.131-139 DOI 10.36910/automash.v2i25.1919
227. Clark S. K. Mechanics of Pneumatic Tires : monography / Clark S. K. – Washington D. C. : U. S. Department of transportation – National highway trac safety administration, 1971. – 853 p.
228. Etienne Diserens, Andrea Battiato. TASC Tyres / Tracks And Soil Conservation Technische Anleitung <https://www.tasc-application.ch/wp-content/themes/Divi-Child/downloads/TASC-Handbuch.pdf>
229. ГА3-53 <https://uk.wikipedia.org/wiki/ГА3-53>
- 230.. ГА3 3307 <https://uk.wikipedia.org/wiki/ГА3-3307>
231. КрА3 6322 <https://uk.wikipedia.org/wiki/КРА3-6322>
232. КрА3 А141Н2 <https://prom.ua/ua/p743333957-pritsep-kraz-a141n2.html>
233. КрА3 5233 <https://uk.wikipedia.org/wiki/КРА3-5233>
234. Hallonborg U. (1996): Super ellipse as tyre-ground contact area./ Journal of Terramechanics, 33: pp. 125–132.
235. Гедроить Г.И. Совершенствование профиля пневматических шин для сельскохозяйственной техники / Г.И. Гедроить, А.Ф. Безручко, В.В. Михалков, С.В. Занемонский // Агропанорама. -2017. -№ 5. -С. 2-5.

236. Ґрунти Львівської області» (Ґрунти Львівської області : колективна монографія / за ред. С.П. Позняка. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2019. 424 с.).
237. Щільномір для ґрунту ЛАН-М PRO з функцією GPS : веб-сайт. URL: <https://spectrolab.com.ua/ua/p1201734994-plotnomer-dlya-pochvy.html>
238. . ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.
239. Іванюк В., Іванюк Г. Вплив неоднорідності ґрунтового покриття і сільськогосподарських культур на твердість ґрунту. Вісник Львівського національного аграрного університету: Агрономія. 2020. № 24. С. 33-37 doi: 10.31734/agronomy2020.01.033
240. В.І. Мельник, М.Я. Довжик, Б.Я. Татяниченко, О.О. Соларьов Кінематична невідповідність і динамічна нерівномірність навантаження спарених коліс трактора / Інженерія природокористування, 2015, №1(3) С. 84-89
241. Боднарчук А.Є. Підвищення ефективності використання колісного трактора тягового класу 3,0 на польових роботах з різними типами шин. Магістерська робота. Дубляни: Львівський НАУ. 2021. 84 с.

ДОДАТОК А

Акти впровадження результатів досліджень

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Львівської філії
УкриДПВТ ім. Л. Погорілого

Москаленко О.Д.
«» 2026 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

У Львівській філії Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Л.Погорілого» результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії з спеціальності 133 - Галузеве машинобудування

Сивульки Петра Михайловича

на тему «Обґрунтування оперативної оцінки колісних машин з умов агроєкології та твердості ґрунту»

Комісія у складі: завідувача лабораторії наукових досліджень та випробувань техніки і технологій Сала Я.М., старшого наукового співробітника Думича В.В., наукового співробітника Мазурака М.В., склали даний **Акт** про те, що результати наукових досліджень Сивульки П.М. стосовно методик агроєкологічної оцінки колісних мобільних технічних засобів, зокрема на прикладі колісного трактора виробництва Харківського тракторного заводу – Т-151К, були прийняті для використання на філії з метою підвищення оперативності і точності оцінки колісних мобільних технічних засобів для сільськогосподарського виробництва при проведенні їх випробувань.

Акт складений для представлення у спеціалізовану вчену раду Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького і не є підставою для одержання премій або інших винагород.

Завідувач лабораторії



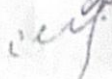
Я.М.Сало

Старший науковий співробітник



Думич В.В.

Науковий співробітник



Мазурак М.В.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ СТЕПАНА ГЖИЦЬКОГО**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
Львівського національного
університету ветеринарної
медицини та біотехнологій імені
С.З. Гжицького
доцент  О.М. Федець
« _____ » 2026 року



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес

Ми, що нижче підписалися, проректор з науково-педагогічної роботи та якості освіти Микула О.Я., декан факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій Ковалишин С.Й., завідувач кафедри агроінженерії та технічного сервісу ім. Олександра Семковича А.О. Шарибура, завідувач кафедри автомобілів і тракторів Сукач О.М. Даним актом засвідчуємо використання результатів дисертаційної роботи на тему: «Обґрунтування оперативної оцінки колісних машин з умов агроєкології та твердості ґрунту» аспіранта Сивульки П.М. у навчальному процесі. Для спеціальності Н7, 208 «Агроінженерія» для дисциплін:

1. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів;
2. Експлуатація машин в рослинництві;

Для спеціальності І8, 274 «Автомобільний транспорт» для дисциплін:

1. Автомобілі.

Проректор з науково-педагогічної роботи та якості освіти, к.е.н., доц.



Олег МИКУЛА

Декан факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій, к.т.н., проф.



Степан КОВАЛИШИН

Завідувач кафедри агроінженерії та технічного сервісу імені Олександра Семковича, к.т.н., доц.



Андрій ШАРИБУРА

Завідувач кафедри автомобілів і тракторів, к.т.н., доц.



Олег СУКАЧ

ДОДАТОК В

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

6. Сивулька П. Порівняльний аналіз методик агроекологічної оцінки МТА в Україні/снд та країнах ЄС // Вісник ЛНУП «Агроінженерні дослідження», № 28, 2024. –С. 218-226. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1747> (*Дисертантом проведено огляд та аналіз відомих методик агроекологічної оцінки колісних машин в Україні / СРСР та країнах ЄС, а також розрахунку руху бездоріжжям за WES – методикою НАТО*)

7. Л.В. Крайник, П.М. Сивулька Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів у сільському господарстві: проблемні питання та сучасні підходи удосконалення // 2025 • № 4 • Агроекологічний журнал, № 4, 2025. НААН України, - С. 205-212 (*Дисертантом на підставі аналізу сучасного розвитку виміральної техніки та розвитку досліджень опрацьовано проблемні питання оперативної агроекологічної оцінки МТА та запропоновано використання показника твердості ґрунту – конусного індексу CI, значення якого корелює і з значеннями щільності та вологості*)

8. Сивулька , П., Сукач , О. Оцінка площі плями контакту шини на ґрунтових поверхнях / Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 1(24), ЛНТУ, Луцьк, 2025. - С.399-408. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1747> (*Дисертантом проведено огляд сучасних методик розрахунку площі плями контакту пневматичної шини з ґрунтом, що деформується, і запропоновано використання емпіричної залежності, що враховує типорозмір шин, тиск повітря у них та вертикальне навантаження на колесо*)

9. Крайник Л., Сивулька П. Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів на базі WES-методики / Вісник ЛНУП «Агроінженерні дослідження», № 29, 2025. –С. 48-56. (*Дисертантом представлено*

пропозиції розвитку існуючої нормативної методики агроекологічної оцінки МТА з використанням підходів WES – методики НАТО та результати експериментальних досліджень).

10. Крайник Л., Сивулька П. Сукач О. Розвиток нормативної бази агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів / Вісник ЛНУП «Агроінженерні дослідження», № 30, 2026. –С. 42-50. *(Дисертантом надано пропозиції щодо використання п'єзоелектричних пенетрометрів з стандартизованим конусним наконечником під агроекологічну оцінку ущільнення ґрунту машинно-тракторними агрегатами).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Крайник Л., Сивулька П. Агроекологічна оцінка автомобілів і тракторів на базі WES – методології / II МНТЕ „Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021”, Вінниця, ВінТУ, 12-15.05.2021р. – С. 118-120

7. Крайник Любомир, Сивулька Петро. Раціоналізація сільськогосподарського типу автомобілів і тракторів з умов ефективності та агроекології / Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем./ Матеріали доповідей. Національний університет водного господарства та природокористування, 19-20 жовтня 2022 р. – С.259-264

8. Л. В. Крайник, П. М. Сивулька, О.М. Сукач . Конусний індекс CI (cone index) – базовий показник оцінки руху машин на ґрунтових поверхнях / Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту –2025»: Збірник тез. [Електронне видання] – Вінниця: ВНТУ. – 2025.– С.272-273. (PDF) ISBN 978-617-8163-51-8

9. Крайник Л.В., Сивулька П.М. . Експрес - оцінка агроекологічності конструкцій автомобілів та тракторів/ IV міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 21-22.01.2025. Київ – С.

10. П. Сивулька, О. Сукач. Агроекологічна оцінка колісної техніки у сільському господарстві./ Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали XXV Міжнародного науково-практичного форуму, 02–04 жовтня 2024 року . ЛНУП, Львів. - С.495-496

11. Крайник Л.В., Сукач О.М., Сивулька П.М. Експериментальна оцінка агроекологічності автомобілів та тракторів з використанням пенетрометра.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

12. Krainyk L. V., Syvulka P. M., Khudaverdian H. A., Gabriel Y. I. Agricultural transport – the type and structure formation of the wheeled vehicles fleet в міжнародному журналі ТЕКА. Quarterly journal of agri-food industry – 2021, Vol. 21, No. 1, 51-58 pp.