



Мобільні і стаціонарні енергозасоби та їх елементи Mobile and stationary power units and their elements

УДК 631.372

[https://doi.org/10.37700/enm.2020.3\(17\).23](https://doi.org/10.37700/enm.2020.3(17).23) - 28

Навантаження на колеса від зміни вертикальних прискорень в процесі руху сільськогосподарського агрегату

М.П. Артьомов

*Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. Петра Василенка (м.Харків, Україна)
email: artiomovprof@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2947-2664*

Правильна експлуатація колісних шин тракторів утруднена і залежить від багатьох факторів. Тиск в шинах має велике значення для розподілу тиску напружень і деформацій як у самій шині так і її впливі на ґрунт. Деформація шини впливає на розмір поверхні контакту з ґрунтом. Низький тиск викликає надмірний прогин каркасу шини, що збільшує опір коченню колеса. Причини занадто великого тиску зниження зчеплення шин з ґрунтом, нерівномірний і швидкий знос, особливо ведучих коліс. Для різних ґрунтів в залежності від тиску в шинах можна отримати різний розподіл напруження в ґрунті. У статті представлено вплив шини ведучого колеса трактора при експлуатації на зміну ущільнення ґрунту.

Основна мета цього дослідження полягала в оцінці впливу механічних напружень, що діють при впливі ведучих коліс сільськогосподарського агрегату, на зміну ущільнення ґрунту і процеси, що відбуваються при цьому. Сільськогосподарські машини можуть вплинути на структуру ґрунтового профілю на глибину до 0,6 м залежно від характеристики машин, типу ґрунту і початкових умов стану ґрунту з огляду на зміну верхнього шару ґрунту, ходових системи сільськогосподарських агрегатів, особливо тракторів з навісними або причіпними знаряддями, які створюють тягове зусилля за рахунок напруження-деформації - взаємодії між шинами і верхнім шаром ґрунту. У цій контактній поверхневій взаємодії між ґрунтом і шиною відбувається деформація ґрунту при нормальних напруженнях і напруженнях зсуву. Напруження зсуву різко зростає зі збільшенням тягового зусилля і буксування коліс, що може привести до руйнування слабого верхнього родючого шару.

Ключові слова: ґрунт, ведучі колеса, нормальне напруження ґрунту, крутний момент, вертикальні прискорення, вертикальне навантаження, деформації.

Постановка проблеми та її актуальність.

Сучасні тенденції в розвитку сільськогосподарської техніки показують збільшення її габаритів і, отже, ваги техніки, як наслідок постійного прагнення до збільшення потужності, вбудованої в мобільні польові агрегати, які слідує напрямку збільшення енергонасиченості, щоб уникнути збільшення руху по полю, яке викликає небезпечне ущільнення ґрунту.

Усі механізовані господарські роботи, починаючи з підготовки поля під посів, внесення добрив та хімічних речовин і, нарешті, збирання врожаю збільшують ризик деградації ґрунту шляхом надмірного ущільнення. Однак ущільнення - явище на яке стали звертати увагу недавно, оскільки воно існувало у вигляді твердих порід до появи механізації сільського господарства. У наш час ризик ущільнення ґрунту зріс здебільшого за рахунок значного збільшення ваги сільськогоспо-

дарської техніки. В процесі механізації сільського господарства вага трактора зросла з 3 тон (у 1940 році) до 7 тон (у 1998 році) відповідно до 20 тон (в даний час). В дослідженнях необхідно зробити оцінку впливу механічних напружень від дії ведучих коліс сільськогосподарського агрегату, на зміну ущільнення ґрунту і процеси, що відбуваються при цьому.

Аналіз досліджень і публікацій. Колісні трактори створюють силу тяги за допомогою деформацій і напружень при взаємодії між шинами та верхнім шаром ґрунту. Сила тяги та ковзання колеса трактора чинять помітний вплив на напружений стан ґрунту, а отже, на деформацію ґрунту.

Глибина ущільнення зазвичай варіюється від 100 до 600 мм, але більш очевидна на верхньому шарі ґрунту на глибині близько 100 мм і на нього сильно впливає площа контакту та сили тиску в цій зоні (рис.1).

Площа контакту - це частина колеса або шини, що контактує з ґрунтом, і є важливим фактором для визначення параметрів впливу з боку сільськогосподарського агрегату на оброблюваний ґрунт. «Статична площа контакту» - це зона контакту між шиною та жорсткою або деформованою поверхнею, коли шина завантажена статично, без руху вперед. Площа контакту шини обчислюється шляхом ділення навантаження на одне колесо на тиск накачування шини. „Контактний тиск” на межі ґрунт - шина - це навантаження на вісь розділений на площу поверхні контакту між ґрунтом та машиною і є хорошим показником потенційного ущільнення на сільськогосподарських ґрунтах.

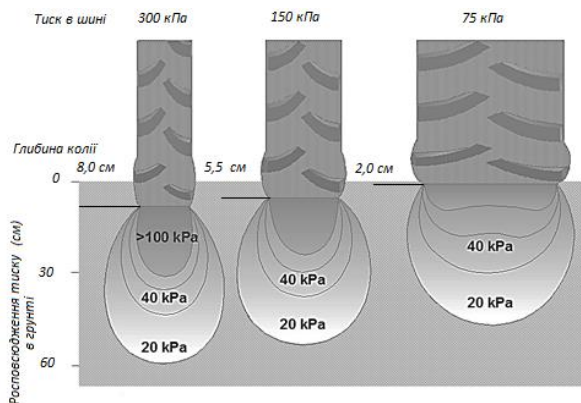


Рис. 1. Деформація ґрунту, спричинена ходовою системою трактора, в залежності від тиску в шині

Складна геометрична форма колеса при розрахунках величини впливу від колісного рушія на ґрунт є основною проблемою. У загальному випадку опорна поверхня коліс з пневматичною шиною, що мають відповідний протектор, складається з виступів і западин різних конфігурацій. При цьому лінія перетину радіальної площини, що проходить через вісь обертання колеса, і зовнішньої поверхні протектора ненавантаженої зовнішніми силами шини має кінцевий радіус. Перераховані особливості значно ускладнюють створення розрахункових залежностей, необхідних для виявлення розподілу контактних тисків пневматичних шин на опорну поверхню - ґрунт [3]. У зв'язку з цим у ряді випадків приймають, що колесо має циліндричну форму, а його контакт здійснюється з самого початку плоскою поверхнею [4]. Для встановлення функції розподілу тиску, що діє в межах контактної поверхні колеса і опорної поверхні, необхідно мати залежності між тиском, деформаціями опорної поверхні і пневматичної шини.

Різні дослідники рекомендували встановлювати взаємозв'язок між тиском (контактним напруженням σ) і деформацією h опорної поверхні.

Ці залежності можна розділити на дві групи. До першої групи необхідно віднести залежності, в яких відсутній час і, отже, деформації опорної поверхні є або пружними, або пружно-пластичними, з ростом яких до певних меж опорна поверхня зміцнюється. Основні залежності цієї групи мають вигляд

В.П. Горячкина – М.Н. Летошнева

$$\sigma = k h^{\mu} \quad (1)$$

$$0 \leq \mu \leq 1$$

С.С. Корчунова

$$\sigma = P_{\text{нес}} \left(1 - e^{-\frac{h}{k}} \right); \quad (2)$$

$$P_{\text{нес}} = A_0 + B_0 \frac{\Pi}{F};$$

В.В. Кацигіна

$$\sigma = P_{\text{нес}} t h \frac{K}{P_{\text{нес}}} \cdot h; \quad (3)$$

М.Г. Беккера

$$\sigma = \left(K_{\phi} + \frac{K_c}{b} \right) \cdot h^{\mu}, \quad (4)$$

де K - коефіцієнт, що враховує властивості ґрунту; μ - показник деформованості ґрунту; K_{ϕ} , K_c - коефіцієнти, що враховують відповідно зв'язність і тертя в ґрунті; Π , F - периметр і площа плями контакту; A_0 , B_0 - константи, що визначають опір різіу і стисненню ґрунту.

Викладення основного матеріалу дослідження. Відомі дві схеми, які використовуються для математичного опису взаємодії колеса з опорною поверхнею. У першій схемі розглядається зафіксований момент колеса, що котиться по опорній поверхні. У другій схемі розглядається стиснення циліндричного тіла з самого початку циліндричної поверхнею.

Незважаючи на цілий ряд значних спрощень автору не вдалося в явному вигляді отримати вирази як для σ , так і для ε_1 . Крім того, в зазначених роботах не наведено методики визначення E_1 , E_2 , μ_1 , μ_2 и ν .

З використанням залежності Д.І. Золотаревської - А.Ф. Полетаєва

$$\sigma = qT \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} - T \cdot \frac{d\sigma}{dt}, \quad (5)$$

із введенням кореляційних залежностей отримано, рівняння з частинними похідними 4-го порядку, що описують поширення хвиль деформації і напруження в в'язкопружному ґрунті змінної щільності, лінійно залежить від глибини[5].

При послідовному ускладненні системи колесо - опорна поверхня і введенні різних припущень розглянуто задачу взаємодії колеса з

ґрунтом. При цьому шина представлена у вигляді 3-елементної реологічної моделі. Активний шар ґрунту представлений двоелементною реологічною моделлю Кельвіна - Фойгта (рис.2). це модель в'язко-пружного тіла, яке здатне поновлювати свої властивості після зняття навантаження (еластичність) [6,7]. Така модель утворюється внаслідок паралельного з'єднання тіл Гука і Ньютона

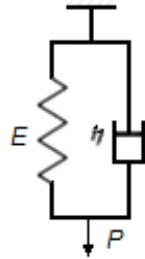


Рис. 2. Модель Кельвіна – Фойгта в'язко-пружного стану тіла

При використанні цієї моделі необхідно врахувати, що деформація є постійна, а напруження сумуються. Поведінка тіла Кельвіна - Фойгта описується таким диференціальним рівнянням

$$\sigma_z = \gamma \cdot E + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt}. \quad (6)$$

Тобто повне напруження розподіляється між пружним і пластичним елементами. При ростягу в умовах постійно прикладеного навантаження $\sigma = const$ розв'язок даного рівняння дає

$$\gamma = \frac{\sigma}{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (7)$$

де $T = \eta/E$ - час запізнювання (повзучості, ретардації); $\gamma_\infty = \sigma/E$ - максимальна відносна деформація.

Залежність відносної деформації від часу у моделі Кельвіна - Фойгта показана на рис. 3. Після зняття постійного навантаження зразок буде повільно повертатися до своєї первісної форми, також дотримуючись експоненційної кривої (експоненціальна повзучість).

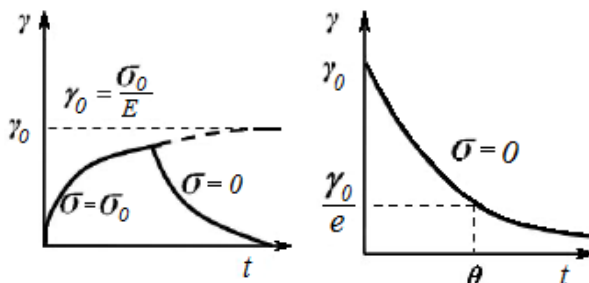


Рис. 3. Залежність деформацій моделі Кельвіна - Фойгта від часу

У тому випадку, коли використовується відносно проста модель Кельвіна-Фойгта з коефіцієнтами, що змінюються лінійно така модель не

відповідає реальному характеру деформування ґрунтів [8].

Виходячи з представлених розрахунків моделі швидкість деформації розраховується

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{P}{\eta} - \frac{E}{\eta} \cdot \gamma \quad (8)$$

При зміні швидкості деформації відповідно виникають прискорення, які змінюють динамічні навантаження і їх можливо визначити за допомогою трикомпонентних датчиків лінійних прискорень. Але в цьому випадку випробування необхідно проводити на конкретному агрофоні з навішуванням конкретного сільськогосподарського знаряддя.

Справа в тому, що при проведенні весняно-польових робіт на вирощуванні зернових культур (закриття вологи, передпосівна культивация, посів, боронування або прикочування посівів) рушіями колісних тракторів ущільнюються 50-60% площі поля, а на обробітку просяпних культур - понад 90%. Причому до 30-40% площі поля ущільнено дворазово, 10-20% - трикратно.

При проведенні динамічних випробувань контроль параметрів здійснюємо за допомогою вимірювально-реєстраційного комплексу, обладнаного трикомпонентними датчиками-акселерометрами. Результати вимірювань наведені на рис. 4.

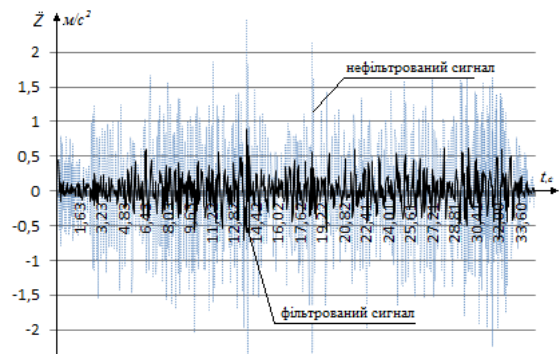


Рис. 4. Графік зміни вертикальних прискорень руху сільськогосподарського агрегату

У початковий момент руху агрегату виникають ударні навантаження від колеса на ґрунт, вони виникають внаслідок падіння колеса з деякої висоти нерівності, при цьому в початковий момент часу ($t = 0$) механічні напруження стрибком зростають від нуля до максимуму, а потім змінюються згідно рівнянь

$$\sigma = \sigma_m \cdot \left(1 - \frac{t}{\theta}\right), \quad \text{якщо } 0 \leq t \leq \theta; \quad (9)$$

$$\sigma = 0, \quad \text{якщо } 0 \geq t, t \geq \theta,$$

де σ_m - максимальне напруження в зоні контакту рушія з ґрунтом, Па; θ - напівперіод коливань, с⁻¹.

При вирішенні рівняння (9), отримуємо зміни відносної деформації ґрунту від діючих динамічних навантажень рушіїв

$$\varepsilon(t) = -\frac{D_0}{\mu} - \frac{B_0}{\mu^2} \cdot (\mu t - 1) + C_0 \cdot e^{-\mu t}, \quad (10)$$

де D_0 , B_0 , C_0 - коефіцієнти, що враховують властивості ґрунту і величину механічного напруження.

При русі агрегату на нерівностях, що періодично повторюються напруження в ґрунті змінюється за законами, які описані формулами

$$\sigma = 0 \quad \text{якщо } t \leq 0;$$

$$\sigma = \sigma_m \cdot \sin \lambda t = \sigma_m \cdot \frac{\sin 2\pi t}{T} \quad (11)$$

якщо $0 \leq t \leq \infty$,

де λ - частота кутових вимушених коливань, с^{-1} ,

$$\lambda = \frac{2\pi}{T}, \quad (12)$$

де T - період вимушених коливань, с ;

$$T = \frac{L}{V}, \quad (13)$$

де L - довжина нерівностей опорної поверхні, м ;
 V - швидкість руху агрегату, м/с .

Вирішуючи рівняння (10), отримуємо зміну відносної деформації ґрунту від діючих навантажень рушіїв

$$\varepsilon(t) = \frac{K}{\lambda^2 + \mu^2} \cdot (\lambda \cdot \sin \lambda t + \mu \cdot \cos \lambda t) + \frac{L}{\lambda^2 + \mu^2} \cdot (\mu \cdot \sin \lambda t - \lambda \cos \lambda t) + C \cdot e^{-\mu t}, \quad (14)$$

де K , L , C - коефіцієнти, що враховують властивості ґрунту і діючі на нього механічні навантаження.

Рух сільськогосподарського агрегату на колісних рушійх представимо у вигляді двохмасової еквівалентної коливальної, що рухається по опорній поверхні, заданої рівнянням

$$y = y \sin \lambda_{max} \quad (15)$$

де y_{max} - максимальна висота нерівностей поверхні поля, м .

Розрахувавши величину відносної деформації ґрунту можна визначити зміну щільності ґрунту після впливу на неї колісного рушія за залежністю, відомою з механіки ґрунтів [9]

$$\rho_K = \frac{\rho_{\Pi}}{1 - \varepsilon}, \quad (16)$$

де ρ_{Π} , ρ_K - щільність ґрунту до впливу (початкова) і після впливу, г/см^3 ; ε - відносна деформація ґрунту (розраховується за формулою 14).

Для визначення динамічних навантажень в процесі руху сільськогосподарського агрегату скористаємось законами класичної механіки

$$F_{\text{ин}} = (M + m_2) \cdot \ddot{z}, \quad (17)$$

де M - маса трактора, кг ; \ddot{z} , - вертикальні прискорення, що виникають під час руху агрегату, м/с^2 ; m_2 - маса сільськогосподарського знаряддя.

З рівняння силового балансу агрегату визначимо величину динамічного навантаження, що припадає на колеса

$$G_{k2} = F_{\text{ам1}} + F_{\text{амш2}} + m_2 \cdot \ddot{\xi}_2 + N_{\text{сц}} \cdot \cos \phi - P_{\text{кр}} \cdot \sin \phi - F_p. \quad (18)$$

За результатами розрахунків побудуємо графік зміни щільності ґрунту від динамічних навантажень (рис.5) [10].

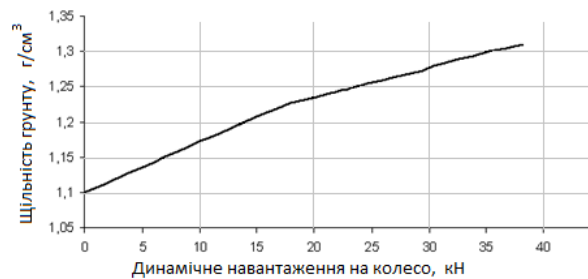


Рис. 5. Зміна щільності ґрунту від динамічного навантаження на осі колеса: з тяговим навантаженням $P_{\text{кр}} = 30$ кН.

Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 5) показує, що при русі трактора з тяговим навантаженням відбувається перерозподіл навантажень по осях, внаслідок чого колеса заднього мосту додатково довантажуються, а передні - розвантажуються, в цьому випадку вплив від обох мостів незначно відрізняються один від одного, значення щільності ґрунту досягає $1,31 \text{ г/см}^3$.

Висновки За результатами проведених розрахунків і досліджень визначено залежність впливу вертикальних прискорень на динамічні навантаження осей мостів трактора;

Визначено залежність зміни щільності ґрунту, викликана дією динамічних навантажень від рушіїв переднього і заднього мостів трактора.

Для більш адекватного опису реологічних властивостей оброблюваних матеріалів, потрібно використовувати моделі, що складаються з трьох і більше елементів. Проте зі зростанням кількості елементів зростає не тільки точність опису, а й значно ускладнюється їх математичний аналіз.

Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку комплектації сільськогосподарських агрегатів у режимах реальної експлуатації.

Література:

1. Arvidsson, J. and Keller, T. (2007). Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil Till. Res.*, vol. 96, pp. 284-291.
2. De Lima R.P., Da Silva A.P., Giarola N. F.B., Da Silva A. R., Rolim M.M., (2017), Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic, *Biosystems Engineering*, Vol. 162, pp.
3. Шипилевский Г.Б. Создание единой математической модели МТА / Г.Б. Шипилевский // Тракторы и сельхозмашины. – 2000. – № 3. С. 17-19.
4. Соколова В.А. Исследование взаимодействия арочной шины с твердой опорной поверхностью / В.А. Соколова // Труды НАМИ. – 1961. – № 28. – С. 21-24.
5. Золотаревская Д.И. Расчет показателей взаимодействия движителей с почвой / Д.И. Золотаревская // Тракторы и сельхозмашины. – 2001. – № 3. – С. 18-22.
6. Ji S., Shen H.H. Contact Force Models for Granular Flows: Report No. 04-02. Potsdam; New York: Department of Civil and environmental engineering. Clarkson University, 2004. P. 3699–5710.
7. Ковбаса В. П. Механіко-технологічне обґрунтування оптимальної взаємодії робочих органів з ґрунтом: автореф. дис.... д-ра техн. наук. Київ, 2006. 35 с.
8. Шеремета Р. Огляд реологічних моделей. Режим доступу agroengineering.online/index.php/ago-research/article/download/42/36/ Дата 19.09.2020р.
9. Цытович Н. А. Механика грунтов / Цытович Н.А. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.
10. Болдовский В.Н. Оценка влияния движителей колесных тягово-транспортных средств на

почву: автореф. дис. канд. техн. наук. Харьков, 2011. 20с.

References:

1. Arvidsson, J. and Keller, T. (2007). Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil Till. Res.*, vol. 96, pp. 284-291.
2. De Lima, R.P. et al., (2017), Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic, *Biosystems Engineering*, 162
3. Shipilevskiy, G. B. (2000) 'Sozdanie edinoj matematicheskoy modeli MTA', *Traktory i selhozmashiny*, 3,pp. 17–19.
4. Sokolova, V. A. (1961) 'Issledovanie vzaimodeystviya arochnoy shiny s tverdoy opornoj poverhnostyu', *Trudy NAMI*, 28, pp. 21–24.
5. Zolotarevskaya, D. I. (2001) 'Raschet pokazateley vzaimodeystviya dvizhiteley s pochvoy', *Traktory i selhozmashiny*, 3, pp. 18–22.
6. Ji, S. and Shen, H. H. (2004) 'Contact Force Models for Granular Flows', Department of Civil and environmental engineering, pp. 3699–5710
7. Kovbasa, V. P. (2006) 'Mehaniko-tehnologichne obgruntuвання optimalnoyi vzaemodiyi robochih organiv z Gruntom', avtoref. dis.... d-ra tehn. nauk. KiYiv.
8. Sheremeta, R. (2020) 'Oglyad reologichnih modeley'.
9. Tsyitovich, N. A. (1963) 'Mehanika gruntov', Gosstroyizdat, p. 636.
10. Boldovskiy, V. N. (2011) 'Otsenka vliyaniya dvizhiteley kolesnyih tyagovo-transportnyih sredstv na pochvu', avtoref. dis. kand. tehn. nauk., p. 20.

Аннотация

Нагрузка на колеса и почву от изменения вертикальных ускорений в процессе движения мобильных машин

Н.П. Артёмов

Правильная эксплуатация колесных шин тракторов затруднена и зависит от многих факторов. Давление в шинах имеет большое значение для распределения давления напряжений и деформаций как в самой шине так и ее воздействию на почву. Деформация шины влияет на размер поверхности контакта с грунтом. Низкое давление вызывает чрезмерный прогиб каркаса шины, увеличивает сопротивление качению колеса. Причины слишком большого давления понижение сцепления шин с почвой, неравномерно и быстрый износ, особенно ведущих колес. Для различных почв в зависимости от давления в шинах можно получить различное распределение напряжения почвы. В статье представлены влияния шины ведущего колеса трактора при эксплуатации на смену уплотнения почвы.

Основная цель данного исследования заключалась в оценке влияния механических напряжений, действующих при воздействии ведущих колес сельскохозяйственного агрегата, на уплотнение почвы и процессы, происходящие при этом. Сельскохозяйственные машины могут повлиять на структуру почвенного профиля на глубине до 0,6 м в зависимости от характеристики машин, типа почвы и начальных условий состояния почвы. Учитывая изменение верхнего слоя почвы, ходовых систем сельскохозяйственных агрегатов, особенно тракторов с навесными или прицепными орудиями, которые создают тяговое усилие за счет напряжения-деформации - взаимодействия между шинами и верхним слоем почвы. В этом контактно-поверхностном взаимодействии между грунтом и шиной происходит

деформація ґрунту при нормальних напруженнях і напруженнях сдвига. Напруження сдвига різко зростає з увеличенням тягового зусилля і пробуксовки колес, що може привести к разрушению слабого верхнього плодородного слоя.

Ключевые слова: *почва, ведущие колеса, нормальное напряжение почвы, крутящий момент, вертикальные ускорения, вертикальная нагрузка, деформации.*

Abstract

Load on wheels and soil from change in vertical acceleration during motion of mobile machines

N.P. Artiomov

Correct operation of tractor wheel tires is difficult and depends on many factors. Tire pressure is of great importance for the distribution of stress and strain pressure, both in the tire itself and its effect on the soil. Tire deformation affects the size of the ground contact surface. Low pressure causes excessive deflection of the tire carcass and increases the rolling resistance of the wheel. The reasons for too much pressure are a decrease in tire adhesion to the soil, uneven and rapid wear, especially of the driving wheels. For different soils, depending on the tire pressure, different soil stress distribution can be obtained. The article presents the influence of the tire of the driving wheel of the tractor during operation on the change of soil compaction.

The main goal of this study was to assess the effect of mechanical stresses acting under the influence of the driving wheels of an agricultural unit on soil compaction and the processes occurring during this. Agricultural machines can affect the structure of the soil profile down to a depth of 0.6 m, depending on the characteristics of the machines, soil type and initial soil conditions. Taking into account the change in the top layer of the soil, the running systems of agricultural units, especially tractors with mounted or trailed implements, which create tractive force due to stress-deformation - the interaction between tires and the top layer of the soil. In this contact surface interaction between soil and tire, soil deformation occurs under normal and shear stresses. Shear stress rises sharply with increasing traction and wheel slip, which can lead to destruction of the weak top fertile layer.

Keywords: *soil, driving wheels, normal soil stress, torque, vertical acceleration, vertical load, deformation.*

Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard

Artiomov, N. P. (2020) 'Load on wheels and soil from change in vertical acceleration during motion of mobile machines', *Engineering of nature management*, (3(17)), pp. 23 - 28.

Подано до редакції / Received: 12.09.2020