

УДК 630.77.4:531.6

## Прогресивні методи дослідження процесу колісутворення внаслідок багатократного проїзду лісових машин

Мачуга О.С., Щупак А.Л., Бойко М.М.

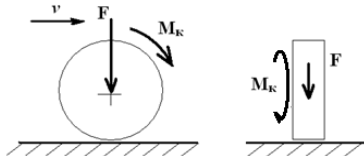
Національний лісотехнічний університет України, Львів, Україна

**Анотація.** Для вивчення особливостей процесу колісутворення внаслідок багатократного проїзду лісових машин запропоновано поєднання сучасних теоретичних та експериментальних методів. Для формування математичних моделей застосовується енергетичний підхід, який базується на ексерго-енергетичному балансі дисипативних процесів під час контакту колеса машини з ґрунтовою поверхнею руху. Кількісні оцінки отримано шляхом інженерних апроксимацій енергії різних типів деструкційних процесів. Співставлення отриманих даних із результатами польових експериментальних досліджень вказують на адекватність теоретичних результатів, на можливість керувати енергетичними витратами у залежності від режимів руху для конкретних типів ґрунтів та дають змогу визначити характеристики різних типів ґрунту.

**Ключові слова:** ґрунт; реологічні властивості; енергетичний підхід; залишкові прогини поверхні руху.

Лісові машини, які використовуються для виконання технологічних операцій лісозаготівлі та для транспортування (трелювання) заготовленої деревини, рухаються ґрунтовими поверхнями. Внаслідок цього формуються технологічні колії, які характеризуються ущільненням ґрунтових мас, пошкодженням родючого шару та іншими структурними змінами. Це нерідко призводить до подальших ерозійно-деградаційних пошкоджень ґрунту, як складника лісової екосистеми [1]. У процесі формування колії неефективно витрачаються значні енергетичні ресурси, що пов'язано з подоланням сил опору ґрунтового середовища рухові лісової машини [2]. Такі енерговитрати залежать від реологічних характеристик ґрунту, від ваги і режимів руху лісової машини. Тому розвиток теоретичних та експериментальних методів дослідження процесу колісутворення є важливим теоретичним і практичним завданням.

Розглядається механічна система «лісова машина-ґрунтове середовище» і її складник – «рушій лісової машини - ґрунтове середовище» (рис. 1). В даному викладі обмежуємося колісним рушієм, оскільки взаємодія гусеничного рушія з ґрунтом має специфічні особливості. Машина рухається із швидкістю  $v$  квазістатично.



$F$  – частка сили ваги машини, що припадає на колесо,  $M_k$  – частка крутного моменту двигуна, що передається на це ж колесо

Рис. 1 – Силловий баланс рушія з ґрунтом

У випадку абсолютно пружного середовища оцінка напружено-деформованого стану ґрунтового середовища отримується за допомогою розв'язку класичної задачі Бусінєса [3], що

часто використовується під час розв'язування задач механіки ґрунтів [4]. Однак, у випадку реологічних характеристик ґрунту як складної структури з вираженими дисипативними характеристиками – в'язкопружністю, пластичністю тощо, застосування таких розв'язків є обмеженим і не може забезпечити досягнення мети дослідження.

У роботі використано методологію енергетичного підходу [5] у форму варіаційної нерівності стосовно ексергії та анергії: ексергія  $Ex$  частина повної енергії матеріального об'єкта, яка може бути повністю перетворена в будь-які іншу форму енергії шляхом виконання механічної роботи, в той час як анергія  $An$  – це інша частина повної енергії системи, яка не може передаватися у вигляді механічної роботи. За своєю суттю анергія – це енергія низькотемпературного тепла оточуючого середовища та поверхнева енергія.

Основним відношенням такої методології є наступна варіаційна нерівність:

$$\delta (Ex - An) \leq 0, \quad (1)$$

де  $\delta$  – оператор варіювання функціонального виразу. Для розглядуваного класу задач у яких вага лісової машини, а відповідно і контактний тиск рушія на ґрунт є доволі великим у порівнянні із тримною здатністю ґрунту, нерівність (1) переходить у граничну рівність:

$$\delta (Ex - An) = 0, \quad (2)$$

яка визначає величину залишкового прогину контактної поверхні у залежності від умов взаємодії та реологічних властивостей ґрунту. Простота формули (2) дає змогу отримати інженерний розв'язок задачі.

Для оцінювання ексергії  $Ex$  розглядуваної системи вважатимемо ексергію рушія незмінною, тоді її варіація рівна нулю. Тоді ексергія системи співпадає з ексергією накопиченою ґрунтом. Вважатимемо, що рушій діє на контактну площадку із усередненим тиском  $p_k$  та викликає в ґрунтовому континуумі напруження  $\sigma_{ij}$  та деформації  $\epsilon_{ij}, i, j = x, y, z$ .

Тоді потенційна енергія [3] розглядуваної механічної системи, тогочна до її ексергії:

$$Ex = \frac{1}{2} \int \sum_{i=x,y,z} \sum_{j=x,y,z} \epsilon_{ij} \sigma_{ij} dV - F (w - v \cdot t \cdot \sin \alpha), \quad (3)$$

де  $w$  – повний прогин ґрунту (пружний  $w_{np}$  та залишковий –  $w_{znl}$ ),  $t$  – час,  $\alpha$  – ухил площадки руху до горизонту.

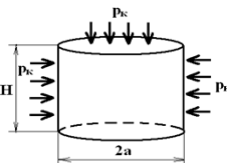


Рис. 2 – Схема завантаження ґрунту

Вважатимемо, що істотними для нашої задачі є вертикальні напруження  $\sigma_{zz}$ , які співпадають із контактним тиском  $p_k$  в об'ємі умовного циліндра (рисунок 2), в якому виявляються основні деформаційні процеси, пов'язані з вертикальним і усестороннім стисненням з такими ж напруженнями  $p_k$ . Площа торця циліндра співпадає з контактною площею колеса і ґрунту:  $S_k = \pi a^2$ ;  $H$  – умовна висота циліндра, яка вказує на межу чутливості ґрунту до навантаження і може бути феноменологічною характеристикою ґрунту.

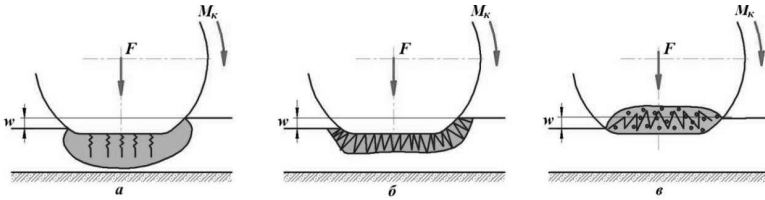
Деформації та напруження поза цим циліндром є нікчемно малими. Тоді з (3) отримаємо:

$$Ex = \frac{1}{2} p_k \cdot w \int_V dV + \frac{1}{2} p_k \cdot w \int_V \frac{u(a) - u(o)}{a} dV - F (w - v \cdot t \cdot \sin \alpha) \quad (4)$$

Другий доданок в (4) містить різницю горизонтальних переміщень  $u$  на межі циліндра і в його центрі. Застосовуючи результат [6, ст. 476] до оцінювання величини  $u$  та використовуючи розв'язок задачі Бусінеска для  $w$ , запишемо:

$$Ex = w^2 \frac{ES_k}{H} \frac{2-v}{2} - Fw + F \cdot v \cdot t \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

Визначення величини анергії  $An$  потребує прискіпливого аналізу енергообмінних процесів під час конкретної взаємодії рушія із ґрунтом. Трансформацію ексергії в анергію систематизуємо наступним чином (див. рис. 3).



*a* – гістерезисні втрати в об'ємі ґрунту; *б* – гістерезисні втрати в приповерхневих шарах ґрунту, що деформується; *в* – гістерезисні втрати в шині

**Рис. 3 – Гістерезисні втрати в ґрунті і шині під час дії рушія на ґрунтову опору поверхню**

Енергетичні трансформації в об'ємі ґрунту породжуються наступними процесами: в'язким течінням ґрунтової маси; вертикальним ущільненням ґрунту внаслідок пластичного деформування його скелету; горизонтальним ущільненням ґрунту внаслідок пластичного деформування його скелету; боковим витисканням ґрунту; лобовим витискання (бульдозерний ефект); руйнуванням дерну та коріння тощо.

Енергетичні трансформації в приповерхневих шарах ґрунту, що деформується, породжуються наступними процесами: відриванням частинок ґрунту від основи опорної поверхні; боковим тертям під час заглиблення шини в ґрунт; подоланням порогової перешкоди; подоланням гідравлічного опору води, що накопичилася в колії; заглибленням ґрунтозацепів у ґрунт; прилипанню ґрунту до шини; деформуванням і ущільненням настилу з порубкових залишків (гілок); взаємодією з протибуксувальними ланцюгами; проковзуванням колеса під час буксування; розпушуванням ґрунту; блокуванням колеса стисненням і згладжуванням мікронерівностей опорної поверхні; горизонтальним переміщенням ґрунту в напрямку протилежному до руху.

Енергетичні трансформації в шині породжуються наступними процесами: радіальним деформуванням шини; кутовим деформуванням шини; боковим деформуванням шини; тангенціальним деформуванням шини; стравленням повітря; зношенням шини (відриванням та стиранням частинок шини від основи протектора).

Серед вагомих чинників, які формують процес енергообміну, виділимо пластичне деформування ґрунту та його в'язке течіння. Ці чинники безпосередньо пов'язані з часом контакту колеса та ґрунту, що в комплексі з величиною швидкості руху дозволяє визначати збільшення глибини колії в залежності від кількості проїздів лісової машини.

Розроблена методика базується на використанні окремих, запроваджених вище феноменологічних параметрів. Для їх визначення та співставлення отриманих теоретичних залежностей із експериментальними даними, запропоновано [1] та вдосконалено методи натурних досліджень взаємодії машини з ґрунтом в польових умовах.

Метод визначення ерозійно-експлуатаційних пошкоджень лісової дороги (волока), зокрема – об'єму знесеного ґрунту на вибраній ділянці за допомогою низки вимірювальних пристроїв – ухиломіра, бусолі, далекоміра, експрес лабораторії, фотоапарату тощо протягом щорічного моніторингу полягає в наступному. Вибраний волок розбивався на окремі ділянки (пікети). На початку кожної ділянки в характерних точках (місця перепаду ухилу, відгалуження волоку, зміна напрямку тощо) виконувалися заміри: азимуту, ухилу та довжини; знімався поперечний профіль волоку. Для цього у відповідному пікеті натягувалася стрічка впоперек дороги, яка відображала первинний стан її поперечного профілю. Геодезичною рейкою замірялися глибина пошкодження що 20 см ширини профілю. Знімання поперечного профілю дублювали фотоапаратом, масштабували геодезичною рейкою і визначали об'ємні характеристики пошкоджень.

Метод визначення інтенсивності колісформування від проїзду лісової машини ґрунтовою поверхнею руху та дійсного впливу рушія на ґрунт в польових умовах пов'язується із вибором відповідного полігону та застосуванням комплекту для натурального вимірювання показників в складі: геодезичні рейки, ударник СНДІ, польова лабораторія типу ПЛЛ-9, фотоапарат, стрічка, нівелір тощо. Площа полігону для проведення випробувань вибирається в межах 30-40 м на 50-

60 м, з ухилом поверхні до  $3^0 - 4^0$ , на якій розбивається траса для проходження трактором характерних ділянок.

Після першого проїзду трактора трасою полігону в кожній точці на ділянках виконувалися заміри глибини правої і лівої колій; брали проби ґрунту в обох коліях, установлювали твердість ґрунту до розроблення. Аналогічні заміри виконували після певної кількості проїздів трелювального трактора з вантажем чи без нього.

Співставлення теоретичних даних із результатами натурних експериментів вказують на якісне співпадіння та добре кількісне співпадіння.

Таким чином розроблені теоретичні та експериментальні методи дослідження дають змогу визначати вплив режимів руху лісової машини на процес колеутворення внаслідок багатократних проїздів з метою мінімізації експлуатаційних енерговитрат. Крім того за допомогою експериментальних методів уточнюються фізико-механічні характеристики ґрунту й визначаються пороги, з огляду екологічних ризиків, значення таких параметрів.

### **Progressive methods of the rutting process due the multiple forest machines passage studying**

**Machuga O., Shchupak A., Wojko M.**

*Abstract. The peculiarities of the rutting process due the multiple forest machines passage studying, as the result of the modern theoretical and experimental methods combination is proposed. For the mathematical models formation, an energy approach based on the exergy-nergy dissipative processes balance, during the contact of a machine wheel with a soil surface of motion is used. Quantitative estimates are obtained by the way of destructive processes various types energy engineering approximations. Comparison of the obtained data with the results of field experimental studies indicates the adequacy of theoretical results, the ability to control energy resource costs depending on the modes of motion for specific types of soils, and to determine the characteristics of different types of soil.*

*Key words: soil; rheological properties; energy approach; residual deflections of the movement surface.*

### **Прогрессивные методы исследования процесса образования колеи в результате многократного проезда лесных машин**

**Мачуга О.С., Щупак А.Л., Бойко М.М.**

*Аннотация. Для изучения особенностей процесса колееобразования в результате многократного проезда лесных машин предложено сочетание современных теоретических и экспериментальных методов. Для формирования математических моделей применяется энергетический подход, основанный на эксерго-энергетическом балансе диссипативных процессов при контакте колеса машины с грунтовой поверхностью движения. Количественные оценки получены путем инженерных аппроксимаций энергии различных типов деструкционных процессов. Сопоставление полученных данных с результатами полевых экспериментальных исследований указывает на адекватность теоретических результатов, возможность управлять энергетическими затратами в зависимости от режимов движения для конкретных типов почв и позволяют определить характеристики различных типов почвы.*

*Ключевые слова: почва; реологические свойства; энергетический подход; остаточные прогибы поверхности движения.*

#### **Список літератури**

1. Библюк, Н. І., Герис М. І., Бойко М. М., Щупак А. Л., Шевченко Н. В. Лісотранспортні засоби: конструкція і розрахунок. Частина 1. Загальне компонування. Спеціальне обладнання : навч. посібник / Н. І. Библюк, М. І. Герис, М. М. Бойко, А. Л. Щупак, Н. В. Шевченко. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2014. – 400 с.
2. Базарбаев, Н. Энергетика технологических процессов в строительном производстве / Н. Базарбаев, Д. М. Ярошев. – Ташкент: Изд-во «Фан» УзССР, 1980. – 112 с.
3. Божидарник, В. В. Теорія пружності. Т.1 / В. В. Божидарник, Г. Т. Сулим. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2012. – 551 с.
4. Мачуга, О. С. Розвиток наукових засад енергетичного підходу в розв'язуванні проблем взаємодії машин із робочим середовищем : автореф. дис. ... д. техн. наук. : 05.05.04 / О. С. Мачуга; НЛТУУ. – Львів: ФОП Кепешук П. М., 2019. – 48 с.
5. Цыгович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цыгович. – Москва: Высшая школа, 1983. – 288 с.
6. Биргер, И. А. Сопротивление материалов / И. А. Биргер, Р. П. Мавлютов. – Москва: Наука, 1986. – 560 с.