

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2  
“Експериментальне визначення коефіцієнтів опору коченню та зчеплення колісного рушія”

*Мета роботи:* дослідження показників взаємодії колісного рушія з опорною поверхнею і впливу параметрів колісного рушія та опорної поверхні на значення коефіцієнтів опору коченню та зчеплення.

*Обладнання:* автомобіль-тягач (лебідка), динамометр, автомобіль з колісним рушієм, що досліджується, інструкція з правил техніки безпеки.

Параметри, що змінюються:

- тип опорної поверхні (суха, волога асфальтобетонна дорога; суха, волога, ґрунтова дорога; площадка з трав'янистим покриттям);
- навантаження на рушій (порожній автомобіль; автомобіль з повним навантаженням);
- тиск повітря в шинах (номінальний -  $P_{\text{ном}}$ ; підвищений -  $P_2=1,1 P_{\text{ном}}$ ; знижений -  $P_3=0,8 P_{\text{ном}}$ ).

*Порядок виконання роботи:*

1. Встановити необхідні значення тиску повітря в шинах автомобіля і навантаження на рушій.
2. Поставити автомобілі на певну опорну поверхню і з'єднати їх буксирним тросом через динамометр.
3. Під час буксирування зафіксувати значення сили на гаку тягача (при визначенні коефіцієнту опору коченню).
- 3.1. Під час буксирування загальмувати колеса автомобіля, що буксирується і зафіксувати значення сили на гаку тягача (при визначенні і коефіцієнта зчеплення).
4. Пункти-1; 2; 3; 3.1 повторити при змінах опорної поверхні, навантаження і тиску повітря в шинах.
5. Побудувати графіки:  $f_r=f(G_a)$ ;  $f_r=f(P_{\text{пов}})$ ;  $\varphi=f(G_a)$ ;  $\varphi=f(P_{\text{пов}})$  на різних поверхнях.
6. Зробити висновки щодо впливу на коефіцієнти опору коченню та зчеплення типу і стану опорної поверхні, навантаження на рушій та тиску повітря в шинах.

Теоретичні відомості

*Сили і моменти, що діють на автомобіль.*

Визначення швидкостей і прискорень транспортного засобу може бути проведене на основі методик теоретичної механіки. Для спрощення вирішення цієї задачі без суттєвого впливу на точність результату приймають такі припущення:

- Автомобіль симетричний відносно поздовжньої осі;
- Дорожні умови під всіма колесами однакові;
- Взаємні переміщення окремих мас автомобіля відсутні;
- Нормальні реакції дороги прикладені до середини контактної поверхні;
- Сили, що діють на міст, можуть бути приведені до його середини.

Розглянемо в загальному випадку прискорений рух автомобіля-тягача на підйом під кутом  $\alpha$  (рис.1.3).

Всі сили, що діють на автомобіль-тягач поділяються на три групи: рушійні, опору руху, нормальні до напрямку руху.

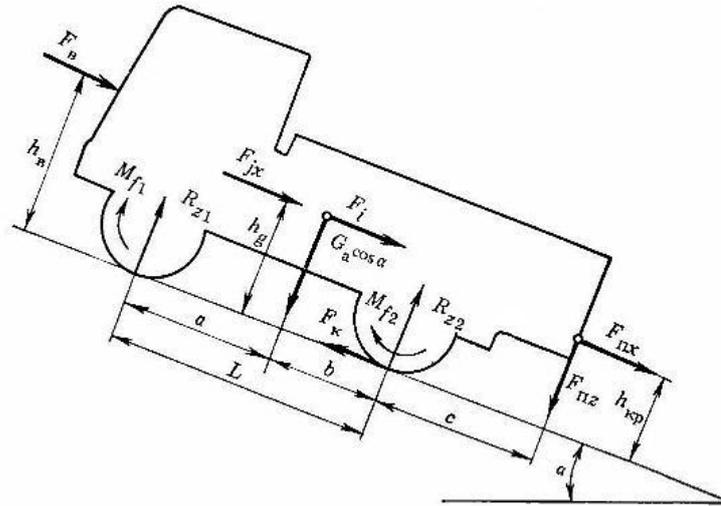


Рис 1.3. Схема сил і моментів, що діють на автомобіль у загальному випадку руху

До першої групи відносяться рушійні сили:

- колова сила на ведучих колесах  $P_p$ ;

До другої групи – сили опору руху :

- моменти опору кочення коліс  $M_{f1}$  і  $M_{f2}$ ;
- сила опору повітря  $P_w$ ;
- повздовжня складова сили тяжіння  $P_h = G_a \sin \alpha$ ;
- сила інерції  $P_j$  ;
- повздовжня складова сили опору причепа  $P_{пнх}$  ;

До третьої групи – сили, перпендикулярні до опорної поверхні :

- нормальні реакції дороги  $R_{z1}$  ,  $R_{z2}$  ;
- нормальна складова сили тяжіння  $G_a \cdot \cos \alpha$ ;

Сила тяги  $P_p$  – колова сила на ведучих колесах - виникає за рахунок крутного моменту, переданого трансмісією від двигуна. Вона визначається за наступною формулою:

$$P_p = \frac{M_k}{r_d} \quad (1.13)$$

де:  $M_k$  – крутний момент на ведучих колесах автомобіля;

$r_d$  – динамічний радіус ведучого колеса.

В свою чергу величина крутного моменту на ведучих колесах автомобіля дорівнює:

$$M_k = M_e \cdot u_k \cdot u_{dk} \cdot u_{pk} \cdot u_0 \cdot u_{bp} \cdot u_{kp} \cdot \eta_T \quad (1.14)$$

де:  $M_e$  – крутний момент на колінчастому валу двигуна автомобіля;

$u_1$  - відповідно передавальні числа (за їх наявності):  $u_k$  – коробки передач;  $u_{dk}$  – додаткової коробки;  $u_{pk}$  – роздавальної коробки;  $u_0$  – головної передачі;  $u_{bp}$  – бортового редуктора;  $u_{kp}$  – колісного редуктора;

$\eta_T$  – механічний К.К.Д трансмісії.

Сила опору коченню коліс.

$$P_{fa} = \sum P_{fi} = \sum G_{ki} f_{ri}$$

Механічну енергію, яка підводиться до колеса, можна виразити у вигляді суми робіт:

$$E_k = A_{ш} + A_z + A_m + A_l + A_w$$

де:  $A_{ш}$  – енергія, розсіяна в матеріалі шини (90-95% від  $E_k$ );

$A_z$  – енергія витрачена на деформи опорної поверхні;

$A_m, A_l$  – енергія витрачена на тертя і подолання сил липкості;

$A_w$  – енергія витрачена на подолання сил опору повітря.

Поділивши обидві частини цього рівняння на  $G_k$  і  $S$  – шлях пройдений колесом за одиницю часу, дістаємо шуканий коефіцієнт опору кочення колеса.

$$f = \frac{E_k}{G_k S} = f_{ш} + f_r + f_m + f_l + f_w$$

Експериментальне визначення – при буксируванні

$$f_a = \frac{P_{fa}}{G_a} = \frac{P_{fa}}{\Sigma(Z_1 + Z_2)}$$

На значення  $f$  впливають: тип шини і її конструктивні особливості, тип і стан опорної поверхні, тиск повітря в шині.

Експериментально визначено, що при  $V_a \leq 15 \text{ м/с}$   $f = \text{const}$ , при збільшенні швидкості він зростає відповідно емпіричній залежності:

$$f = f_0 [1 + (0,006 V_a)^2]$$

де:  $f_0$  – коефіцієнт опору коченню при  $v_a \leq 50 \text{ км/год}$ ,

$v_a$  – поточне значення швидкості руху, км/год.

Значення коефіцієнта опору коченню залежить від типу опорної поверхні:

Дорожні умови	$f_0$
Асфальтобетон	0,01-0,02
Бруківка суха і мокра	0,018-0,025
Грунтова дорога	
Суха	0,03
Мокра	0,20
Пісок	0,1-0,3

Розглянемо природу сили опору ґрунту. Ця сила визначається роботою, яка витрачається на деформацію ґрунту, ковзання шини відносно ґрунту, подолання сил липкості ґрунту до шини, з яких перша складає до 70% (рис.1).

Сила опору ґрунту коченню може бути визначена як відношення роботи, витраченої на переміщення автомобіля на одиницю шляху:

$$P_{f_r} = \frac{A_r}{S} \quad (6)$$

де:  $A_r = S \cdot B \cdot \int_0^{h_r} p \cdot dh_r$  – робота, витрачена на деформацію ґрунту;

$S$  – довжина колії;

$B$  – ширина колії;

$h_r$  – глибина колії;

$p \cdot dh_r$  – залежність нормального тиску колеса на ґрунт від глибини колії.

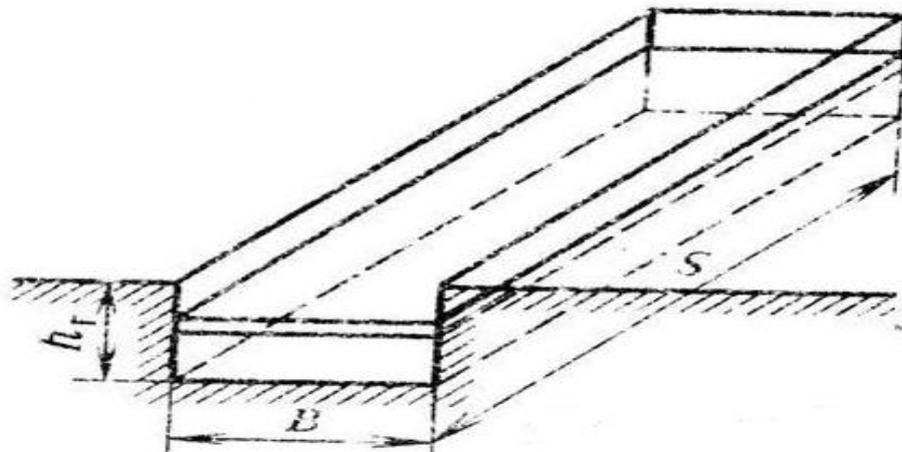


Рис.1. До визначається роботи, витраченої на деформацію ґрунту

За формулою (6) визначаємо силу опору ґрунту коченню:

$$P_{f_r} = B \cdot \int_0^{h_r} p \cdot dh_r \quad (7)$$

відповідно коефіцієнт опору коченню:

$$f_r = \frac{P_{f_r}}{P_{z_k}} = \frac{B}{P_{z_k}} \int_0^{h_r} p dh_r \quad (8)$$

Оцінка деформативних властивостей ґрунту при зануренні в нього штампа (макета шини) використовують як аналітичні, так і емпіричні залежності, з яких найпростіша:

$$p = ch_r^\mu \quad (9)$$

де:  $c$  та  $\mu$  – постійні ґрунту, які визначаються за результатами експерименту.

Підставивши значення  $p = cz^\mu$  в попередню формулу можна визначити:

$$f_r = B \cdot ch_r^{\mu+1} / P_z^{(\mu+1)} \quad (10)$$

звідки видно, що залежність  $f_r = f(h_r)$  нелінійна і зі збільшенням  $h_r$  значення  $f_r$  збільшується.

Для конкретного ґрунту можна визначити  $h_r$  при відомому значенні нормального тиску в контакті

$$h_r = \frac{P^{1/\mu}}{c^{1/\mu}} \quad (11)$$

В свою чергу нормальний тиск в контакті залежить від внутрішнього тиску повітря в шині  $P_{пн}$  та тиску в контакті, зумовленого жорсткістю оболонки (каркасу) шини  $p_o$ :

– для звичайних сил:  $P_{пн} > 0,2 \text{ МПа}$   $P_o = 0,01 \dots 0,02 \text{ МПа}$

- для низького тиску шин:  $P_{\text{п}} < 0,2 \text{ МПа}$   $P_0 = 0,03 \dots 0,07 \text{ МПа}$   
враховуючи, що  $P = P_{\text{п}} + P_0$ , можна записати:

$$h_{\text{г}} = (P_{\text{п}} + P_0)^{1/\mu} / C^{1/\mu} \quad (12)$$

Повне тягове зусилля ведучого колеса обмежується силою зчеплення матеріала шини з ґрунтом та опором ґрунту зрізу ґрунтозачепами (рис.2):

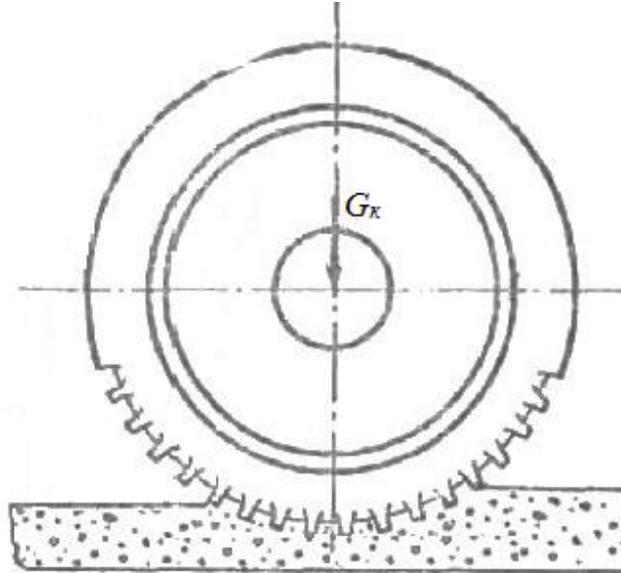


Рис.2. Схема взаємодії протектора еластичної шини з ґрунтом, що деформується.

Сила тертя (зчеплення) матеріала шини із ґрунтом залежить від навантаження ґрунтозачепів на опорну поверхню та коефіцієнта тертя гуми (матеріалу шини) по ґрунту:

$$P_{\text{т}} = K_{\text{н}} \cdot G_{\text{к}} \cdot \varphi_{\text{р}} \quad (13)$$

де:  $K_{\text{н}}$  – коефіцієнт насиченості малюнка протектора.

$\varphi_{\text{р}}$  – коефіцієнт тертя гуми по ґрунту.

Сила зрізу ґрунту, що знаходиться між ґрунтозачепами, залежить від внутрішнього зчеплення частинок ґрунту  $C_0$  та внутрішнього тертя  $\varphi_0$ .

Сила внутрішнього зчеплення частинок ґрунту:

$$P_{\text{с}} = C_0 \cdot F_{\text{к}}(1 - K_{\text{н}}) \quad (14)$$

Сила внутрішнього тертя в ґрунті:

$$P_{\varphi_0} = \varphi_0 \cdot p \cdot F_{\text{к}}(1 - K_{\text{н}}) = \varphi_0 G_{\text{к}}(1 - K_{\text{н}}) \quad (15)$$

Сила зчеплення колеса з ґрунтом дорівнює:

$$G_{\text{к}} \cdot \varphi_{\text{х}} = P_{\text{т}} + P_{\text{с}} + P_{\varphi_0} = (1 - K_{\text{н}})(C_0 F_{\text{к}} + \varphi_0 G_{\text{к}}) \quad (16)$$

звідки можна визначити коефіцієнт зчеплення колеса ґрунтом:

$$\varphi_x = [K_H G_K \varphi_T + (1 - K_H)(F_K C_o + G_K \varphi_o)] / G_K \quad (17)$$

Із цієї залежності видно, що коефіцієнт зчеплення в значній мірі залежить від конструкції шини, навантаження на колесо та характеристик ґрунту.

Оскільки при проектуванні автомобіля характеристики ґрунтів та навантаження на колесо є заданими величинами, то для збільшення коефіцієнта зчеплення підбираються відповідні шини.

#### Контрольні питання:

1. Поясніть фізичну суть коефіцієнта опору коченню і назвіть його складові частини.
2. Пояснити, чому одержані методом буксирування значення коефіцієнта опору коченню є завищеними.
3. Поясніть причину підвищення опору коченню під час руху на ґрунтах, що деформуються, в порівнянні з твердим опорними поверхнями.
4. Сила опору коченню, що зумовлена гістерезисом шини, є зовнішньою чи внутрішньою силою відносно автомобіля?
5. В чому фізична різниця коефіцієнта тертя-кочення та опору коченню колеса?
6. Поясніть фізичну суть коефіцієнта зчеплення рушія з опорною поверхнею.
7. Поясніть різницю в значеннях термінів сили тертя і сили зчеплення.