

АНАЛІЗ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ ВАГИ НАПІВНАЧІПНОЇ МАШИНИ ПРИ ЇЇ ФУНКЦІОНУВАННІ

Є. Калінін, канд. техн. наук,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Проведено імітаційне моделювання динаміки вивантаження транспортованого матеріалу з ковша напівначипного скрепера, при представленні останнього як жорсткого твердого тіла змінної маси, з метою аналізу зміщення його центру ваги.

Ключові слова: *зміщення центру ваги, скрепер, тягова динаміка, трактор.*

Актуальність проблеми. Тягова динаміка трактора як енергетичного засобу формується на підставі нерівномірності тягового опору машин, що взаємодіють з ґрунтом, впливів нерівності опорної поверхні та коливань, що виникають в самому тракторі. Усі ці впливи підсумовуються, перетворюються і надходять на колінчастий вал двигуна у вигляді деякого моменту опору [1]. На даний момент вплив даних факторів вивчено в достатній (але не у вичерпній) мірі. Проте з цих пір не приділено увагу питанню зміни тягово-енергетичних показників трактора в складі МЕЗ з машиною, вага якої змінюється по деякому закону. До таких машин слід віднести, як приклад, скрепери.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Матеріали досліджень [2 – 6] показали, що тягові процеси як для колісних, так і гусеничних тракторів не стаціонарні з математичним очікуванням, яке носить характер низькочастотної складової з амплітудою коливань 10% і вище середнього значення гакового навантаження. Це означає, що практику приведення тягових процесів до стаціонарних, під час вирішення завдань тягової динаміки, слід вважати грубим допущенням, яке може привести до серйозних похибок в розрахунках, оскільки саме низькочастотні коливання, що створюють нестационарність процесу, визначають завантаження і використання потужності двигуна, тобто ті параметри, визначення яких є основним змістом роботи [1].

При цьому, першочерговим питанням є встановлення закономірності зміщення центру ваги напівначипних машин з наступним визначенням впливу даного чинника на формування гакового навантаження.

Мета роботи і постановка задачі. Мета роботи – провести аналіз зміщення центру ваги напівначипного скрепера під час його розвантаження, у поданні останнього як жорсткого твердого тіла змінної маси. Для досягнення

поставленої мети необхідно розробити імітаційну модель динаміки вивантаження матеріалу, що транспортується з урахуванням його характеристик і геометрії ковша.

Основна частина. Розглянемо зміщення центру ваги землерийно-транспортної машини на прикладі напівначипного скрепера ДЗ-74 з примусовим розвантаженням ковша, який агрегується з тракторами тягового класу 3кн. Технічна характеристика скрепера наведена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічна характеристика скрепера ДЗ-74

Параметр	Значення
Об'єм ковша, м ³	8,0
Ширина захвату, мм	2718
Глибина різання, мм	350
Маса без тягача, кг	9500
Габаритні розміри, мм:	
Довжина	7600
Ширина	3078
Висота	3380

Для аналізу розвантаження ковша скрепера представимо останній у вигляді прямокутної трапеції $GMNK$, бічна сторона якої нахилена до нижнього основи на кут φ (рис. 1).

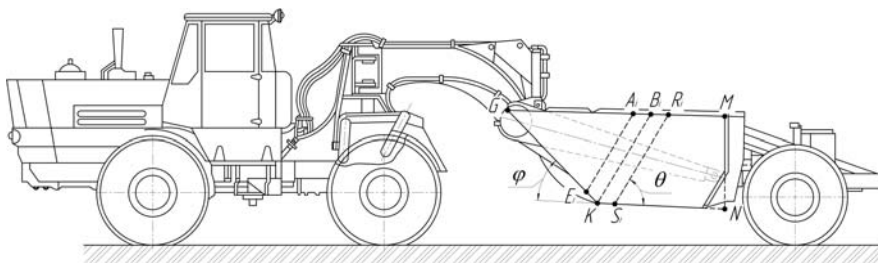


Рисунок 1 – Скрепер ДЗ-74 та його розрахункова схема

Розіб'ємо дану трапецію прямими, що проходять під кутом θ до її нижньої основи, в результаті чого сформується комплекс відрізків – A_iE_i , B_iK , R_iS_i та ін. Використання кута θ обґрунтовується необхідністю подальшого розширення теорії, що полягає в еквівалентності даного кута куту внутрішнього тертя вантажу, що сприяє аналізу впливу характеристики матеріалу, що транспортується на механіку розвантаження скрепера. З рис. 1 видно, що, при такому розбитті, до відрізка B_iK утворюються елементарні

трапеції (наприклад, $A_i E_i K B_i$), а після нього – елементарні паралелограми (наприклад, $B_i K S_i R_i$). У результаті весь процес розвантаження ковша можна представити у вигляді трьох стаціонарних станів, що визначаються різним положенням центра ваги ковша:

1. Ковш повністю заповнений транспортуємим матеріалом – центр ваги скрепера (позначимо його через C_1) одночасно є центром ваги трапеції $GMNK$;

2. Кінцевий етап відкриття заслінки скрепера, що характеризується, в першому наближенні, вивантаженням об'єму GKB_i . Центр ваги скрепера (позначимо його через C_2) є центром ваги паралелограма KB_iMN ;

3. Кінцевий етап переміщення рухомої задньої стінки ковша, який характеризується вивантаженням об'єму KB_iMN . Центр ваги скрепера (позначимо його через C_3) є центром ваги розвантаженої трапеції $GMNK$.

Введемо необхідні системи координат (рис. 2), дві з яких пов'язані з елементарною площею (трапеції, або паралелограма):

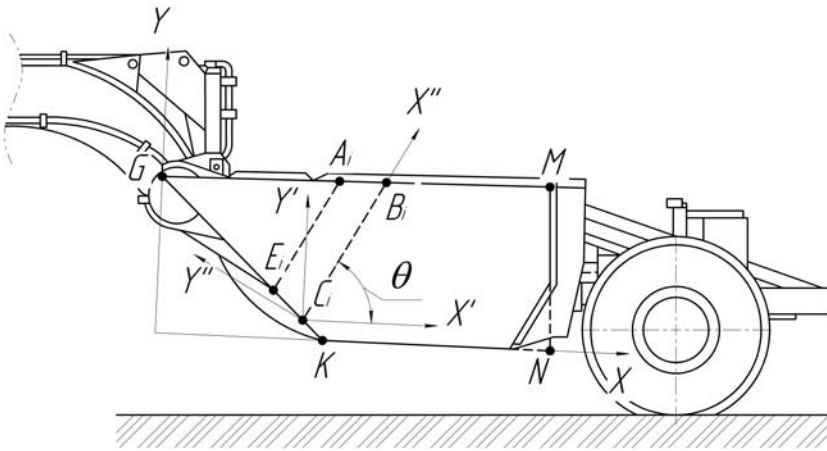


Рисунок 2 – Системи координат

1. Система $X''Y''$, що проходить через вершину елементарної площі таким чином, щоб вісь X'' поєднувалася з її нижньою основою;

2. Система $X'Y'$ повернена щодо системи $X''Y''$ на кут θ ;

3. Система XY , поєднана з ковшем скрепера таким чином, щоб вісь абсцис проходила через його дно, а вісь ординат - через найближчу до ведучої вісі трактора точку ковша.

Стан повного завантаження. Розглянемо елементарну трапецію $ABCE$ (рис. 3), у якої:

$$AB = \frac{a}{n}, \quad (1)$$

де n – крок розбиття ковша на елементарні ділянки.

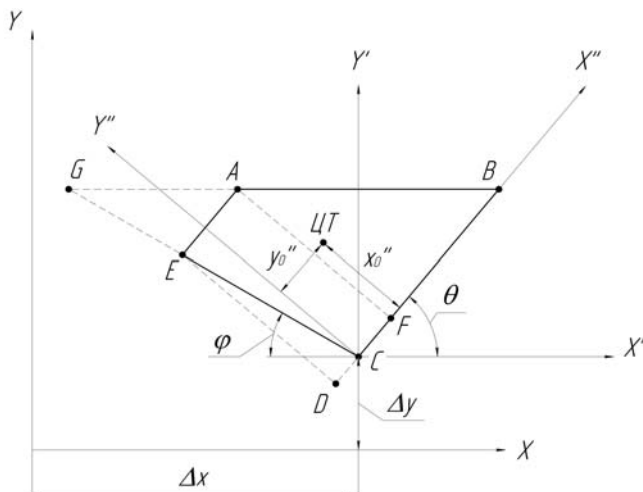


Рисунок 3 – Елементарна трапеція, яка отримана в результаті розбиття ковша скрепера прямими, які складають з його дном кут θ

Визначимо висоту AF даної трапеції. Для цього розглянемо прямокутний трикутник ABF , у якого $\angle B = \angle C$. Тоді:

$$AF = AB \cdot \sin \theta = \frac{a}{n} \cdot \sin \theta. \quad (2)$$

Визначимо в трикутнику ABF катет FB :

$$FB = \frac{AF}{\operatorname{tg} \theta} = \frac{a \cdot \sin \theta}{n \cdot \operatorname{tg} \theta}. \quad (3)$$

Верхня основа AE трапеції $ABCE$ – основа трикутника AEF , у якому $\angle G = \angle E = \varphi$ і $\angle A = \angle B = \theta$. Тоді:

$$AE = \frac{GA \cdot \sin \varphi}{\sin(\varphi + \theta)}. \quad (4)$$

Так як ковш скрепера розбивається на n рівних частин по верхній кромці, то:

$$GA = AB = \frac{a}{n}, \quad (5)$$

отже

$$AE = \frac{a \cdot \sin \varphi}{n \cdot \sin(\varphi + \theta)}. \quad (6)$$

Визначимо довжину основи BC трапеції $ABCE$ з умови, що:

$$BC = CF + FB. \quad (7)$$

Так як $CF = DF - DC$, і $DF = AE$, то:

$$BC = AE - DC + FB. \quad (8)$$

Розглянемо трикутник CDE , в якому $DE = AF$, а кут $\angle ECD = \varphi + \theta$. Тоді з даного трикутника:

$$EC = \frac{DE}{\sin(\varphi + \theta)} = \frac{a \cdot \sin \theta}{n \cdot \sin(\varphi + \theta)}, \quad (9)$$

$$DC = \frac{DE}{\operatorname{tg}(\varphi + \theta)} = \frac{a \cdot \sin \theta}{n \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \theta)}. \quad (10)$$

Остаточно для основи BC трапеції $ABCE$:

$$\begin{aligned} BC &= \frac{a \cdot \sin \varphi}{n \cdot \sin(\varphi + \theta)} - \frac{a \cdot \sin \theta}{n \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \theta)} + \frac{a \cdot \sin \theta}{n \cdot \operatorname{tg} \theta} = \\ &= \frac{a}{n} \cdot \left(\frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \theta)} - \frac{\sin \theta}{\operatorname{tg}(\varphi + \theta)} + \frac{\sin \theta}{\operatorname{tg} \theta} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Визначимо координати центра ваги трапеції $ABCE$ в повернутій системі координат $X''CY''$:

$$x_0'' = \frac{1}{2} \cdot \frac{a \cdot [\sin \varphi + \sin(\varphi + \theta) \cos \theta - \sin \theta \cos(\varphi + \theta)]}{n \cdot \sin(\varphi + \theta)}, \quad (12)$$

$$y_0'' = \frac{1}{3} \cdot \frac{a \cdot \sin \theta \cdot [3 \sin \varphi + 2 \sin(\varphi + \theta) \cos \theta - 2 \sin \theta \cos(\varphi + \theta)]}{n \cdot [2 \sin \varphi + \sin(\varphi + \theta) \cos \theta - \sin \theta \cos(\varphi + \theta)]}. \quad (13)$$

Для переходу в систему координат $X'CY'$ скористаємося матрицею повороту координатних вісей відносно центру системи на кут θ – матрицею виду:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Якщо врахувати, що координати x_0'' і y_0'' складають матрицю-стовпець виду:

$$A_0'' = \begin{bmatrix} x_0'' \\ y_0'' \end{bmatrix}, \quad (15)$$

то матриця-стовпець с координатами x_0' і y_0' в системі $X'CY'$ визначиться як:

$$A_0' = \begin{bmatrix} x_0' \\ y_0' \end{bmatrix} = M \cdot A_0'' = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0'' \\ y_0'' \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Через те, що система координат $X'CY'$ зміщена відносно системи XOY на величину Δx по осі X і Δy по осі Y , то остаточно координати елементарної трапеції в системі координат, що пов'язана з ковшем скрепера, визначаються з виразів:

$$x_0 = x_0' + \Delta x, \quad (17)$$

$$y_0 = y_0' + \Delta y. \quad (18)$$

Визначимо дані зміщення системи $X'CY'$. Для цього визначимо повну геометрію ковша скрепера (рис. 4).

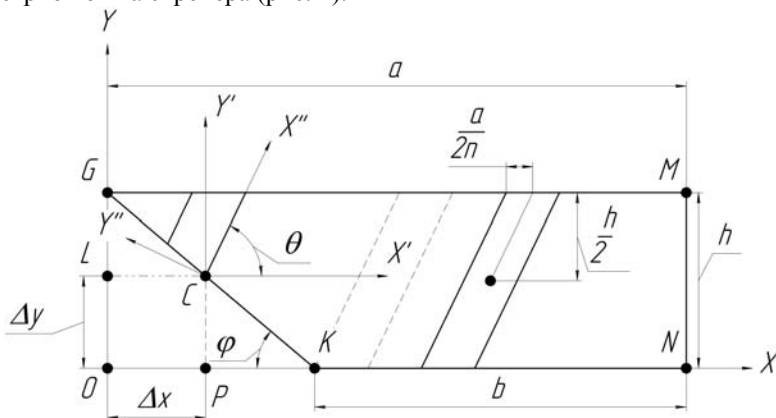


Рисунок 4 – Геометрія ковша з трьома системами координат

Розглянемо прямокутний трикутник GKO , в якому $GO = MN = h$, а $\angle O GK = 180 - 90 - \angle OKG = 90 - \angle OKG = 90 - \varphi$.

Розглянемо прямокутний трикутник GCL , в якому $\angle LCG = \angle OKG = \varphi$ та $GC \approx EC$ (при $n \rightarrow \infty$), тоді:

$$\Delta x = LC = GC \cdot \cos \varphi = \frac{a \cdot \sin \theta \cos \varphi}{n \cdot \sin(\varphi + \theta)}. \quad (19)$$

Розглянемо прямокутний трикутник GKO , в якому:

$$GK = GC + CK, \quad (20)$$

отже

$$CK = GK - GC. \quad (21)$$

Визначимо величину GK . Для цього розглянемо прямокутний трикутник GKO . Тоді:

$$GK = \frac{GO}{\sin \varphi}. \quad (22)$$

Отже:

$$CK = \frac{h}{\sin \varphi} - \frac{a \cdot \sin \theta}{n \cdot \sin(\varphi + \theta)}. \quad (23)$$

Розглянемо трикутник CKP :

$$\Delta y = CP = CK \cdot \sin \varphi. \quad (24)$$

Остаточо:

$$\Delta y = \left(\frac{h}{\sin \varphi} - \frac{a \cdot \sin \theta}{n \cdot \sin(\varphi + \theta)} \right) \cdot \sin \varphi = h - \frac{a \cdot \sin \theta \sin \varphi}{n \cdot \sin(\varphi + \theta)}. \quad (25)$$

Таким чином, узагальнені формули для визначення координат центра ваги i -ої трапеції набудуть вигляду:

$$x_{отр}^i = \frac{a \cos \theta}{2n} \cdot A_0^i - \frac{1}{3} \cdot B_0^i + C_0^i \cdot \cos \varphi, \quad (26)$$

$$y_{отр}^i = \frac{a \sin \theta}{2n} \cdot A_0^i - \frac{1}{2} \cdot D_0^i + h - C_0^i \cdot \sin \varphi, \quad (27)$$

де

$$A_0^i = \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \theta)} + \frac{(i+1) \sin \theta}{tg \theta} - \frac{(i+1) \sin \theta}{tg(\varphi + \theta)}, \quad (28)$$

$$B_0^i = \left\{ a \cdot \sin \theta \cdot [3 \sin \varphi + 3i \sin(\varphi + \theta) \cos \theta + 2 \sin(\varphi + \theta) \cos \theta - 3i \sin \theta \cos(\varphi + \theta) - 2 \sin \theta \cos(\varphi + \theta)] \right\} / \left\{ n \cdot [2 \sin \varphi + 2i \sin(\varphi + \theta) \cos \theta - 2i \sin \theta \cos(\varphi + \theta) + \sin(\varphi + \theta) \cos \theta - \sin \theta \cos(\varphi + \theta)] \right\}, \quad (29)$$

$$C_0^i = \frac{ia \sin \theta}{n \sin(\varphi + \theta)}, \quad (30)$$

$$D_0^i = \left\{ a \cdot [\sin \varphi + i \sin(\varphi + \theta) \cos \theta + \sin(\varphi + \theta) \cos \theta - i \sin \theta \cos(\varphi + \theta) - \sin \theta \cos(\varphi + \theta)] \right\} / \left\{ n \cdot \sin(\varphi + \theta) \right\}. \quad (31)$$

При цьому, як видно з рис. 4, розрахунок координат центрів ваги трапецій відбувається до тих пір, поки центр системи координат $X'CY'$ (точка C) не співпадає з точкою K , після чого проводиться розрахунок центрів ваги елементарних паралелограмів. Значення змінної i , при якому відбудеться поєднання точок C та K можна визначити з умови, що $\Delta y = 0$. Тоді, значення i змінюється в інтервалі:

$$i = 1 \dots k, \text{ де } k = \left\lfloor \frac{n \cdot h \cdot \sin(\varphi + \theta)}{a \sin \theta \sin \varphi} \right\rfloor. \quad (32)$$

Площа i -ої трапеції визначиться з виразу:

$$S_{TP}^i = 0,5 \cdot \left\{ a^2 \sin \theta [2 \sin \varphi + 2i \sin(\varphi + \theta) \cos \theta - 2i \sin \theta \cos(\varphi + \theta) + \sin(\varphi + \theta) \cos \theta - \sin \theta \cos(\varphi + \theta)] \right\} / \left\{ n^2 \sin(\varphi + \theta) \right\}. \quad (33)$$

Координати центрів ваги елементарних паралелограмів можна визначити за наступними залежностями:

$$x_{0ПАР}^m = x_{0TP}^m + m \cdot \frac{a}{n}, \quad (34)$$

$$y_{0ПАР}^m = \frac{h}{2}, \quad (35)$$

де m – змінна, яка визначає номер паралелограма, для якого проводиться розрахунок, і яка знаходиться в інтервалі:

$$m = 1 \dots n - k. \quad (36)$$

Площа паралелограмів визначиться з виразу:

$$S_{ПАР}^m = \frac{a \cdot h}{n}. \quad (37)$$

Таким чином, при використанні даного методу, координати центру ваги заповненого ковша скрепера (точки C_1) дорівнюють:

$$X_{C_1} = \frac{\sum_{i=1}^k x_{0TP}^i \cdot S_{TP}^i + \sum_{i=1}^m x_{0ПІАП}^m \cdot S_{ПІАП}^m}{\sum_{i=1}^k S_{TP}^i + \sum_{i=1}^m S_{ПІАП}^m}, \quad (38)$$

$$Y_{C_1} = \frac{\sum_{i=1}^k y_{0TP}^i \cdot S_{TP}^i + \sum_{i=1}^m y_{0ПІАП}^m \cdot S_{ПІАП}^m}{\sum_{i=1}^k S_{TP}^i + \sum_{i=1}^m S_{ПІАП}^m}. \quad (39)$$

Стан при вивантаженні об'єму GKB_i (рис. 1). Для визначення зміщення координат центру ваги ковша в даному стану скористаємося системою комп'ютерної алгебри Mathcad 15, представляючи даний процес у вигляді двох циклів наступного виду:

$XCT :=$	$n \leftarrow 0$ $Summ \leftarrow 0$ <i>for</i> $i \in 1..k-1$ $a \leftarrow S(i)$ $Summ \leftarrow Summ + a$ $SS_{n,0} \leftarrow Summ$ $Raz \leftarrow STR - SS_{n,0}$ $SS_{n,1} \leftarrow Raz$ $b \leftarrow Xtrap(i)$ $Mx \leftarrow S(i) \cdot b$ $SS_{n,2} \leftarrow Mx$ $SumMx \leftarrow SumMx + SS_{n,2}$ $SS_{n,3} \leftarrow SumMx$ $RazMx \leftarrow SUMMx - SS_{n,3}$ $SS_{n,4} \leftarrow RazMx$ $XC \leftarrow \frac{SS_{n,4}}{SS_{n,1}}$ $SS_{n,5} \leftarrow XC$ $n \leftarrow n + 1$ SS	$YCT :=$	$n \leftarrow 0$ $Summ \leftarrow 0$ <i>for</i> $i \in 1..k-1$ $a \leftarrow S(i)$ $Summ \leftarrow Summ + a$ $SS_{n,0} \leftarrow Summ$ $Raz \leftarrow STR - SS_{n,0}$ $SS_{n,1} \leftarrow Raz$ $b \leftarrow Ytrap(i)$ $Mx \leftarrow S(i) \cdot b$ $SS_{n,2} \leftarrow My$ $SumMy \leftarrow SumMy + SS_{n,2}$ $SS_{n,3} \leftarrow SumMy$ $RazMy \leftarrow SUMMy - SS_{n,3}$ $SS_{n,4} \leftarrow RazMy$ $YC \leftarrow \frac{SS_{n,4}}{SS_{n,1}}$ $SS_{n,5} \leftarrow YC$ $n \leftarrow n + 1$ SS
----------	---	----------	---

(40)

В даних циклах координати центру ваги (кінцева точка – C_2) визначаються на основі статичних моментів площ, отриманих в результаті різниці площ $GMNK$ та елементарних трапецій.

Стан при вивантаженні об'єму KB_iMN (рис. 1) можна описати за допомогою тих же статичних моментів площ, отриманих тепер в результаті різниці площ KB_iMN та елементарних паралелограмів. В першому наближенні можна прийняти, що швидкість вивантаження даних об'ємів співпадає зі швидкістю руху задньої стінки скрепера, що сприяє збереженню положення центра ваги, прийнятому ним в результаті закінчення другого стану вивантаження. Таким чином, для розрахунку положення центра ваги ковша скрепера (кінцева точка – C_3) в даному процесі можна скористатися циклами (40), замінюючи в них площі елементарних трапецій відповідними площами елементарних паралелограмів.

Результати розрахунків. В результаті теоретичного дослідження встановлені координати характерних місцезнаходжень центру ваги скрепера при його розвантаженні – точок C_1 , C_2 і C_3 , в межах яких і відбувається його переміщення (рис. 5).

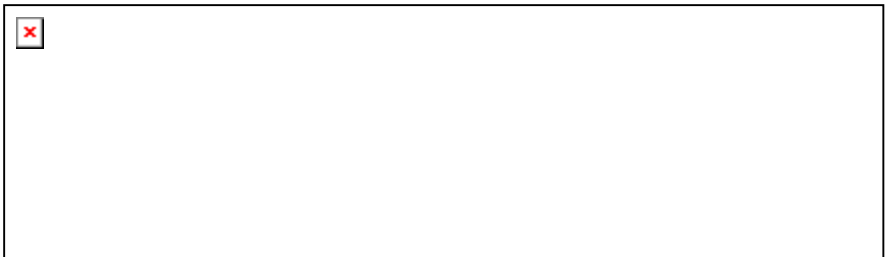


Рисунок 5 – Характерні точки розміщення центра ваги скрепера при його розвантаженні

З рис. 5 видно, що при формуванні плоскої системи сил, діючої на скрепер, переміщення центру ваги сприяє зміні моменту сили ваги відносно центру обертання колеса, що призводить до зміни реакцій, які виникають в сідельно-зчіпному пристрої трактора, і, як наслідок, до динамічної картини формування дотичної сили тяги його ведучого мосту.

Висновки. На основі проведеного імітаційного моделювання динаміки вивантаження транспортуемого матеріалу з ковша напівначіпного скрепера, при представленні останнього як жорсткого тіла змінної маси встановлено переміщення центра ваги скрепера, які дозволяють в подальшому оцінити вплив даного фактора на формування дотичної сили тяги енергетичного засобу.

Література

1. Кутьков Г.М. Тяговая динамика тракторов [Текст] / Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1980. – 216 с.
2. Барский И.Б. Динамика трактора [Текст] / И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
3. Болотин А.А. О характере нагрузки на двигатель и силовую передачу трактора [Текст] / А.А. Болотин // Тракторы и сельхозмашины. – 1959. – №11. – С. 15 – 19.
4. Кожуханцев А.Н. О влиянии вертикальных колебаний колесного трактора на снижение его тягово-динамических показателей [Текст] / А.Н. Кожуханцев // Тракторы и сельхозмашины. – 1977. – №7. – С. 10 – 11.
5. Кутьков Г.М. Анализ источников генерации колебаний нагрузки на двигатель сельскохозяйственных тракторов [Текст] / Г.М. Кутьков, В.С. Пучков, А.И. Холин // Тракторы и сельхозмашины. – 1975. – №6. – С. 9 – 10.
6. Кутьков Г.М. Экспериментальные исследования тягово-динамических показателей гусеничного трактора с гидротрансформатором [Текст] / Г.М. Кутьков, А.И. Холин // Труды ОНТИ НАТИ. – 1975. – Вып. 236. – С. 51 – 56.

Аннотация

Проведено имитационное моделирование динамики выгрузки транспортируемого материала с ковша полунавесного скрепера, при представлении последнего как жесткого твердого тела переменной массы, с целью анализа смещения его центра масс.

Summary

Conducted simulations of the dynamics of the material transported unloaded semi-mounted scraper bucket, when it presenting as rigid bodies with variable mass, in order to analyze the shift of its center of mass.