

Ковалевський С.Г.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ САМОХІДНОГО СКРЕПЕРА З УСІМА ПРОВІДНИМИ КОЛЕСАМИ

У статті наведені результати досліджень навантаження металоконструкції самохідного скрепера під час копання ґрунту. Проектування сучасних землерийно-транспортних машин потребує створення та використання розрахункових схем та математичних моделей, які дозволяють розглянути питання навантаження вузлів металоконструкції. Аналіз роботи самохідних пневмоколісних скреперів дозволяє зробити висновок про недостатність зчіпних якостей для повного заповнення ковша ґрунтом. З метою підвищення тягових властивостей зараз широко використовуються потужні повнопривідні тягачі, з якими агрегатується скреперне обладнання з провідними задніми колесами, що потребує визначення та дослідження зусиль, діючих в основних елементах конструкції. На основі створеної розрахункової схеми та математичної моделі отримано графічне вираження процесів навантаження тягової рами, показано, що навантаження, які виникають в горизонтальній площині, значною мірою перевищують ті, що діють в вертикальному та кутовому напрямках. Найбільш раціональним слід визнати режим роботи, в якому сила тяги розподіляється порівну між тягачем і скрепером, що дає найменші діючі зусилля.

Ключові слова: скрепер; моделювання, робочий процес, навантаження, металоконструкція, *Key words: scraper; modeling; the working process; loading; metal construction; driving wheels. провідні колеса.*

Актуальність дослідження. Скрепери виконують великі обсяги земляних робіт в дорожньому, лісотехнічному і сільськогосподарському будівництві. Аналіз роботи самохідного пневмоколісного скрепера дозволяє зробити висновок про недостатні тягові якості для повного заповнення ковша ґрунтом, що призводить до зменшення продуктивності машини [1,2]. Одним з найбільш поширених способів підвищення ефективності самохідного скрепера є використання провідної задньої осі з приводом від основного або додаткового двигуна, що дозволяє збільшити ступінь наповнення ковша, скоротити шлях і час копання, але призводить до збільшення навантажень, що діють в вузлах металоконструкції скрепера.

Аналіз публікацій. Дослідження самохідних скреперів, виконані до теперішнього часу, були присвячені визначенню максимального тягового зусилля, необхідного для заповнення ковша, мінімальної енергоємності процесу копання і подальшого зменшення цих величин шляхом вдосконалення конструктивних елементів скрепера [3,4]. Визначення напруженого стану вузлів металоконструкції самохідного скрепера, проведене в роботах [5,6], стосувалося скрепера з провідною передньою віссю або роботи з штовхачем, що свідчить про необхідність вивчення роботи повнопривідної машини.

Мета роботи. Розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо зниження навантаженості металоконструкції тягової рами самохідного скрепера, на основі створеної розрахункової схеми та математичної моделі.

Основна частина. В якості припущень, що дозволять спростити моделювання роботи самохідного скрепера, слід прийняти розгляд плоскої задачі при відсутності повздовжнього і поперечного ухилів.

В динаміці процесу копання ґрунту скрепером відомо, що тягова рама є пружним елементом, жорсткість якого значно нижче жорсткості інших вузлів металоконструкції машини, жорсткість скрепера в вертикальному напрямку визначається піддатливістю пневматичних коліс.

Опорна поверхня прийнята такою, що недеформується, а позовжні зусилля на провідних колесах обмежені зчіпними якостями рушіїв з опорною поверхнею.

Тягач і ківш скрепера, розглядаються як абсолютно жорсткі тіла, мають зосереджені маси, прикладені в координатах центрів тяжіння.

Розглянемо схему сил, діючих на самохідний скрепер при копанні ґрунту, в якій враховуються сили тяги на ведучих колесах T_1, T_2 , реакції ґрунту на осях скрепера R_1, R_2 , опір коченню коліс F_1, F_2 , горизонтальна і вертикальна складові сили опору копання R_A, R_B , прикладені до ножа скрепера, вертикальні сили тяжіння G_1, G_2 . (Рис. 1).

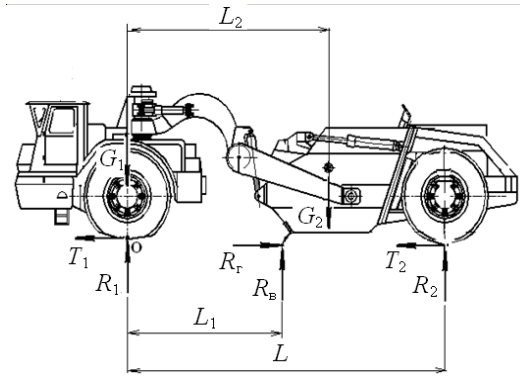


Рис. 1. Схема сил, що діють на самохідний скрепер при копанні ґрунта

Самохідний скрепер, розглядається як двохмасна система m_1, m_2 , що враховує поздовжні, вертикальні і кутові переміщення. Пружні зв'язку системи характеризуються коефіцієнтами жорсткості тягової рами скрепера в горизонтальній і вертикальній площині, радіальної жорсткості ведучих коліс, з в'язким опором.

Для складання рівнянь руху тягача самохідного скрепера щодо узагальнених координат визначимо швидкість центра ваги маси:

$$\begin{aligned} v_{1x} &= \dot{x}_1 + h_1 \dot{\phi}_1, \\ v_{1y} &= \dot{y}_1 - l_{1m} \dot{\phi}_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Квадрат швидкості першої маси:

$$\begin{aligned} v_1^2 &= (\dot{x}_1 + h_1 \cdot \dot{\phi}_1)^2 + (\dot{y}_1 - l_{1m} \cdot \dot{\phi}_1)^2 = \dot{x}_1^2 + \\ &+ 2h_1 \dot{x}_1 \dot{\phi}_1 + h_1^2 \dot{\phi}_1^2 + \dot{y}_1^2 - 2l_{1m} \dot{y}_1 \dot{\phi}_1 + l_{1m}^2 \dot{\phi}_1^2, \end{aligned} \quad (2)$$

Кинетична енергія першої маси:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} J \dot{\phi}_1^2 = \frac{m}{2} (\dot{x}_1^2 + 2h_1 \dot{x}_1 \dot{\phi}_1 + \\ &+ h_1^2 \dot{\phi}_1^2 + \dot{y}_1^2 - 2l_{1m} \dot{y}_1 \dot{\phi}_1 + l_{1m}^2 \dot{\phi}_1^2) + \frac{1}{2} J_1 \dot{\phi}_1^2, \end{aligned} \quad (3)$$

Похідні кинетичної енергії:

$$\frac{dT_1}{d\dot{x}_1} = m_1 (\dot{x}_1 + h_1 \dot{\phi}_1), \quad (4)$$

$$\frac{dT_1}{d\dot{y}_1} = m_1 (\dot{y}_1 - l_{1m} \dot{\phi}_1), \quad (5)$$

$$\frac{dT_1}{d\dot{\phi}_1} = m_1 (h_1 \dot{x}_1 + h_1^2 \dot{\phi}_1 - l_{1m} \dot{y}_1 + l_{1m} \dot{\phi}_1) + J_1 \dot{\phi}_1^2, \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_1 \ddot{x}_1 + m_1 h_1 \ddot{\phi}_1, \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} = m_1 \ddot{y}_1 - m_1 l_{1m} \ddot{\phi}_1, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_1} &= m_1 h_1 \ddot{x}_1 + m_1 h_1^2 \ddot{\phi}_1 - \\ &- m_1 l_{1m} \ddot{y}_1 + m_1 l_{1m}^2 \ddot{\phi}_1 + J_1 \ddot{\phi}_1 = \\ &= m_1 h_1 \ddot{x}_1 - m_1 l_{1m} \ddot{y}_1 + [m_1 (h_1^2 + l_{1m}^2) + J_1] \ddot{\phi}_1, \end{aligned} \quad (9)$$

Сили, що діють на масу m_1 :

$$\begin{aligned} R_1 &= C_1[-y_1 + l_{1m}\phi_1] + \\ &+ k_1[-\dot{y}_1 + l_{1m}\dot{\phi}_1], \end{aligned} \quad (10)$$

$$P_{ix} = U_{11}\Delta x_i + U_{12}\Delta y_i, \quad (11)$$

$$P_{iy} = U_{21}\Delta x_i + U_{22}\Delta y_i, \quad (12)$$

$$\Delta x_1 = x_1 - x_2, \quad (13)$$

$$\Delta y_1 = y_1 - y_2, \quad (14)$$

Коефіцієнти U_{11} , U_{12} , U_{21} , U_{22} визначаються за деформаціями рами методом кінцевих елементів. Узагальнені сили визначаються роботою на віртуальних переміщеннях:

$$\begin{aligned} \delta A_x &= T_1\delta x - F_1\delta x - \\ &- [U_{11}(x_1 - x_2) + U_{12}(y_1 - y_2)]\delta x, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Qx &= T_1 - F_1 - U_{11}x_1 + \\ &+ U_{11}x_2 - U_{12}y_1 + U_{12}y_2, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \delta A_y &= R_1\delta y + P_{1y}\delta y = C_1\delta y \\ &[-y_1 + l_{1m}\phi_1] + k_1\delta y[-\dot{y}_1 + l_{1m}\dot{\phi}_1] + \\ &+ [U_{21}(x_1 - x_2) + U_{22}(y_1 - y_2)]\delta y, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Qy &= -C_1y_1 + C_1l_{1m}\phi_1 - k_1\dot{y}_1 + k_1l_{1m}\dot{\phi}_1 + \\ &+ U_{21}(x_1 - x_2) + U_{22}(y_1 - y_2), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \delta A_{\phi_1} &= -R_1l_{1m}\delta\phi_1 + F_1h_{1m}\delta\phi_1 - T_1h_{1m}\delta\phi_1 = \\ &= C_1\delta\phi_1[-y_1 + l_{1m}\phi_1] + k_1\delta\phi_1[-\dot{y}_1 + l_{1m}\dot{\phi}_1] + \\ &+ F_1h_{1m}\delta\phi_1 - T_1h_{1m}\delta\phi_1, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Q\phi_1 &= C_1l_{1m}[-y_1 + l_{1m}\phi_1] + \\ &+ k_1l_{1m}[-\dot{y}_1 + l_{1m}\dot{\phi}_1] + F_1h_{1m} - T_1h_{1m}, \end{aligned} \quad (20)$$

Рівняння руху маси m_1 , m_2 :

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + m_1 h_1 \ddot{\phi}_1 &= T_1 - F_1 - \\ &- U_{11}(x_1 - x_2) - U_{12}(y_1 - y_2), \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{y}_1 + m_1 l_{1m} \ddot{\phi}_1 &= -C_1 y_1 + C_1 l_{1m} \phi_1 - k_1 \dot{y}_1 \\ &+ k_1 l_{1m} \dot{\phi}_1 + U_{21}(x_1 - x_2) + U_{22}(y_1 - y_2), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} m_1 h_1 \ddot{x}_1 - m_1 l_{1m} \ddot{y}_1 + [m_1(h_1^2 + l_{1m}^2) + J_1] \ddot{\phi}_1 &= \\ &= -C_1 l_{1m} y_1 + C_1 l_{1m}^2 \phi_1 - \\ &- k_1 l_{1m} \dot{y}_1 + k_1 l_{1m}^2 \dot{\phi}_1 + F_1 h_{1m} - T_1 h_{1m}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} m_2 \cdot \ddot{x}_2 + m_2 h_2 \ddot{\phi}_2 &= T_2 - F_2 - R_\Gamma + \\ &+ U_{11}(x_2 - x_1) + U_{12}(y_2 - y_1), \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} m_2 \cdot \ddot{y}_2 + m_2(l_{22} - l_{23})\ddot{\phi}_2 &= -C_2 y_2 \\ &+ C_2 l_{22} \phi_2 - k_2 \dot{y}_2 + k_2 l_{22} \dot{\phi}_2 - \\ &- U_{21}(x_2 - x_1) - U_{22}(y_2 - y_1) - R_B, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
& m_2 h_{22} \ddot{x}_2 + m_2 (l_{22} - l_{23}) \ddot{y}_2 + \\
& + \left[m_2 (h_{22}^2 + l_{2m}^2) + J_2 \right] \ddot{\phi}_2 = \\
& = C_2 l_{22} y_2 + C_2 l_{22}^2 \phi_2 + k_2 l_{22} \dot{y}_1 - \\
& - k_2 l_{22}^2 \dot{\phi}_2 + F_2 (h_{2m} + h_2) - \\
& - T_2 (h_{2m} + h_2) + R_\Gamma h_{21} + R_B l_{21},
\end{aligned} \tag{26}$$

Тягове зусилля:

$$T_1 + T_2 = (R_1 + R_2) \phi, \tag{27}$$

Сили опору копанню визначаються інтенсивністю A :

$$\begin{aligned}
R_\Gamma &= Ax_2, \\
R_B &= R_\Gamma \psi,
\end{aligned} \tag{28}$$

Результати моделювання навантаження тягової рами одномоторного і двухмоторного самохідного скрепера з передньою провідною віссю 1 та усіма провідними вісями приведені на рис.2.

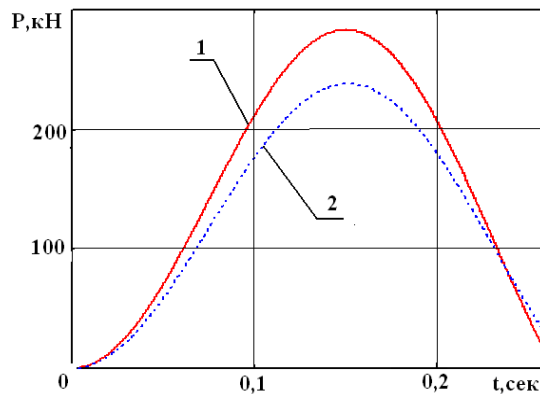


Рис. 2. Результати моделювання навантаження тягової рами:

- 1 – одномоторний скрепер;
- 2 – двухмоторний скрепер.

При моделюванні навантаження металоконструкції проводилася зміна співвідношення тягових зусиль, які реалізуються тягачем та скрепером в межах: від: $T_1=100\%$ - при вимкненому приводі задньої вісі до величин: $T_1=30\%$, $T_2=70\%$ загальної сил тяги. Отримані результати приведені на рис.3.

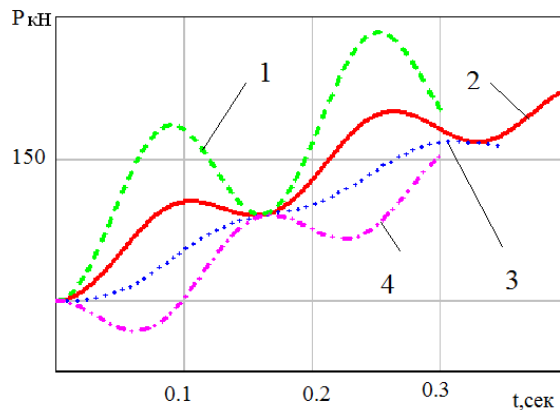


Рис. 3. Результати моделювання навантаження тягової рами:

- 1 – скрепер з переднім приводом, $T_1=100\%$, 2 -4 – скрепер з повним приводом, $T_1=70\%$, 50% , 30% загальної сил тяги відповідно

Аналіз результатів розрахунків з використанням створеної математичної моделі показав, що навантаження, які виникають в горизонтальній площині, значною мірою перевищують ті, що діють в вертикальному та кутовому напрямках.

Зміни навантажень мають схожий коливальний характер і досягають максимальних значень в першому на півперіоді (рис. 2,3).

Найбільші зусилля виникають при роботі скрепера з передніми провідними колесами, вони мають швидкий темп зростання, а коефіцієнт динамічності дорівнює 1,9.

При підключенні задніх привідних коліс темп та величина виникаючих навантажень зменшуються, а коефіцієнт динамічності дорівнює 1,1 – 1,5 при реалізації задніми колесами скрепера 30 та 50% загальної сили тяги, відповідно.

При передачі на задню вісь 70% загальної сили тяги дещо змінюється характер коливальних процесів, а саме: збільшується амплітуда, темп зростання, максимальні значення практично не змінні.

Таким чином, робота самохідного скрепера з усіма провідними колесами призводить до зменшення навантаження тягової рами, а найбільш прийнятним режимом треба визнати варіант рівного розподілу тягового зусилля між передніми та задніми колесами.

Висновки. В результаті проведеного моделювання встановлено, що поздовжні деформації металокопункції тягової рами самохідного скрепера значно перевищують вертикальні.

Процеси навантаження мають однаковий коливальний характер, а зусилля в тяговій рамі скрепера з провідними передніми колесами на 21 – 46% перевищують діючі в машині з усіма ведучими колесами.

Найбільш раціональним слід визнати режим роботи, в якому сила тяги розподіляється порівну між тягачем і скрепером, що дає найменші діючі зусилля, а коефіцієнт динамічності дорівнює 1,2.

Проведені дослідження мають стати основою для розрахунків металокопункції скрепера на міцність та надійність з використанням комп'ютерних моделей скреперів.

Література

1. Машини для земляних робіт: Підручник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, М.П. Скоблюк та ін. Під загальною редакцією проф. Л.А. Хмари та проф. С.В. Кравця. – Х.: ХНАДУ, – 2014 -548 с.
2. Кириченко І.Г. Наукові основи створення високоефективних землерійно-транспортних машин / Кириченко І.Г., Назаров Л.В., Нічке В.В., Демішкан В.Ф. та ін. – Х.: ХНАДУ, 2003. – 588 с.
3. Борисенков В.А. Оптимизация скреперных агрегатов / В.А. Борисенков. – Воронеж: ВГУ, 1990. – 248 с.
4. Резников А.А. Улучшение тягово-сцепных качеств скрепера ДЗ-87 / А. А. Резников // Вестник ХНАДУ. Сб. науч. тр. – Х.: ХНАДУ. – 2016. - Вып. 73. – С. 176-178.
5. Ковалевский С.Г. Исследование тяговых качеств скреперного поезда / С.Г. Ковалевский, С.В. Лукин // Вестник ХНАДУ. Сб. науч. тр. - Х.: ХНАДУ – 2007. – Вып. 38. – С. 145–148.
6. Краснокутський В.М. Розробка математичної моделі скреперного потягу / В.М. Краснокутський, С.Г. Ковалевський, Г.В. Кузнецов // Вестник ХНАДУ. Сб. научн. тр. - Х.: ХНАДУ – 2012 – Вып. 57. – С. 121–124.
7. Ковалевский С.Г. Моделирование нагружения тяговой рамы самоходного скрепера / С.Г. Ковалевский // Вестник ХНАДУ. Сб. научн. тр. - Х.: ХНАДУ – 2012 – Вып. 73. – С. 162–166.
8. Щемелёв А.М., Способы снижения нагруженности металлоконструкции скрепера МоА3-6014 при копании грунта / А.М. Щемелёв, О.В. Леоненко // Строительные и дорожные машины. 2004. - №8 - С.18 - 23.
9. Нилов, В.А. Исследование нагруженности тяговой рамы скрепера с шаровым седельным устройством / В.А. Нилов В.А., Д.А. Степанченко // Высокие технологии в строительном комплексе. - 2018. - № 1. - С 132-135.
10. Хмара Л.А., Визначення напружень у задній стійці ковша скрепера /Л.А. Хмара, М.А. Спільник // Вестник ХНАДУ. Сб. научн. тр. - Х.: ХНАДУ – 2014 – Вып. 65 - 66. – С. 210–216.
11. Rehnberg, A. . Suspension design for off-road construction machines. Stockholm. Sweden. 2011. 92 p.
12. SimMechanics Documentation. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sm/>

References

- 1 *Mashini dlya zemlyanikh robIt*: Navchalniy posIbник / Khmara L. A., Kravets S. V., Nichke V. V., Nazarov L. V., Skoblyuk M. P., Nikitin V. G. Pid zagalnoyu redaktsieyu prof.. Khmara L. A. ta prof.. Kravtsya S. V. Rivne – Dnipropetrovsk-Kharkiv. – 2010 -557 s. .
2. Kyrychenko I.H., Nazarov L.V., Nichke V.V., et al. *Naukovi osnovy stvorennia vysokoeffektyvnykh zemleryino-transportnykh mashyn* [Scientific basis of efficient earth-moving machinery creation] – Kharkiv: Kharkiv National Automobile and Highway University. 2003, 588 s.
3. Borisenkov V.A. *Optimizatsiya skrepernykh agregatov* / V.A. Borisenkov. – Voronezh: VGU, 1990. – 248 s.
4. Reznikov A.A. *Uluchshenie tyagovo-stsepnnykh kachestv skrepera DZ-87* / A. A. Reznikov // Vestnik HNADU. Sb. nach. tr. – H.: HNADU. – 2016. - Vyip. 73. – S. 176-178.
5. Kovalevskiy S.G. *Issledovanie tyagovykh kachestv skrepernogo poezda* / S.G. Kovalevskiy, S.V. Lukin // Vestnik HNADU. Sb. nach. tr. - H.: HNADU – 2007. – Vyip. 38. – S. 145–148.
6. Krasnokutskiy V.M. *Rozrobka matematichnoyi modeli skrepernogo potyagu* / V.M. Krasnokutskiy, S.G.

- Kovalevskiy, G.V. Kuznetsov // Vestnik HNADU. Sb. nauchn. tr. - H.: HNADU – 2012 – Vyip. 57. – S. 121–124.
7. Kovalevskiy S.G. *Modelirovanie nagruzheniya tyagovoy ramy samohodnogo skrepera* / S.G. Kovalevskiy // Vestnik HNADU. Sb. nauchn. tr. - H.: HNADU – 2012 – Vyip. 73. – S. 162–166.
 8. Schemelyov A.M., *Sposobyi snizheniya nagruzhenosti metallokonstruktsii skrepera MoAZ-6014 pri kopanii grunta* / A.M. Schemelyov, O.V. Leonenko, M.E Podyimako // Stroitelnyie i dorozhnyie mashiny. 2004. - №8 - S.18 - 23.
 9. Nilov, V.A. *Issledovanie nagruzhenosti tyagovoy ramy skrepera s sharovym sedelnym ustroystvom* / V.A. Nilov V.A., D.A. Stepanchenko // Vyisokie tehnologii v stroitelnom komplekse. - 2018. - # 1. - S 132-135.
 10. Hmara L.A., *Viznachennya napruzhen u zadnly stlytsI kovsha skrepera* /L.A. Hmara, M.A. SpIlnik // Vestnik HNADU. Sb. nauchn. tr. - H.: HNADU – 2014 – Vyip. 65 - 66. – S. 210–216.
 11. Rehnberg, A. . *Suspension design for off-road construction machines*. Stockholm. Sweden. 2011. 92 p.
 12. SimMechanics Documentation. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/phymod/sm/>

В статье приведены результаты исследований нагрузки металлоконструкции самоходного скрепера во время копания грунта. Проектирование современных землеройно-транспортных машин требует создания и использования расчетных схем и математических моделей, позволяющих рассмотреть вопрос нагрузки узлов металлоконструкции. Анализ работы самоходных пневмоколесных скреперов позволяет сделать вывод о недостаточности сцепных качеств для полного заполнения ковша грунтом. С целью повышения тяговых свойств сейчас широко используются мощные полноприводные тягачи, с которыми агрегируются скреперными оборудованием с ведущими задними колесами, что требует определения и исследования усилий, действующих в основных элементах конструкции. На основе созданной расчетной схемы и математической модели получено графическое выражение процессов нагрузки тяговой рамы, показано, что нагрузки, возникающие в горизонтальной плоскости, в значительной степени превышают те, что действуют в вертикальном и угловом направлениях. Наиболее рациональным следует признать режим работы, в котором сила тяги распределяется поровну между тягачом и скрепером, что дает самые действующие усилия.

Ключевые слова: скрепер, моделирование, рабочий процесс, нагружение, металлоконструкция, ведущие колеса.

The statistics show the results of the previous installation of the metalwork of the self-cleaning scraper in the hour of digging the soil. The design of the current earth moving machines will require the creation of a design scheme and mathematical models that allow you to take a look at the power supply of the metalwork. Analysis work of self-supporting pneumatic scrapers allowing you to drill gadgets about the lack of special brushes for filling the bucket with soil. By way of increased traction power at a time, widespread use of tightly driven trailers, and with such aggregates are tied to being possessed with rear wheels, I will require a license plate and additional construction in the main ones. As an allowance, it's possible to simplify the model of robots of a self-cleaning scraper, and to take a look at the plane tasks when there is a daily and lateral problem. In the dynamical process, digging with a scraper in a house, a traction frame with a spring element, the rigidity is much lower than the rigidity of the metal components of the machine, and the rigidity of the valve vertically. The support surface is adopted in such a way that it is not deformed, and the rear axle on the front wheels is interspersed with the clutching qualities of the wheels. The tractor and the scraper may have the absolute power, and the medium weight is applied in the coordinates of the center. Based on the established design scheme and the mathematical model, the graphic design of the viral processes was demonstrated, it is shown that they can be installed in a horizontal area that can be significantly transposed. The most rational way to do this is to use the robot mode, in some way the pulling power is unchanged between the tractor and the scraper, and I'm sure to get the best power.

Key words: scraper, modeling, the working proces, loading, metal constructio, driving wheels.

Ковалевський С.Г., Україна, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, кафедра будівельних та дорожніх машин, доцент, к.т.н. e-mail: 2407180@ukr.net