

## Мінімізація втрат потужності тягово-транспортних засобів при русі по опорній поверхні, яка деформується

О. О. Можасєв, Г. А. Кучук, Д. В. Швец, В. М. Третьак, М. В. Третьак,  
В. Р. Остропілець, В. В. Марков, М.О. Можасєв, Т. П. Колісник,  
А. С. Нечаусов

Дослідження присвячено розробленню методу мінімізації втрат потужності тягово-транспортних засобів при русі по опорній поверхні з утворенням колії. Метою даного дослідження є підвищення тягового коефіцієнту корисної дії позашляхових тягово-транспортних засобів шляхом визначення та мінімізації втрат потужності на утворення колії на опорній поверхні під впливом ходових частин засобу. Підвищення коефіцієнту корисної дії тягово-транспортних засобів, котрий складає 55÷65 %, є пріоритетним напрямом розвитку механізації сільського господарства. Частина втрат, які залежать від конструкції засобу, в процесі експлуатації майже не контролюється. Але на суттєві втрати в ходових системах, які доходять до 20 %, можна впливати. Суть впливу полягає в узгодженні налаштування ходових систем тягово-транспортних засобів із станом опорної поверхні. Зокрема, в процесі даного дослідження був проведений аналіз величин потужностей, що витрачаються на переміщення елементів системи «остов машини – підвіска – ходова система – опорна поверхня, яка деформується» на підставі визначення силових та кінематичних факторів.

На підставі прямих вимірювань визначаються втрати потужності ходовими системами на утворення колії на опорній поверхні та переміщення елементів ходової системи. Запропоновано визначати потужність, яка витрачається на утворення колії здійснювати шляхом множення частки сили ваги, яка припадає на відповідний рушій на швидкість руйнування опорної поверхні. На підставі отриманих результатів та аналізу експериментальних даних зроблено такий висновок. Запропонована методика визначення втрат потужності на утворення колії тягово-транспортними засобами на опорній поверхні дозволяє обґрунтовувати вибір параметрів ходових систем з метою підвищення тягового коефіцієнту корисної дії

Ключові слова: тягово-транспортний засіб, ходова система, втрати потужності, сніговий покрив

### 1. Вступ

Підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) тягово-транспортних засобів (ТТЗ) є пріоритетним напрямом розвитку механізації сільського господарства. Відомо, що на сьогодні тяговий ККД тракторів складає 55÷65 % [1, 2]. Тому частина втрат потужності є дуже суттєвою. На втрати впливає багато чинників, зокрема, немалий відсоток втрат залежить від конструкції тягово-

транспортного засобу. Частина втрат, які залежать від конструкції засобу, в процесі експлуатації майже не контролюється. Але на суттєві втрати в ходових системах, які доходять до 20 %, можна впливати. Суть впливу полягає в узгодженні налаштування ходових систем тягово-транспортних засобів із станом опорної поверхні. Зокрема можна мінімізувати втрати потужності тягово-транспортних засобів при русі по опорній поверхні з утворенням колії. Ще дозволить підвищити значення тягового коефіцієнту корисної дії, отже розроблення методу мінімізації втрат потужності тягово-транспортних засобів при утворенні колії є актуальним напрямом досліджень.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

В роботі [1] наведені результати експериментальних досліджень з визначення частки розподілення енергопоглинання шин та амортизаторів в системі «колесо-підвіска». У якості тягово-транспортного засобу розглядалися військові броньовані машини. Показано, що на характеристики перерозподілу потужності суттєво впливають як характеристики амортизаторів так і тиск повітря в шинах. Але авторами тільки поставлено завдання розробки методу зменшення втрат потужності та не запропоновані шляхи його вирішення. В роботі [2] розглянуті сучасні конструкції ТТЗ різного призначення. Наведено декілька підходів для зменшення втрат потужності. В роботі [3] проаналізований перерозподіл потужностей в залежності від зміни їх маси та властивостей опорної поверхні. З метою зменшення втрат потужності для автомобілів підвищеної прохідності та причепів сільськогосподарського призначення пропонується проводити контроль тиску повітря в шинах. В роботі [4] авторами додатково запропоновано враховувати кількість опорних коліс для автомобільних потягів з підйомними мостами та тракторів з пристроями для здвоєння та навіть зтроєння коліс. В роботі [5] показано, яким чином пневматичні пружні елементи в системах підвіски мають можливість адаптувати їх жорсткість в залежності від зміни маси ТТЗ. В роботі [6] проведено аналіз змін коефіцієнту демпфування амортизаторами відповідно до стану мікропрофілю опорної поверхні. Але у роботах [2–6] не розглянуто питання мінімізації втрат потужності на утворення колії на опорній поверхні під впливом ходових частин тягово-транспортного засобу. Даному питанню приділяли увагу у роботах [7–9]. В класичній теорії руху ТТЗ по опорній поверхні, яка деформується, величина потужності що витрачається на деформацію опорної поверхні визначається на підставі визначення сили опору руху за допомогою коефіцієнтів опору руху різних типів рушіїв на різних опорних поверхнях [6]. У відомій роботі [8] звернута увага на енергетичні процеси, які відбуваються при русі колеса по опорній поверхні, яка деформується. Але в [9] показано, що для практичних розрахунків отримані залежності досить складні, тому що при складанні математичної моделі потрібно враховувати забагато параметрів. Тому виникає завдання розробки методу, який дозволить спростити математичну модель та зменшити обчислювальну складність розрахунків. Крім того, у роботах [7–9] не проводиться обґрунтування вибору параметрів ходових систем. Отже, все

вищенаведене дозволяє стверджувати необхідність проведення дослідження щодо можливості мінімізувати втрати потужності тягово-транспортних засобів при утворенні колії.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є розробка способу мінімізації втрат потужності тягово-транспортних засобів при русі по опорній поверхні з утворенням колії. Це можливо за рахунок підвищення тягового коефіцієнту корисної дії позашляхових тягово-транспортних засобів під впливом ходових частин тягово-транспортного засобу.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити потужність, що витрачається на утворення колії при русі по опорній поверхні, яка деформується;
- провести дослідження границь варіювання значень необхідної потужності для утворення колії в залежності від різних параметрів як руху, так і тих, що характеризують тягово-транспортного засіб.

### 4. Визначення потужності, що витрачається на утворення колії

На рис. 1 показано ланцюг основних елементів системи, в яких втрачається потужність на шляху від двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) до створення тягової потужності. Частина втрат, які залежать від конструкції ТТЗ, в процесі експлуатації майже не контролюється. Але на суттєві втрати в ходових системах, які доходять до 20 %, можна впливати.

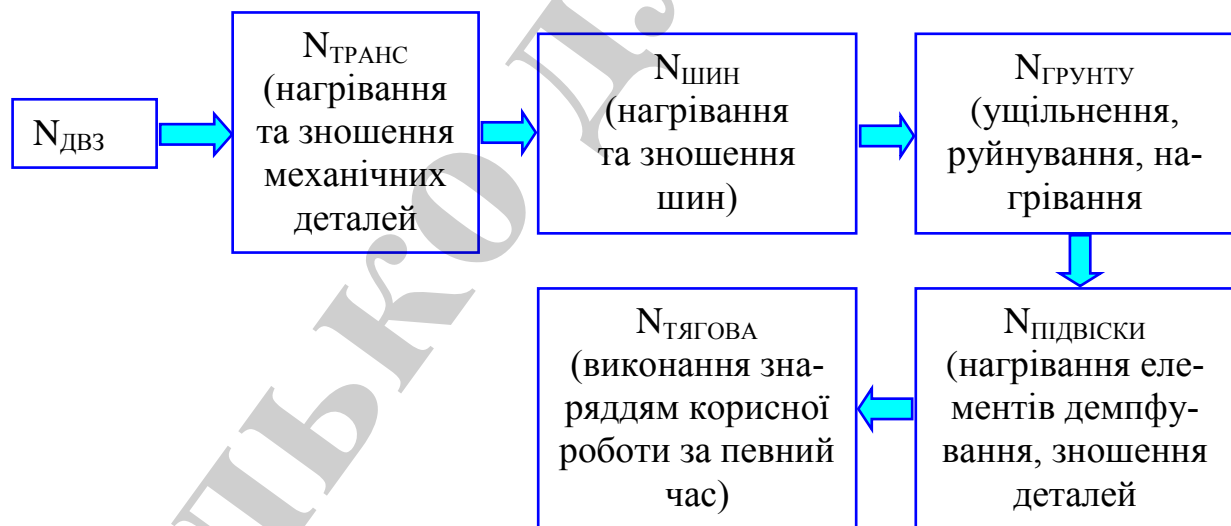


Рис. 1. Втрати механічної потужності при передачі від ДВЗ до тягового пристрою ТТЗ

Суть впливу полягає в узгодженні налаштування ходових систем ТТЗ із станом опорної поверхні. Одним із критеріїв узгодження є визначення втрат потужностей в елементах системи «остов – підвіска – колеса – опорна поверхня».

На підставі досліджень з визначення тиску в ґрунті за допомогою методик геофізичної електророзвідки (чотирьохелектродна установка Шлюмберже у складі автокомпенсатора електророзвідки АЕ-72) [10, 11] було визначено в реальних умовах руху присутність пружної складової деформації від ходової системи трактора Т-25, як показано на рис. 2.

З реальних досліджень на дослідній ділянці Національного наукового центру «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», Київська область, Васильківський район, смт Глеваха, Україна (ННЦ «ІМЕСГ») встановлено, що пружна складова деформації ( $\Delta p$ ) в певних умовах стану ґрунту на глибині 20 см становить 20 % від максимальної деформації ( $\Delta \max$ ). Також пружна складова деформації становить 25 % від пластичної деформації.

Значне зменшення деформації ґрунту при повторних навантаженнях підтверджується в роботах [12, 13].

Загальновідомо, що механічна потужність  $N$  визначається скалярним добутком вектора сили на вектор швидкості (1).

$$N = F \cdot V \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

де  $F$  – величина сили;  $V$  – величина швидкості;  $\alpha$  – кут між векторами сили та швидкості.

Таким чином, потужність, яка витрачається на утворення колії ходовою системою ТТЗ, буде залежати від сили, яка створює цю колію, та швидкості, з якою вона утворюється.

Сила, під впливом якої утворюється колія, в стаціонарних умовах при русі по рівній горизонтальній опорній поверхні є силою ваги –  $G$ , як показано на рис. 3.

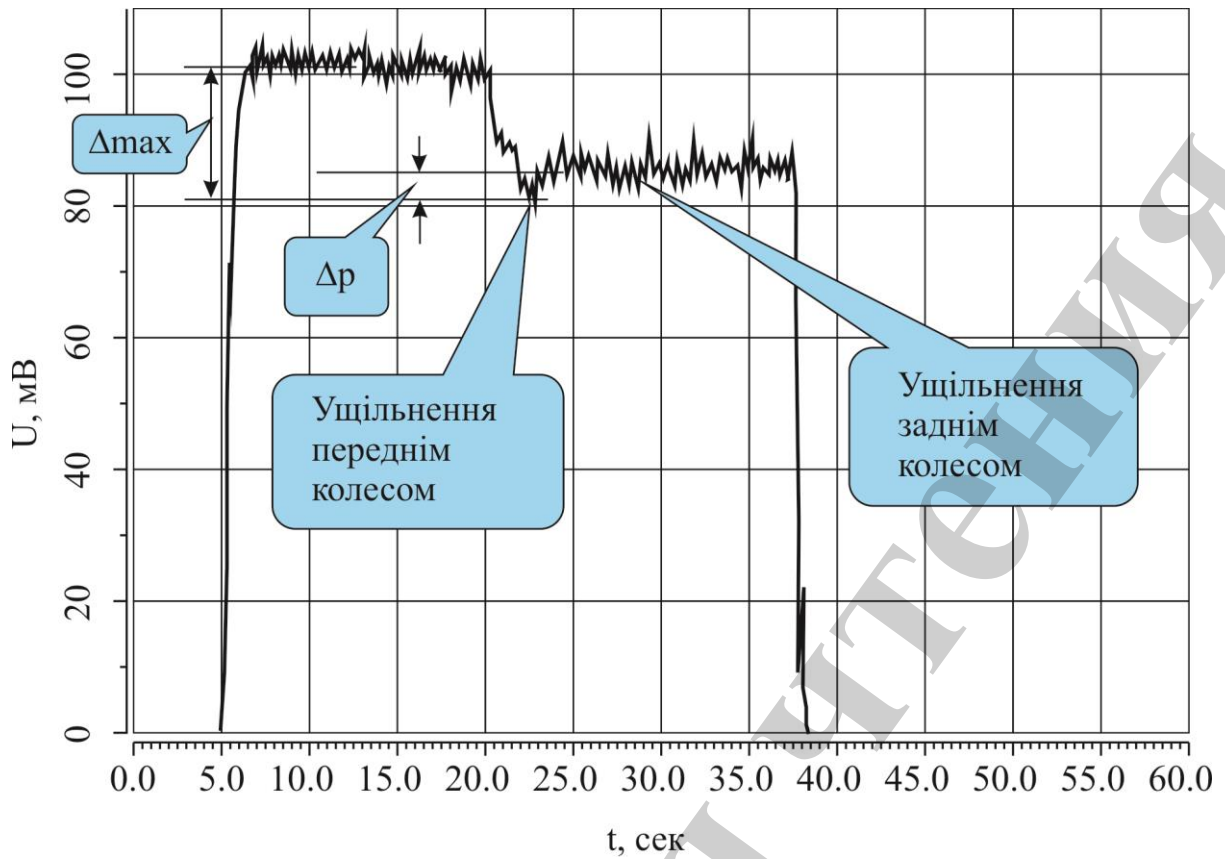


Рис. 2. Приклад визначення відносних величин пружної та пластичної деформації ґрунту під впливом ходової системи трактора Т-25

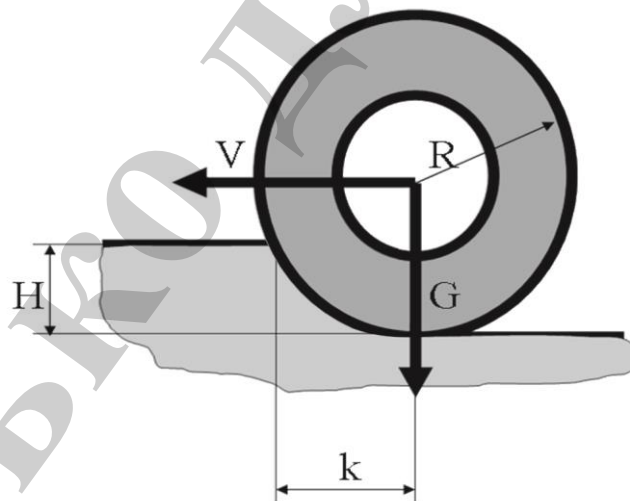


Рис. 3. Визначення швидкості утворення колії

Швидкість, з якою утворюється колія глибиною  $H$ , уявляє її диференціал за часом –  $V_k = \frac{dH}{dt}$ . Вона залежить від таких параметрів:

- глибина колії,
- швидкість руху ТТЗ ( $V$ ),
- радіус кочення колеса ( $R$ ).

Для визначення середнього значення  $V_k$  приймаємо такі припущення:

$$V = \text{const}, \quad R = \text{const}.$$

Тоді час утворення колії залежить від довжини шляху ущільнення  $k$  та швидкості руху  $V$ , тобто

$$t = \frac{k}{V}. \quad (2)$$

За допомогою геометричних перетворень з рис. 4 визначається залежність  $k$  від  $R$  та  $H$ .

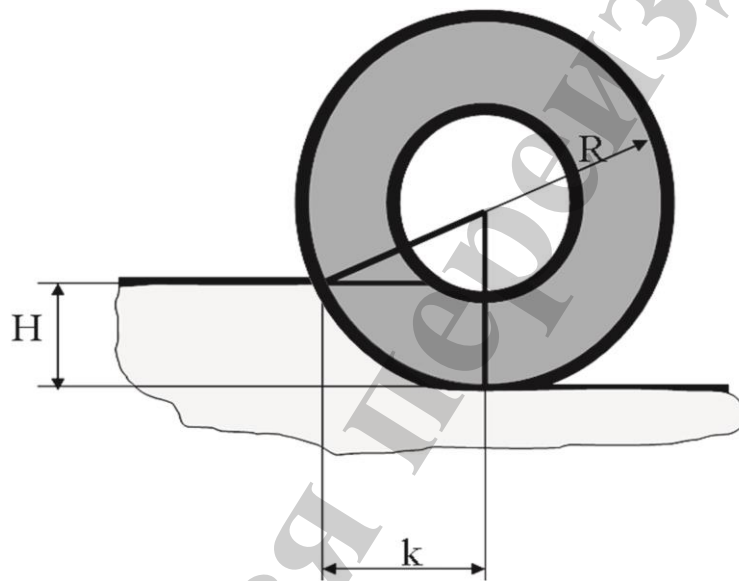


Рис. 4. Визначення довжини шляху ущільнення  $k$

$$k^2 = R^2 - (R - H)^2; \quad (3)$$

$$k = \sqrt{2RH - H^2}; \quad (4)$$

$$t = \frac{\sqrt{2RH - H^2}}{V}; \quad (5)$$

$$V_k = \frac{HV}{\sqrt{2RH - H^2}}; \quad (6)$$

$$N_k = \frac{GHV}{\sqrt{2RH - H^2}}. \quad (7)$$

Вираз під коренем має бути позитивною величиною, тобто

$$2RH - H^2 > 0,$$

тоді

$$2R > H. \quad (8)$$

Реальні значення глибини колії не можуть бути більше кліренсу ТТЗ та варіюються в межах  $0 \leq H \leq 0,4$  м.

Таким чином, радіус колеса також може бути від 0 до  $\infty$ , але для малих значень радіуса та глибини колії необхідно дотримуватись нерівності (8).

Розрахунки за формулами (1)–(8), їх порівняння з відомими результатами та моделювання проводилось у хмарному середовищі [14, 15]

### 5. Дослідження границь варіювання значень необхідної потужності для утворення колії

На рис. 5, 6 наведено графіки розрахунку необхідної потужності для утворення колії.

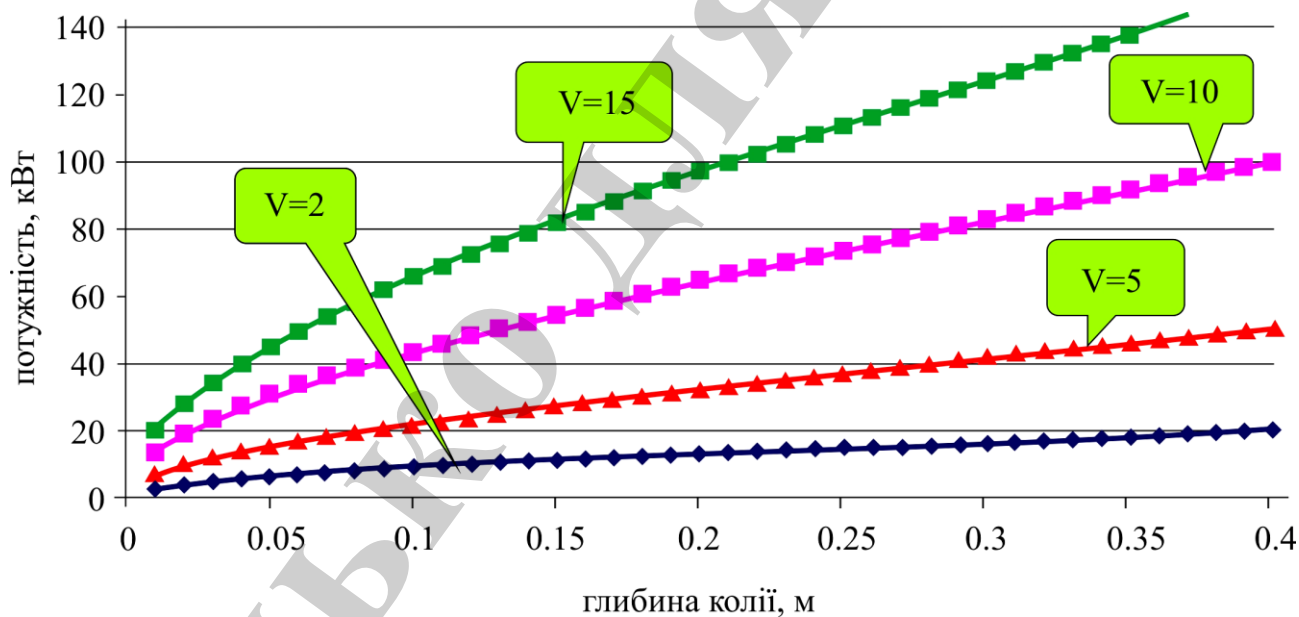


Рис. 5. Залежність необхідної потужності для утворення колії при різних швидкостях руху та  $R=0,64$  м,  $G=15$  кН

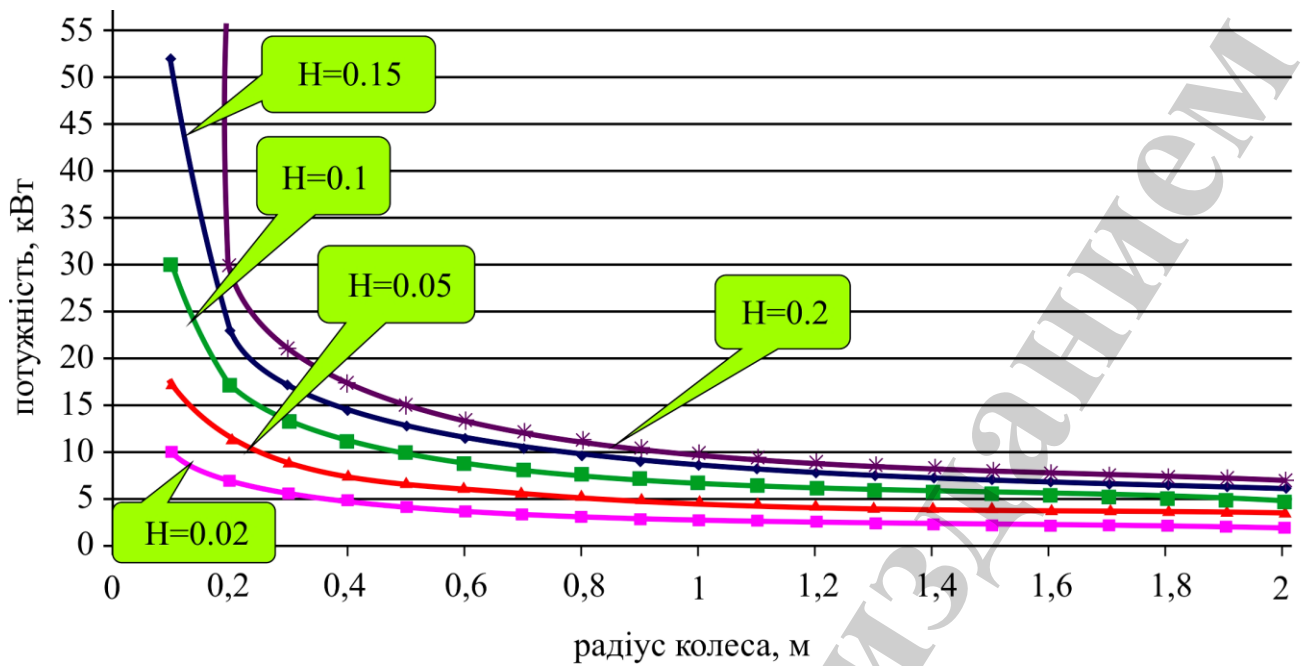


Рис. 6. Залежності величини потужності, що витрачається на утворення різних глибин колії від радіуса колеса

З графіків рис. 6 видно, що потужність стрімко зростає на перших 5 см утворення глибини колії, а потім спостерігається майже лінійна залежність. Слід відмітити вплив швидкості на потужність утворення колії (рис. 6). Так за припущення, що кожне колесо ТТЗ колісної формули 4К4б та маси 6 т утворює колію глибиною 0,15 м, то для руху із швидкістю 15 м/с (54 км/год) необхідно витратити потужність  $80 \times 4 = 320$  кВт (435 к. с.).

Тривимірні залежності, які наведені на рис. 7, 8, показують більшу кривизну залежності величини потужності від радіуса колеса ніж залежності від глибини колії. З цього можна зробити висновок про вибір максимально можливого діаметру передніх коліс ТТЗ з колісною формулою 4К2а та 4К4а. Вплив ваги та швидкості руху ТТЗ на величину потужності для утворення колії показано на рис. 9.



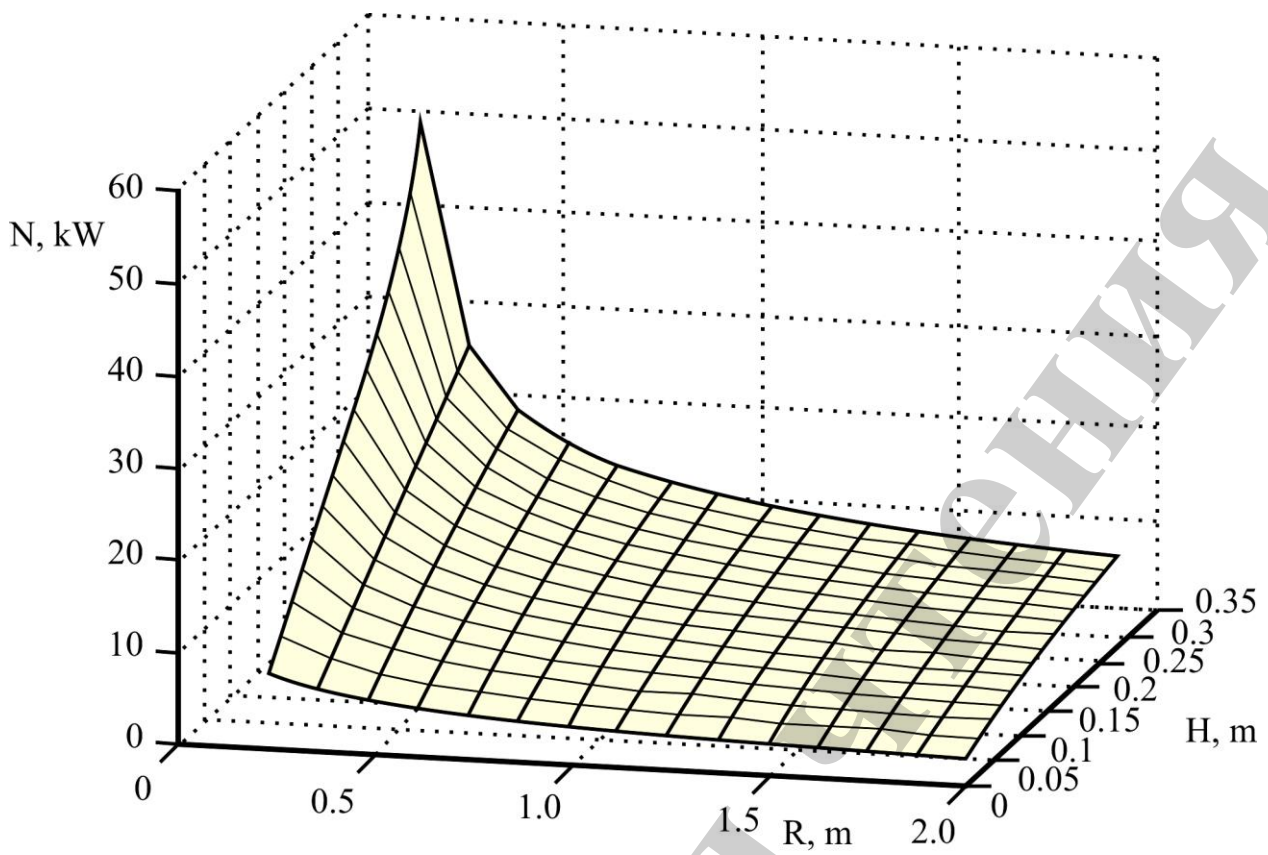


Рис. 7. Поверхня залежності потужності необхідної на створення колії від глибини колії та радіуса колеса при  $G=15$  кН,  $V=2$  м/с

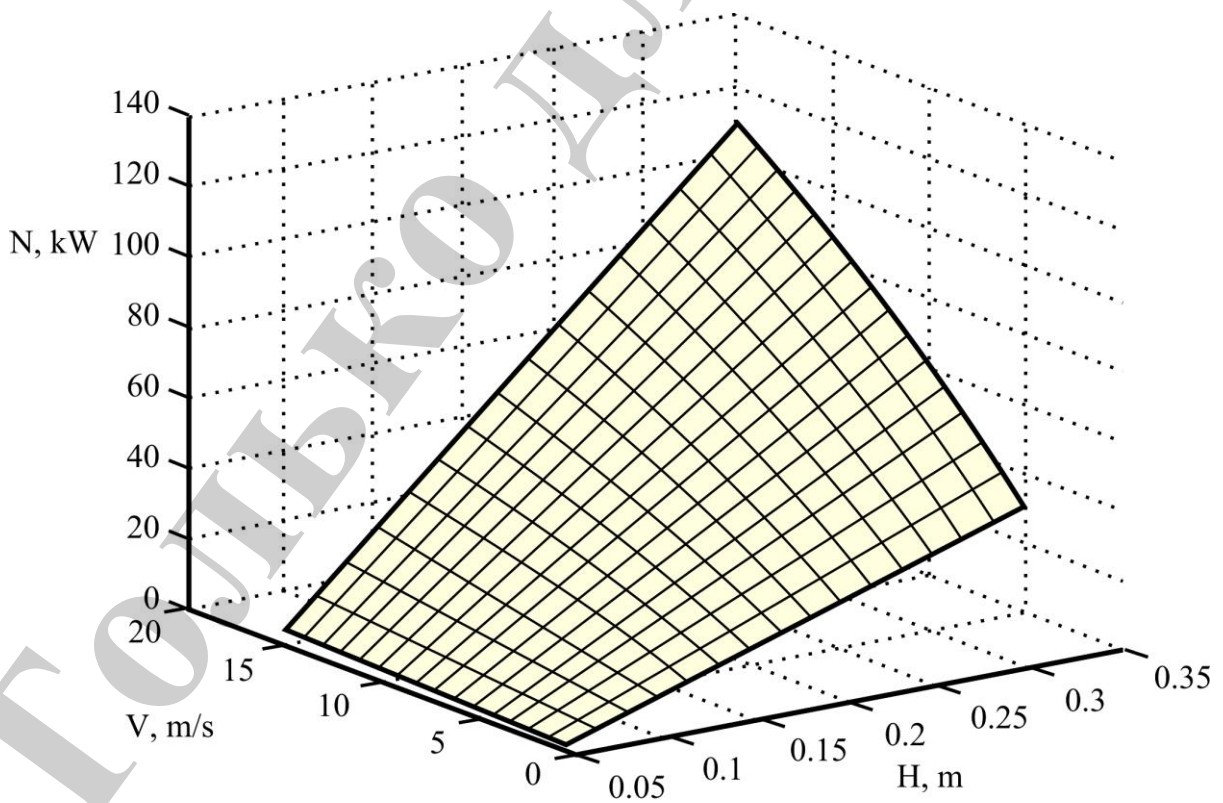


Рис. 8. Поверхня залежності потужності необхідної на створення колії від глибини колії та швидкості руху при  $G=15$  кН,  $R=0,64$  м

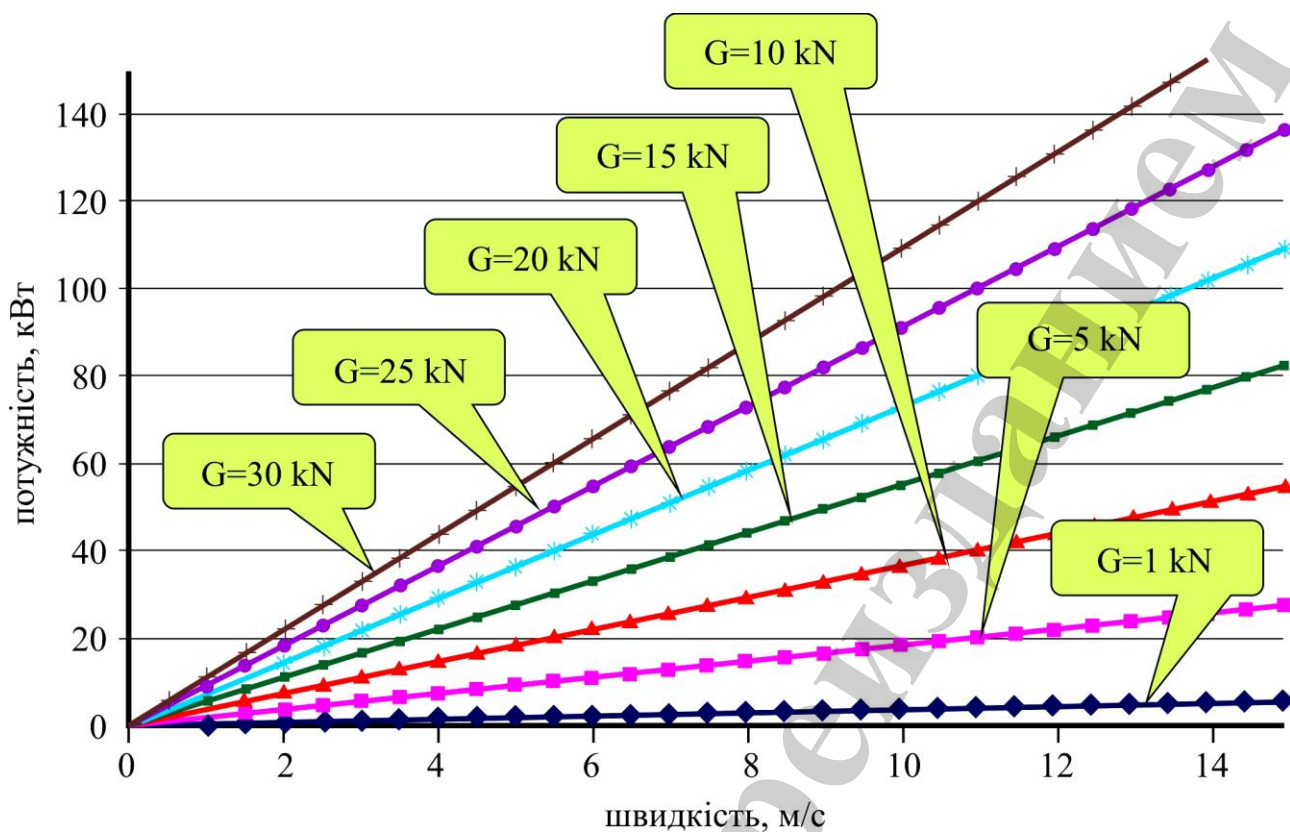


Рис. 9. Семієство залежностей величин потужностей на утворення колії від швидкостей руху та нормальної сили, яка утворює колію

Як бачимо із залежності (6), на величину середньої швидкості утворення колії  $V_k$  впливає радіус колеса  $R$ . Для ідеального гусеничного рушія  $R=\infty$ , тоді  $V_k=0$  і  $N_k=0$ . В цьому випадку  $V_k$  замість величини  $k$  підставляється величина опорної поверхні гусеничного рушія [15].

### 6. Перевірка запропонованого методу в умовах глибокого снігового покриву

Для випробувань був задіяний гусеничний ТТЗ для геофізичних потреб [16], який представлено на рис. 10. Випробування цього ТТЗ проводились в умовах глибокого снігового покриву – до 1,5 м, що видно з рис. 11.

В статичних умовах (при стоянці) ходова частина гусеничних рушіїв, як енергетичного, так і технологічного модулів, вирівнювалась паралельно опорній поверхні, що видно з рис. 12. А при русі передня частина гусеничного рушія енергетичного модуля піднімалась відносно задньої частини цього ж рушія, як показано на фото рис. 13.

Таким чином, швидкість утворення досить глибокої колії (кліренс ходових частин енергетичного та технологічного модулів було збільшено до 0,45 м) була досить невеликою. Це дозволило зчленованому повнопривідному гусеничному ТТЗ повною масою більше 18 тон впевнено рухатись на болотохідному варіанті траків рушія. При цьому рух відбувався на другій або першій передачі адаптованої моторно-трансмісійної установки трактора Т-150. Впевненість руху досягалася незалежно від глибини снігового покриву



Рис. 10. Випробування зчленованого гусеничного транспортного засобу



Рис. 11. Занурення в сніговий покрив



Рис. 12. Горизонтальне положення гусеничного рушія нерухомого ТТЗ на глибокому сніговому покриві



Рис. 13. Поступове занурення гусеничного рушія в сніговий покрив зменшує потужність на утворення колії

Аналогічна ситуація виникала при русі бульдозера на базі трактора Т-130 з болотохідним гусеничним рушієм. В умовах глибокого снігового покриву рух переднім ходом був неможливим з причини суттєвого зміщення центру мас трактора відносно опорної частини рушія вперед. В такому режимі швидкість утворення колії була великою. А при русі заднім ходом, трактор разом з рушієм

розташовувались під певним кутом до опорної поверхні та поступово зминали сніговий покрив при утворенні колії. В такому режимі руху потужність, яка витрачалась на утворення колії, була значно меншою і потужності двигуна в 130 к. с. вистачало для забезпечення стійкого руху трактора. Це явище підтверджується відомими дослідженнями з використанням спеціального самохідного гусеничного візка із змінними параметрами [16].

На підставі вимірювань відносних швидкостей елементів підвіски та результатів стендових випробувань коефіцієнту демпфування пристроїв амортизації можна визначити потужність, яка перетворюється в тепло за допомогою амортизаторів. Визначивши потужності всіх складових елементів системи загальновідомими формулами визначається ККД системи.

## **6. Обговорення результатів дослідження втрат потужності на утворення колії тягово-транспортними засобами**

Запропонований спосіб дослідження втрат потужності на утворення колії тягово-транспортними засобами на опорній поверхні дозволив на підставі елементарних розрахунків обґрунтувати вибір параметрів ходових систем.

Особливість запропонованого рішення – можливість обрати ті значення основних параметрів ходових систем, що дозволяють підвищити тяговий коефіцієнт корисної дії. За рахунок підвищення тягового ККД вдалося досягти зменшення втрат потужності на утворення колії тягово-транспортними засобами на опорній поверхні.

Перевагами даного дослідження в порівнянні з існуючими аналогами є можливість мінімізувати втрати потужності на утворення колії на опорній поверхні під впливом ходових частин тягово-транспортного засобу. На відміну від більшості існуючих класичних підходів, запропонований спосіб дозволяє визначити границі варіювання значень необхідної потужності для утворення колії. Крім того, при моделюванні руху колеса по опорній поверхні, яка деформується, на відміну від існуючого класичного підходу, суттєво зменшена обчислювальна складність розрахунків. Особливо важливими отримані результати є для умов пересування ТТЗ на ґрунті, котрий схильний до значної деформації з утворенням глибокої колії. Наприклад, це може бути пересування ТТЗ в умовах глибокого снігового покриву.

Запропонований спосіб дає переваги при визначенні втрат потужності на утворення колії тягово-транспортними засобами, але розрахований тільки при русі опорною поверхнею, яка суттєво деформується.

Розвитком даного дослідження є розробка імітаційної моделі пересування ТТЗ на ґрунті, котрий схильний до значної деформації з утворенням глибокої колії. Це допоможе визначати границі варіювання параметрів ходових частин ТТЗ без проведення практичних випробувань. Також можна буде дослідити зміни величин потужностей, що витрачаються на переміщення елементів системи «остов машини – підвіска – ходова система – опорна поверхня, яка деформується» на підставі визначення силових та кінематичних факторів.

## 7. Висновки

1. Запропонований та обґрунтований спосіб аналітичного розрахунку для визначення потужності, що витрачається на утворення колії при русі по опорній поверхні, яка деформується. Показано, що вона експоненційно зростає на початку утворення глибини колії, а потім спостерігається майже лінійна залежність. Відмічено суттєвий вплив швидкості на потужність при утворенні колії. Зокрема, показано, що поступове занурення гусеничного рушія в сніговий покрив при невеликій швидкості (до 4 м/с) зменшує до 15 % потужність, необхідну на утворення колії.

2. Отримані аналітичні залежності для розрахунку границь варіювання значень необхідної потужності для утворення колії при русі по опорній поверхні, яка деформується. Зокрема, для практичних розрахунків використовуються як параметри руху (величина швидкості, напрям руху, радіус кочення колеса), так і ті, що характеризують тягово-транспортного засіб (вага ТТЗ, величина опорної поверхні, тиск повітря в колесах). Це дозволяє на етапах розробки та в умовах експлуатації на підставі елементарних розрахунків обґрунтовувати вибір параметрів ходових систем з метою підвищення тягового коефіцієнта корисної дії. В свою чергу, це сприяє зменшенню до 20 % втрат потужності на утворення колії в опорній поверхні, яка деформується.

## Література

1. Research on operational characteristics of tyres with run flat insert / Motrycz G., Stryjek P., Jackowski J., Wiczorek M., Ejsmont J., Ronowski G., Sobieszczyk S. // Journal of KONES. Powertrain and Transport. 2015. Vol. 19, Issue 3. P. 319–326. doi: <https://doi.org/10.5604/12314005.1138141>
2. Borkowski W., Motrycz G. Analysis of IED charge explosion on carrier road safety // Journal of KONES. Powertrain and Transport. 2015. Vol. 19, Issue 4. P. 75–82. doi: <https://doi.org/10.5604/12314005.1138310>
3. Panowicz R., Barnat W., Niezgoda T. Numerical survey of the effect of a pressure pulse on selected types of vehicles and their crews // Mechanik. 2011. Issue 5-6. P. 532–534.
4. Исследование гистерезисных потерь при взаимодействии пневматического колёсного движителя с несущей поверхностью / Горшков Ю. Г., Старунова И. Н., Калугин А. А., Гальянов И. В. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 3 (59). С. 74–77.
5. Podzorov A., Prytkov V., Cherkashina E. The vehicle ride comfort increase at the expense of semiactive suspension system // Journal of KONES. Powertrain and Transport. 2011. Vol. 18, Issue 1. P. 463–470.
6. Lozia Z., Zdanowicz P. Optimization of damping in the passive automotive suspension system with using two quarter-car models // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 148. P. 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/148/1/012014>
7. Smith M. C., Swift S. J. Design of passive vehicle suspensions for maximal least damping ratio // Vehicle System Dynamics. 2016. Vol. 54, Issue 5. P. 568–584. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1145242>

8. Bekker M. G. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. The University of Michigan Press, 1969. 846 p.

9. Increasing the mobility of Mars rovers by improving the locomotion systems and their control algorithms / Malenkov M. I., Volov V. A., Guseva N. K., Lazarev E. A. // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35, Issue 11. P. 824–831. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068798x1511012x>

10. Горелов В. А., Масленников Л. А., Тропин С. Л. Прогнозирование характеристик криволинейного движения многоосной колесной машины при различных законах всеколесного рулевого управления // Science and Education of the Bauman MSTU. 2012. Issue 5. P. 75–96. doi: <https://doi.org/10.7463/0512.0403845>

11. Третьяк В. М., Болдовский В. Н., Потапов Н. Н. Метод определения воздействия ходовых систем тягово-транспортных средств на почву // Вестник национального технического университета “ХПИ”. 2007. Вып. 12. С. 58–62.

12. Gorelov V. A., Padalkin B. V., Chudakov O. I. The Development of Power Distribution Law in Transmission of Active Road Based on the Analysis of the Power Factors in the Coupling Device // Science and Education of the Bauman MSTU. 2016. Issue 12. P. 1–17. doi <https://doi.org/10.7463/1216.0852826>

13. Трояновська І. П., Пожидаєв С. П. Моделювання криволінійного руху колісних і гусеничних тракторних агрегатів. Київ: АграрМедіаГруп, 2013. 303 с.

14. Multiservice network security metric / Mozhaev O., Kuchuk H., Kuchuk N., Mozhaev M., Lohvynenko M. // 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/aiact.2017.8020083>

15. Verros G., Natsiavas S., Papadimitriou C. Design Optimization of Quarter-car Models with Passive and Semi-active Suspensions under Random Road Excitation // Modal Analysis. 2005. Vol. 11, Issue 5. P. 581–606. doi: <https://doi.org/10.1177/1077546305052315>

16. Третьяк В. М. Зчленені тяглово-транспортні засоби // Тракторная энергетика в растениеводстве. 2002. Вып. 5. С. 48–52.