

УДК 631.312.021

**ДИНАМІКА ВЗАЄМОДІЇ КОРПУСУ ПЛУГА З ПЕРЕШКОДОЮ****Калінін Є.І., к.т.н., доцент, Шуляк М.Л., к.т.н., доцент***(Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка)*

*В статті розглянуто питання удару корпусу плуга о перешкоду з метою виявлення динамічних особливостей процесу. В ході теоретичних досліджень було встановлено, що динаміка процесу удару корпусу з запобіжним механізмом несуттєво відрізняється від удару вільно підвішеного корпусу.*

**Актуальність проблеми.** У зв'язку з можливістю наявності на полі різного роду перешкод у вигляді пнів, великих коренів і т. п. серійні ґрунтообробні знаряддя нерідко виходять з ладу раніше гарантованого заводом-виробником терміну. Це пояснюється недосконалістю засобів захисту їхніх робочих органів. В найбільш важких умовах доводиться функціонувати лемішним плугам, які на відміну від дискових плугів не здатні долати навіть невисокі перешкоди. При цьому застосування дискових плугів менш переважно, оскільки вони не здатні забезпечити такої якості обробки ґрунту, як лемішні.

При зустрічі робочих органів плуга (ножа і корпусу) з високими перешкодами трактористу доводиться вручну за допомогою гідронавісної системи трактора виглубляти і заглиблювати знаряддя перед і за перешкодою. Це призводить до частих зупинок трактора і, як наслідок, підвищених витрат часу і палива.

Одним з методів вирішення даного питання, на сьогоднішній день, є використання системи захисту корпусу від удару як механічного, так і гідравлічного типу. Однак, питання аналізу змін, що вносяться до динаміки удару за рахунок запобіжної системи, досі має як науковий, так і практичний інтерес.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Роботи, що пов'язані з умовами функціонування плугу при експлуатації, передбачають аналіз його взаємодії з перешкодою тільки на рівні розрахунку на міцність окремих деталей, та компонентів робочого органу [1 – 3]. Однак, така система розрахунків дозволяє тільки оцінити ресурс корпусу та забезпечити його зносостійкість і довговічність за показниками надійності, не враховуючи системи запобігання удару в цілому.

**Мета і постановка задачі.** Основною метою роботи є встановлення впливу особливостей системи захисту корпусу на динаміку процесу удару робочого органа з перешкодою.

**Виклад основного матеріалу.** При взаємодії корпусу плуга з перешкодою можна виділити дві фази: перша – удар, при якому положення корпусу з запобіжним механізмом не змінюється; друга – відхилення корпусу під дією сил

з боку перешкоди. Для більшої інформативності, та обмежуючись поставленою метою, досліджуємо першу фазу.

Процес деформації при стереомеханічному ударі в загальному випадку можна розглядати таким, що складається з двох фаз: період зближення, який триває з моменту удару до моменту досягнення максимальної деформації, і період відновлення, що спостерігається до моменту зникнення удару.

Згідно з уявленнями про удар координати точок запобіжного механізму не змінюються при ударі, тому за центр обертання може бути прийнята будь-яка точка. Для визначення величини ударного імпульсу при взаємодії корпусу з перешкодою застосуємо одну із загальних теорем динаміки системи – теорему про зміну при ударі кінетичного моменту системи відносно осі, що перпендикулярна площині креслення. З метою полегшення розгляду в цілому системи розглянемо дві її частини: корпус плуга і запобіжний механізм (рис. 1).

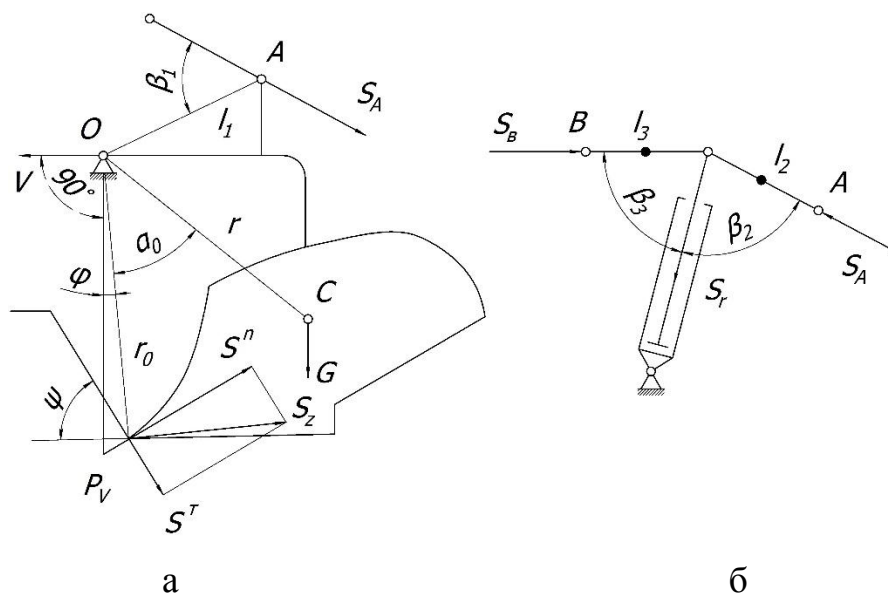


Рисунок 1 – Розрахункова схема ударної взаємодії корпусу плуга з перешкодою:

а – корпус плуга; б – запобіжний механізм

Тоді, для корпусу будемо мати:

$$(K_{oz})_1 - (K_{oz})_0 = I_{oz} \omega - I_{oz} \omega_0 = \sum_{i=1}^n M_{oz}(\bar{S}_k^e), \quad (1)$$

де  $(K_{oz})_0, (K_{oz})_1$  – кінетичний момент корпусу відносно осі  $Oz$ , що перпендикулярна площині креслення, на початку і в кінці удару;  $M_{oz}(\bar{S}_k^e)$  – момент зовнішніх ударних імпульсів, доданих до  $i$ -ї точки відносно осі  $Oz$ ;  $\omega_0, \omega$  – кутова швидкість корпусу на початку і в кінці удару;  $I_{oz}$  – момент інерції корпусу відносно осі  $Oz$ .

Внутрішні ударні імпульси попарно рівні за модулем і протилежні за напрямком, тому сума їх моментів відносно будь-якої вісі дорівнює нулю, тобто

$$\sum_{i=1}^n M_{oz}(\bar{S}_k^i) = 0.$$

Малі величини тривалості ударної взаємодії призводять до виникнення значних сил, що обумовлено рівнянням  $S_k^e = \int_0^{\tau} R_{int} dt$ , тобто нескінченно велика миттєва сила діє нескінченно малий час. При цьому вважається, що ударний імпульс  $S_k^e$  має кінцеву величину, тому додатковими статичними навантаженнями, у тому числі масою ланок запобіжного механізму, можна знехтувати. Ударні імпульси реакцій в шарнірі  $O$  в рівняння (1) не входять, так як моменти цих імпульсів щодо вісі обертання корпусу дорівнюють нулю.

До удару при поступальному русі орного агрегату корпус у відносному русі (щодо рами плуга) перебував у нерухомому стані, тому  $(K_{oz})_0 = 0$ . З урахуванням сказаного, рівняння (1) прийме вигляд:

$$(K_{oz})_1 - I_{oz} \omega = m_k (r^2 + \rho^2) \omega, \quad (2)$$

де  $m_k$  – маса корпусу;  $r$  – відстань від вісі відносного обертання корпусу до його центру мас;  $\rho$  – радіус інерції корпусу відносно його центральної осі інерції.

Удар корпусу плуга о перешкоду, яка може мати довільне положення відносно напрямку руху, породжує нормальний  $S^n$  і тангенціальний  $S^{\tau}$  ударні імпульси в точці контакту  $\bar{S}_{\Sigma} = \bar{S}^n + \bar{S}^{\tau}$ , причому  $S^{\tau} = f S^n$ . Тоді загальний ударний імпульс можна представити у вигляді:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{(S^n)^2 + (S^{\tau})^2} = S^n \sqrt{1 + f^2}, \quad (3)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання носка лемеша по каменю.

З урахуванням останнього рівняння (2) можна представити у вигляді:

$$m_k (r^2 + \rho^2) \omega = \frac{S_{\Sigma} r_0}{\sqrt{1 + f^2}} [\sin(\varphi + \psi) + f \cos(\varphi + \psi)] - S_A l_1 \sin \beta_1. \quad (4)$$

Для визначення впливу гідравлічного імпульсу на величину удару на підставі розрахункової схеми складемо рівняння кінетичного моменту для запобіжного механізму відносно вісі, що перпендикулярна площині креслення і проходить через точку  $B$ , яке прийме вигляд:

$$(K_{Bz})_1 - (K_{Bz})_0 = \sum_{i=1}^n M_{Bz}(\bar{S}_k^e). \quad (5)$$

Ліва частина рівняння дорівнює нулю, так як ударний імпульс  $\bar{S}_B$  відносно вісі обертання в точці  $B$  кінетичного моменту не створює. З урахуванням того, що точка  $A$  належить і корпусу, і запобіжнику, можна записати:

$$\sum_{i=1}^n M_{Bz}(\bar{S}_k^e) = S_A l_3 \sin(\beta_1 + \beta_2) - S_r l_3 \sin \beta_3. \quad (6)$$

З цього виразу визначається ударний імпульс  $S_A$ , що діє уздовж ланки  $l_2$  відносно осі обертання в точці  $B$ . З конструктивних міркувань приймаємо, що  $\beta_1 \approx \beta_2$ . Тоді:

$$S_A = S_r \frac{\sin \beta_3}{\sin(\beta_2 + \beta_3)} = S_r \frac{1}{2 \cos \beta_2}. \quad (7)$$

Гідравлічний ударний імпульс  $S_r = SP\tau$  залежить від тривалості ударної взаємодії корпусу з перешкодою.

Для визначення зміни тиску в гідросистемі в довільному її перерізі з нерухомою рідиною в початковому стані застосуємо формулу, складену для простого трубопроводу, у якого постійні площа поперечного перерізу, приведені модуль і щільність рідини:

$$P(x, t) = P_0 + V_n \left( t - \frac{x}{c} \right) \omega' \Omega. \quad (8)$$

де  $P_0$  – початковий тиск в гідросистемі запобіжників;  $V_n$  – швидкість руху поршня гідроциліндра в кінці удару;  $x$  – координата довжини уздовж вісі трубопроводу;  $c$  – швидкість поширення хвилі в трубопроводі;  $\omega'$  – хвильовий опір трубопроводу;  $\Omega$  – відносна площа трубопроводу.

При цьому зроблені наступні припущення: зберігається закон нерозривності потоку рідини; не враховуються стисливість рідини в гідроциліндрі і гідравлічні втрати в трубопроводі.

Формула (8) показує, що зміна тиску в гідросистемі запобіжного механізму пропорційна швидкості поршня гідроциліндра в кінці удару і хвильовому опору трубопроводу. Останній визначається з виразу виду:

$$\omega' = \sqrt{\rho_0 E} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\frac{1}{E'} + \frac{d}{E'' \delta}}}, \quad (9)$$

де  $\rho_0$  – щільність рідини при атмосферному тиску;  $E$ ,  $E'$ ,  $E''$  – приведений модуль пружності, модуль пружності рідини і матеріалу трубопроводу;  $d$  – внутрішній діаметр трубопроводу;  $\delta$  – товщина стінки трубопроводу.

Виходячи з кінематики запобіжного механізму корпусу, поступальної швидкості орного агрегату і кута скошу перешкоди, визначаємо закон зміни швидкості поршня гідроциліндра в кінці удару.

Для визначення кутової швидкості корпусу плуга в кінці удару скористаємося теоремою Карно, згідно з якою втрата кінетичної енергії для цілком не пружного удару дорівнює  $1 - k/1 + k$  частки кінетичної енергії, що відповідає втраченим швидкостям:

$$T_1 - T_2 = \frac{1 - k}{1 + k} \cdot \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i (u_i - V_i)^2. \quad (10)$$

У даному випадку швидкість перешкоди дорівнює нулю, тому кінетична енергія корпусу на початку удару складе  $T_1 = \frac{1}{2} m_k V^2$ , а в кінці удару –

$$T_2 = \frac{1}{2} m_k u_c^2 + \frac{1}{2} I_c \omega^2.$$

Векторну швидкість довільної  $i$ -ї точки корпусу після удару можна представити як  $\bar{u}_i = \bar{V} + \bar{\omega} \times \bar{r}_i$ , а його кінетичну енергію виразом:

$$T_2 = \frac{1}{2} m_k \bar{V}^2 + m_k \bar{V}(\bar{\omega} \times \overline{OC}) + \frac{1}{2} m_k (\bar{\omega} \times \overline{OC})^2 + \frac{1}{2} m_k \rho^2 \omega^2, \quad (11)$$

а зміну кінетичної енергії при ударі можна представити у вигляді:

$$T_1 - T_2 = m_k r \omega V \cos \alpha_0 - \frac{1}{2} m_k (r^2 + \rho^2) \omega^2. \quad (12)$$

Кінетична енергія, що відповідає втраченим швидкостям, складе:

$$\frac{1}{2} \sum m_i (\bar{u}_i - \bar{V}_i)^2 = \frac{1}{2} m_k (r^2 + \rho^2) \omega^2. \quad (13)$$

Підставляючи знайдені значення (11) і (12) в формулу (10), отримаємо:

$$m_k r \omega V \cos \alpha_0 - \frac{1}{2} m_k (r^2 + \rho^2) \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1-k}{1+k} m_k (r^2 + \rho^2) \omega^2, \quad (14)$$

звідки кутова швидкість корпусу в кінці удару складе:

$$\omega = \frac{V r \cos \alpha_0 (1+k)}{r^2 + \rho^2}. \quad (15)$$

Кутову швидкість післяударного руху корпусу можна визначити також і з кінематики його плоского руху:

$$\omega = \frac{V}{OP_v} = \frac{V \sin \psi}{r_0 \sin(\varphi + \psi)}. \quad (16)$$

Прирівнявши праві частини виразів (15) і (16), отримаємо вираз для коефіцієнта відновлення при ударі, який прийме вигляд:

$$k = \frac{(r^2 + \rho^2) \sin \psi}{r r_0 \cos \alpha_0 \sin(\varphi + \psi)} - 1. \quad (17)$$

Таким чином, удар корпусу об перешкоду не є абсолютно пружним. Аналіз формули (17) показує, що коефіцієнт відновлення  $k$  залежить від кута скосу  $\psi$  перешкоди і розмірів тіл, що підпадають під удар – корпусу і перешкоди.

Відповідно до формули (2)  $k$  змінюється в межах 0,33 ... 0,22.

Підставляючи вирази (7) – (9) і (16) в рівняння (3) і після відповідних перетворень отримаємо:

$$S_z = \frac{m_k (r^2 + \rho^2) V \sin \psi \sqrt{1+f^2}}{r_0^2 [\sin(\varphi + \psi) + f \cos(\varphi + \psi)]} + \frac{(P_0 + V_n \omega' \Omega) S d_1 \sin \beta_1 \sqrt{1+f^2}}{2 r_0 \cos \beta_2 [\sin(\varphi + \psi) + f \cos(\varphi + \psi)]}. \quad (18)$$

Привівши отримане рівняння до канонічного виду і враховуючи, що в даному випадку  $m_k = const$ , а інші параметри запобіжного механізму істотного впливу на ударний імпульс не надають, маємо:

$$S_{\Sigma} = a_1 V + a_2 P \tau; \quad (19)$$

$$a_1 = \frac{m_k (r^2 + \rho^2) \sin \psi \sqrt{1 + f^2}}{r_0^2 [\sin(\varphi + \psi) + f \cos(\varphi + \psi)]}; \quad (20)$$

$$a_2 = \frac{S l_1 \sin \beta_1 \sqrt{1 + f^2}}{2 r_0 \cos \beta_2 [\sin(\varphi + \psi) + f \cos(\varphi + \psi)]}. \quad (21)$$

З іншого боку,  $S_{\Sigma} = R_{\text{ит}} \tau$ . Припускаючи, що тривалість  $\tau$  удару корпусу плуга об перешкоду складає в середньому, 0,0019 с у всьому діапазоні швидкостей зіткнень, отримаємо:

$$R_{\text{ит}} = \frac{a_1 V + a_2 P \tau}{\tau} = \frac{a_1 V}{\tau} + a_2 P. \quad (22)$$

Відповідно до рівняння (22) розрахунковим шляхом побудовані залежності  $R_{\text{ит}} = f(V, \psi)$  (рис. 2).

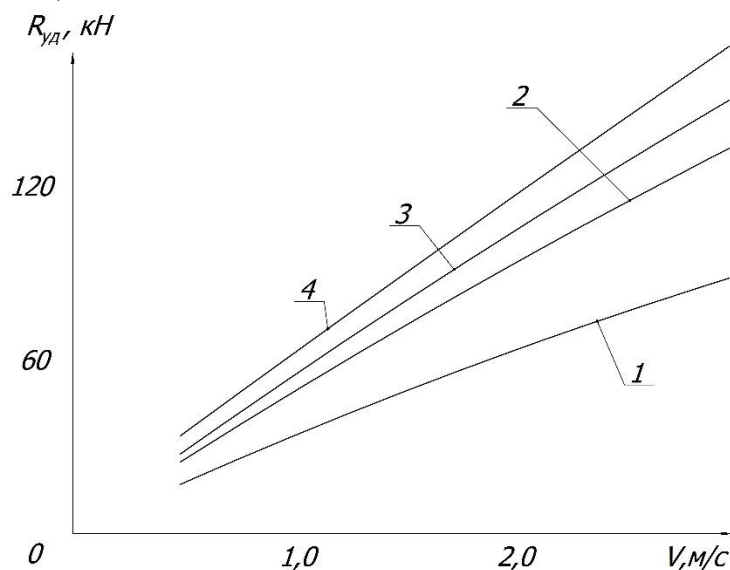


Рисунок 2 – Залежність зміни величини удару від швидкості співударання:

1 –  $\varphi = 0,785$ ; 2 –  $\varphi = 1,05$ ; 3 –  $\varphi = 1,3$ ; 4 –  $\varphi = 1,57$  рад

Аналіз даних залежностей і рівняння (22) показує, що на величину удару при інших рівних умовах в основному впливають швидкість  $V$  наїзду на перешкоду корпусу і його маса  $m_k$ . Вплив на удар в меншій мірі надає гідравлічний ударний імпульс  $S_r$ , величина якого залежно від швидкості наїзду корпусу на перешкоду і кута скосу останнього становить 10 – 20% загальної величини.

**Висновки.** На підставі проведених теоретичних досліджень можна відзначити, що наявність пружних елементів (пневмогідроакумулятора) в запобіжному механізмі значного впливу на вигляд рівняння ударного імпульсу не чинить, так як за вельми малий час удару стан системи не змінюється, тобто

величина удару, що діє з боку перешкоди на корпус, залежить в основному від поступальної швидкості орного агрегату, маси корпусу і жорсткості системи «перешкода-грунт».

### Список літератури:

1. Синеоков Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин [Текст] / Г.Н. Синеоков, И. Н. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 326 с.
2. Булгаков В.М. Агрегування плугів [Текст] / В.М.Булгаков, В.І.Кравчук, В.Т.Надикто. – К.: Аграрна наука. – 2008. – 152 с.
3. Щучкин Н.В. Лемешные плуги и лущильники / Н.В. Щучкин. – М., 1952. – 267 с.
4. Василенко П. М. Основи аналітичних методів землеробської механіки. / П. М. Василенко. – К.: Видавництво НАУ, 1998. – 29 с.
5. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини. / Д. Г. Войтюк, Г.Р. Гаврилюк. – К.: Урожай, 1994. – 446 с.
6. Горячкін В. П. Собрание сочинений в 3-х томах. / В. П. Горячкін. – М.: Колос, 1965. – Т. 1. – 720 с.; Т. 2. – 459 с.; Т. 3. – 512 с.
7. Заика П. М. Избранные задачи земледельческой механики. / П. М. Заика. – К.: Изд-во УСХА, 1992. – 509 с.

### Аннотация

#### Динамика взаимодействия корпуса плуга с препятствием

Калинин Е.И., Шуляк М.Л.

*В статье рассмотрены вопросы с целью выявления динамических особенностей процесса. В ходе теоретических исследований было установлено, что динамика процесса удара корпуса с предохранительным механизмом существенно отличается от удара свободно подвешенного корпуса плуга.*

### Abstract

#### Dynamics of the interaction of the plowing with disabilities

Y. Kalinin, M. Shulyak

*The article discusses the impact of the plow body with an obstacle in order to identify the dynamic characteristics of the process. During the theoretical studies have found that the dynamics of the process of hitting the body with safety mechanism does not differ from the blow freely suspended plow body.*