

DYNAMICS OF WALKING MOVEMENT OF AN EXPERIMENTAL VEHICLE

¹Myasnikov A. S., ²Fomin S. D., ²Vorobyova N. S., ³Zhoga V. V.¹ChPOU "Gazprom College Volgograd named after. I. A. Matlashov"²Volgograd State Agrarian University³Volgograd State Technical University

Volgograd, Russian Federation

Corresponding author E-mail: fsd_58@mail.ru

Received 15.04.2024

Submitted 21.05.2024

Abstract

Introduction. The work examines an experimental vehicle with a combined method of movement – rolling and walking, designed for transporting agricultural goods in field conditions. The choice of movement method depends on the bearing capacity of the supporting surface and the roughness of the terrain. When performing a walking method of movement by a vehicle, the most dangerous stage is the transfer of the first and third moving parts, at the moment of separation from the supporting surface of the movers. The peculiarity of performing walking movement by an experimental vehicle is due to changes in the reactions of the supporting surface between the movers in contact with the ground, as well as the roll angle of the vehicle body, due to changes in the position of the center of mass of the entire structure when performing a "step". The nature of the change in dynamic parameters during the walking method of moving an experimental vehicle is an urgent task, the research results of which are presented in the work for the period of performing one "step". **Object.** The subject of the study is the laws of change in tangential and normal reactions of the supporting surface, as well as the roll angle of an experimental vehicle on soil surfaces such as loam, fine sand, and clay. **Materials and methods.** A mathematical model of machine dynamics when moving over various soils has been developed. The viscoelastic-plastic model was adopted as a soil model. **Results and conclusions.** As a result of numerical experiments, the range of changes in the kinematic parameters of the machine was determined, the characteristics of the redistribution of tangential and normal reactions of the supporting surface were obtained, and the roll angle when performing a "step" by the first moving part of the experimental vehicle on various ground surfaces was determined. Thus, the minimum reaction to the middle moving part was 670 N on a clay soil surface, and the maximum was 880 N on fine sand. The minimum roll angle was $\varphi_2=2.23^\circ$ on fine sand, and the maximum $\varphi_3=2.75^\circ$ on clay soils.

Keywords: experimental vehicles, walking locomotion, support surface reactions, roll angle.

Citation. Myasnikov A. S., Fomin S. D., Vorobyova N. S., Zhoga V. V. Dynamics of walking movement of an experimental vehicle. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2024. 3(75). 430-440 (in Russian). DOI:10.32786/2071-9485-2024-03-49.

Author's contribution. All authors of this study were directly involved in the design, execution, or analysis of this study. All authors of this article have reviewed and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.37

ДИНАМИКА ШАГАЮЩЕГО ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА¹Мясников А. С., преподаватель²Фомин С. Д., доктор технических наук, профессор²Воробьева Н. С., доктор технических наук, профессор³Жога В. В., доктор физико-математических наук, профессор¹ЧПОУ «Газпром колледж Волгоград им. И. А. Матлашова»²ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ³ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается экспериментальное транспортное средство с комбинированным способом передвижения – качением и шаганием, предназначенное для перевозки сельскохозяйственных грузов в полевых условиях. Выбор способа перемещения зависит от несущей способности опорной поверхности и пересеченности местности. При выполнении шагающего способа передвижения транспортным средством наиболее опасным является этап переноса первой и третьей подвижной частей в момент отрыва от опорной поверхности движителей. Особенность выполне-

ния шагающего передвижения экспериментальным транспортным средством обусловлена изменениями реакций опорной поверхности между движителями, находящимися в контакте с грунтом, а также углом крена корпуса машины вследствие изменения положения центра масс всей конструкции при выполнении «шага». Характер изменения динамических параметров при шагающем способе перемещения экспериментального транспортного средства является актуальной задачей, результаты исследования которого представлены в работе за период выполнения одного «шага». **Объект.** Предметом исследования являются законы изменения касательных и нормальных реакций опорной поверхности, а также угол крена экспериментального транспортного средства на грунтовых поверхностях типа суглинков, мелкий песок, глина. **Материалы и методы.** Разработана математическая модель динамики машины при перемещении по различным грунтам. В качестве модели грунта принята вязко-упругопластическая модель. **Результаты и выводы.** В результате численных экспериментов определен диапазон изменения кинематических параметров машины, получены характеристики перераспределения касательных и нормальных реакций опорной поверхности, а также определен угол крена при выполнении «шага» первой подвижной частью экспериментального транспортного средства на различных грунтовых поверхностях. Так, минимальные реакции на среднюю подвижную часть составили 670 Н на глинистой грунтовой поверхности, а максимальные 880 Н на мелком песке. Минимальный угол крена составил $\varphi_2=2,23^\circ$ на мелком песке, а максимальный $\varphi_3=2,75^\circ$ на глинистых грунтах.

Ключевые слова: экспериментальные транспортные средства, шагающее передвижение, реакции опорной поверхности, угол крена.

Цитирование. Мясников А. С., Фомин С. Д., Воробьева Н. С., Жога В. В. Динамика шагающего передвижения экспериментального транспортного средства. *Известия НВ АУК*. 2024. 3(75). 430-440. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-49.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились с представленным окончательным вариантом и одобрили его.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Экспериментальное транспортное средство с комбинированным способом передвижения состоит из следующих сборочных узлов (рисунок 1) [8]: 1- 3 – подвижные части продольного перемещения движителей 4 – вдоль рамы 5; 6 – механизмы продольного перемещения частей 1-3; 7 – механизмы перемещения движителей 4 в вертикальной плоскости; 8 – механизм продольного перемещения кузова и кабины; 9 – источники энергии; 10 – электрический блок; 11 – пульт управления. Принцип перемещения экспериментального транспортного средства подробно изложен в [8, 9].



Рисунок 1 – Общий вид экспериментального транспортного средства
Figure 1 – General view of the experimental vehicle

Модель взаимодействия движителей экспериментального транспортного средства с грунтом является ключевым вопросом при разработке математической модели динамики движения. Тип и состояние почвы определяют сопротивление движению транспортного средства и его тягово-сцепные свойства. Экспериментально установлено, что прямой зависимости между составом почвы и ее сопротивлением движению нет. Механические свойства опорной поверхности определяются физическими, химическими и биологическими факторами. Различное сочетание значений таких параметров почвы, как влажность, механический состав, плотность, структурность, пористость, связность, температура, определяют разнообразие характеров процесса взаимодействия движителя с грунтом, что диктует необходимость использования различных реологических моделей грунта [7, 11].

При контакте движителей экспериментального транспортного средства с грунтом в последнем возникают деформации, величина и характер которых обусловлены действием внешних и внутренних сил, вызывающих относительное смещение частиц. Если после прекращения внешнего воздействия частицы грунта возвращаются в первоначальное положение, то деформация считается упругой. В реальности после снятия нагрузки положение частиц грунта отличается от первоначального, т.е. имеет место остаточная деформация. Если остаточная деформация равна общей деформации, то имеет место пластическая деформация. Реальные грунты не являются чисто упругими или пластичными. При малых нагрузках деформация прямо пропорциональна им, при дальнейшем увеличении нагрузки относительный прирост деформации возрастает, и при какой-то предельной нагрузке происходит увеличение деформации без значительного возрастания нагрузки. Даже при малой нагрузке (после ее снятия) имеют место остаточные деформации.

Метод решения. Расчетная схема транспортного средства для формирования динамической модели приведена на рисунке 2. Введена неподвижная система координат $OXYZ$. Экспериментальное транспортное средство представляется, как двух массовая система абсолютно твердых тел. С каждым телом связана собственная система координат $C_i X_i Y_i Z_i$, $i=1, 2$. Начало системы координат $C_2 X_{20}, Y_{20}, Z_2$ в положении, когда деформации опорных движителей равны нулю. Подвижные части 2, 3, рама и кузов с кабиной находятся в покое, а подвижная часть 1 совершает относительное перемещение вдоль рамы.

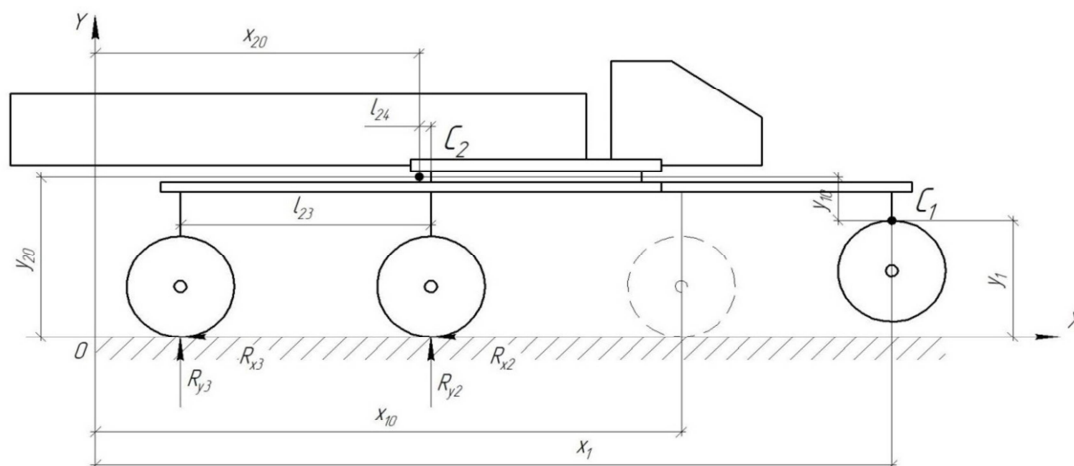


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения реакций опорной поверхности
Figure 2 – Calculation scheme for determining the reactions of the supporting surface

C_1, C_2 – центры масс подвижных частей 1 и 2; OXY – абсолютная система координат; x_1, x_2 – координаты по горизонтали от центров масс C_1, C_2 ; x_{10} – координата по горизонтали начального положения подвижной части; y_1, y_{20} – координаты по вертикали центров масс C_1, C_2 ; y_{10} – координата по вертикали центра масс подвижной части C_1 до C_2 ; l_{23}, l_{24} – конструктивные параметры экспериментального транспортного средства / C_1, C_2 – centers of mass of moving parts 1 and 2; OXY is an absolute coordinate system; x_1, x_2 – horizontal coordinates from the centers of mass C_1, C_2 ; x_{10} – horizontal coordinate of the initial position of the moving part; y_1, y_{20} – vertical coordinates of the centers of mass C_1, C_2 ; y_{10} is the vertical coordinate of the center of mass of the moving part C_1 to C_2 ; l_{23}, l_{24} – design parameters of the experimental vehicle

Наиболее интересной ситуацией является перенос первой и третьей подвижных частей, во время отрыва от опорной поверхности и переноса их движителей. Механизм переноса всех частей выполнен аналогичен, поэтому рассматривается один из самых характерных случаев – перенос первой подвижной части [1-6, 13, 14]. При расчетах принимается, что части транспортного средства 2, 3 – рама и кузов с кабиной массой m_2 находятся в покое, а подвижная часть 1 массой m_1 , совершает относительное перемещение вдоль рамы по заданному закону.

Для описания динамики движения используется теорема о движении центра масс и теорема об изменении момента количества движения относительно центра масс, которые в проекции на координатные оси выражаются зависимостями [2, 13].

$$M = m_1 + m_2, \quad (1)$$

$$M \cdot \ddot{x}_c = \sum F_{kx}, \quad (2)$$

$$M \cdot \ddot{y}_c = \sum F_{ky}, \quad (3)$$

$$\frac{dK_{zc}}{dt} = \sum M_{zc}^e \quad (4)$$

где m_1, m_2 – массы частей экспериментального транспортного средства; M – масса всей системы; $\ddot{x}_c, \ddot{y}_c$ – проекции ускорения центра масс системы экспериментального транспортного средства; $\sum F_{kx}$ – сумма проекций всех сил на ось X ; $\sum F_{ky}$ – сумма проекций всех сил на ось Y ; $\sum M_{zc}$ – сумма моментов всех внешних сил относительно центра масс.

Применительно для экспериментального транспортного средства при выполнении «шага» первой подвижной части уравнения 2, 3 принимают вид

$$M \cdot \ddot{x}_c = R_{x2} + R_{x3}, \quad (5)$$

$$M \cdot \ddot{y}_c = R_{y2} + R_{y3} - M \cdot g, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения; R_{x2}, R_{x3} и R_{y2}, R_{y3} – касательные и нормальные реакции грунта соответственно.

Координаты центра масс системы определяются выражениями

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_{20}}{M}, \quad (7)$$

$$y_c = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_{20}}{M}, \quad (8)$$

Для определения реакций опорной поверхности и угла наклона корпуса машины на различных видах грунтов при передвижении шаганием экспериментального транспортного средства применяется вязко-упруго-пластическая модель грунта.

Для нормальных реакций модель имеет вид [10, 11]:

$$N = c_N \Delta_N + \mu_N \dot{\Delta}_N, \quad (9)$$

где N – нормальная реакция грунта; $\Delta_N, \dot{\Delta}_N$ – деформация и скорость деформации грунта;

c_N – приведенный коэффициент жесткости грунта; μ_N – приведенный коэффициент вязкого сопротивления.

Вычисление опорных реакций по выражению (9) производится до достижения предела текучести грунта, затем наступает пластическое течение, проходящее при силе

$$N = f_N N, \quad (10)$$

где f_N – коэффициент пластического течения.

Для касательных реакций модель записывается в виде [11, 12, 14].

$$T = \begin{cases} c_\tau \Delta_\tau + \mu_\tau \dot{\Delta}_\tau, & \text{при } |T| < T_\Pi, \\ f_{ск} N \text{sign}(\dot{\Delta}_\tau), & \text{при } |T| > T_\Pi, \end{cases} \quad (11)$$

где c_τ , μ_τ , Δ_τ и $\dot{\Delta}_\tau$ имеют тот же смысл, что и для вертикальных реакций; T_Π – сила трения покоя; $f_{ск}$ – коэффициент трения скольжения.

Описанная модель грунта является приближенной, однако ее применение оправдывается не только простотой, но и слабой корреляцией между характером деформирования грунта и большинством анализируемых параметров движения экспериментального транспортного средства.

В соответствии с принятой моделью грунта нормальные реакции опорной поверхности записываются в виде

$$R_{y2} = \begin{cases} -c_2^e (y_2 - y_{20} + l_{24} \cdot \varphi) - \mu_2^e \left(\dot{y}_2 + l_{24} \cdot \dot{\varphi} \right), & \text{если } R_{y2} < f_2^e R_{y2}, \\ f_2^e R_{y2}, & \text{если } R_{y2} \geq f_2^e R_{y2}, \end{cases}$$

$$R_{y3} = \begin{cases} -c_3^e (y_2 - y_{20} + l_{24} \cdot \varphi - l_{23} \cdot \varphi) - \mu_3^e \left(\dot{y}_2 + l_{24} \cdot \dot{\varphi} - l_{23} \cdot \dot{\varphi} \right), & \text{если } R_{y3} < f_3^e R_{y3}, \\ f_3^e R_{y3}, & \text{если } R_{y3} \geq f_3^e R_{y3}, \end{cases} \quad (12)$$

где y_1 , $\dot{y}_1$ – деформация и скорость деформации грунта; c_1^e , c_2^e – коэффициенты жесткости грунта;

μ_1^e , μ_2^e – коэффициенты вязкого сопротивления; f_1^e , f_2^e – коэффициенты пластического течения.

Касательные реакции определяются формулами

$$R_{x2} = \begin{cases} -c_2^e (x_2 - x_{20} + l_{24}) - \mu_2^e (\dot{x}_2), & \text{если } R_{x2} < f_2^e R_{y2}, \\ -f_2^e R_{y2} \text{sign}(\dot{x}_2), & \text{если } R_{x2} \geq f_2^e R_{y2}. \end{cases}$$

$$R_{x3} = \begin{cases} -c_3^e (x_2 - x_{20} + l_{24} + l_{23}) - \mu_3^e (\dot{x}_2), & \text{если } R_{x3} < f_3^e R_{y3}, \\ -f_3^e R_{y3} \text{sign}(\dot{x}_2), & \text{если } R_{x3} \geq f_3^e R_{y3}. \end{cases} \quad (13)$$

Горизонтальное перемещение подвижной части 1 является функцией времени $x_1 = x_{10} + S_1(t)$, которая определяется выражением

$$S_1(t) = [S_1(\tau) - S_1(0)] \cdot \left(10 - 15 \frac{t}{\tau} + 6 \frac{t^2}{\tau^2} \right) \cdot \frac{t^3}{\tau^3}, \quad (14)$$

где $S_1(t)$ – заданный программный закон относительного перемещения подвижной части 1 экспериментального транспортного средства, который удовлетворяет требованиям «мягкого» трогания и касания; τ – время передвижения (выполнения полного шага) подвижной части 1 экспериментального транспортного средства, с [14].

Выполнив дифференцирование выражения (7), подставив в уравнение (5) и заменив реакции выражениями (13) получаем

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 + m_2 \cdot \ddot{x}_2 = -c_2^2 \cdot x_2 + c_2^2 \cdot x_{20} - c_2^2 \cdot l_{24} - \mu_2^2 \cdot \dot{x}_2 - c_3^2 \cdot x_2 + c_3^2 x_{20} - c_3^2 \cdot l_{24} - c_3^2 \cdot l_{23} - \mu_3^2 \cdot \dot{x}_2, \quad (15)$$

Коэффициенты жесткости грунта и вязкого трения в направлении оси X для рассматриваемой системы одинаковы, таким образом после преобразования выражение (15) примет вид

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 + 2 \cdot \mu^2 \cdot \dot{x}_2 + 2 \cdot c^2 \cdot x_2 + c^2 (-2 \cdot x_{20} + 2 \cdot l_{24} + l_{23}) + m_1 \cdot \ddot{x}_1 = 0, \quad (16)$$

Выполнив дифференцирование выражения (8), подставив в уравнение (6) и заменив реакции выражениями (12) получим

$$m_1 \cdot \ddot{y}_1 + m_2 \cdot \ddot{y}_2 = -c^6 \cdot (y_2 - y_{20} + l_{24} \cdot \varphi) - \mu^6 \cdot (\dot{y}_2 + l_{24} \cdot \dot{\varphi}) - c^6 \cdot (y_2 - y_{20} + l_{24} \cdot \varphi - l_{23} \cdot \varphi) - \mu^6 \cdot (\dot{y}_4 + l_{24} \cdot \dot{\varphi} - l_{23} \cdot \dot{\varphi}) - M \cdot g, \quad (17)$$

Коэффициенты жесткости грунта и вязкого трения в направлении оси Y для рассматриваемой системы одинаковы, таким образом после преобразования выражение (17) примет вид

$$m_1 \cdot \ddot{y}_1 + m_2 \cdot \ddot{y}_2 = -2 \cdot \mu^6 \cdot \dot{y}_2 - 2 \cdot c^6 \cdot y_2 - \dot{\varphi} \cdot (2 \cdot \mu^6 \cdot l_{24} - \mu^6 \cdot l_{23}) - \varphi \cdot (2 \cdot c^6 \cdot l_{24} - c^6 \cdot l_{23}) + 2 \cdot c^6 \cdot y_{20} - M \cdot g, \quad (18)$$

Координаты центра масс C_1 от C_2 по оси Y для рассматриваемой системы выражаются формулами

$$y_1 = -y_2 + y_{20} - y_{10} + (x_1 - x_{20}) \cdot \varphi, \quad (19)$$

Дважды продифференцировав выражение 19 получаем зависимость

$$\ddot{y}_1 = -\ddot{y}_2 + \ddot{x}_1 \cdot \varphi + 2 \dot{x}_1 \cdot \dot{\varphi} + x_1 \cdot \ddot{\varphi} - x_{20} \cdot \ddot{\varphi}, \quad (20)$$

Подставив выражения (20) в уравнение (18) и выполнив преобразования получаем зависимость

$$\ddot{y}_2 \cdot (m_2 - m_1) + 2 \cdot \mu^6 \cdot \dot{y}_2 + 2 \cdot c^6 \cdot y_2 + \dot{\varphi} (m_1 \cdot x_1 - m_1 \cdot x_{20}) + \dot{\varphi} \cdot (2 \cdot \mu^6 \cdot l_{24} - \mu^6 \cdot l_{23} + 2 \cdot m_1 \cdot \dot{x}_1) + \varphi \cdot (m_1 \cdot \ddot{x}_1 + 2 \cdot c^6 \cdot l_{24} - c^6 \cdot l_{23}) = M \cdot g - 2 \cdot c^6 \cdot y_{20}, \quad (21)$$

Момент количества движения [3] и сумма моментов внешних сил имеют вид

$$K_{zc} = (J_{1c} + J_{2c}) \cdot \dot{\varphi} + m_1 \cdot \dot{x}_1 \cdot (y_c - y_1), \quad (22)$$

$$\sum M_{zc}^e = -R_{y3} \cdot (x_c + l_{24} - l_{23}) - R_{y2} \cdot (x_c + l_{24}), \quad (23)$$

где J_{cz1} , J_{cz2} – центральные моменты инерции частей экспериментального транспортного средства.

Выполнив дифференцирование выражения (22) и подставив в выражение (4), с учетом (23) получаем зависимость

$$(J_{1c} + J_{2c}) \cdot \ddot{\varphi} + m_1 \cdot \ddot{x}_1 \cdot (y_c - y_1) = -R_{y3} \cdot (x_c + l_{24} - l_{23}) - R_{y2} \cdot (x_c + l_{24}). \quad (24)$$

Для определения реакций опорной поверхности и угла крена необходимо найти зависимости $x(t)$, $y(t)$ и $\varphi(t)$. Для определения $x(t)$ необходимо решить уравнение 16 с подстановкой зависимостей из системы 12, а для определения $y(t)$ и $\varphi(t)$ необходимо решить систему из двух уравнений (21), (24) с подстановкой выражений из системы (13). В результате получатся система дифференциальных уравнений, с помощью которой можно исследовать изменение реакций опорной поверхности и угла крена в зависимости от типа грунта. Различные типы грунта моделируются изменением значений соответствующих коэффициентов c , μ , f .

Коэффициенты жесткости определяются по формулам

$$\begin{aligned} c^y &= C_y S, \\ c^x &= C_x S, \end{aligned} \quad (25)$$

где C_y , C_x – коэффициенты упругого сжатия и сдвига; S – площадь пятна контакта движителя с опорной поверхностью, м.

Коэффициенты C_y и C_x определяют по результатам испытаний. При отсутствии экспериментальных данных расчетные значения этих коэффициентов с учетом размеров движителей грунта определяют по формулам [7]

$$\begin{aligned} C_y &= C_0 [1 + P / \Delta S] \sqrt{p / p_0}, \\ C_x &= D_0 [1 + P / \Delta S] \sqrt{p / p_0}, \end{aligned} \quad (26)$$

где C_0 и D_0 – постоянные упругости грунта; P – периметр опоры; $\Delta=1 \text{ м}^{-1}$; p и p_0 – удельное статическое давление на движитель соответственно от конструкции и от штампа, использованного для определения коэффициентов C_0 и D_0 .

Используя значения модулей упругости грунтов (таблица 1), можно коэффициент C_0 рассчитать по приближенной формуле [1, 2]

$$C_0 = 0,021 \cdot E, \quad (27)$$

Коэффициенты C_0 и D_0 связаны зависимостью

$$D_0 = 0,7 \cdot C_0, \quad (28)$$

Удельное статическое давление оказывает существенное влияния на значения коэффициентов жесткости лишь при $p \leq 60 \text{ кПа}$; при $p > 60 \text{ кПа}$ можно считать C_0 и D_0 независимыми от давления. Учитывая значение давления под опорами движителей экспериментального транспортного средства на грунт, сомножителем $\sqrt{p / p_0}$ в формуле (26) можно пренебречь.

Таблица 1 – Значения модулей упругости для различных грунтов [7]
Table 1 – Elastic modulus values for different soils [7]

Виды грунтов / Types of soils	Модуль упругости E , МПа / Modulus of elasticity E , МПа
Супесь / Sandy loam	1500-4500
Мелкий песок / Fine sand	2400-3700
Глина / Clay	1100-2800

Определение значений коэффициентов вязкого сопротивления производятся по формулам [7]

$$\begin{aligned}\mu^6 &= B_y \cdot S \\ \mu^2 &= B_x \cdot S,\end{aligned}\quad (29)$$

где B_y и B_x – коэффициенты удельного вязкого сопротивления при сжатии и сдвиге, которые связаны с коэффициентом упругого сжатия соотношениями

$$\begin{aligned}B_y &= 0,014\sqrt{C_y}, \\ B_x &= 0,007\sqrt{C_x},\end{aligned}\quad (30)$$

Значения коэффициентов f для определения нормальных и касательных реакций принимаются в соответствии со справочными данными.

Результаты и обсуждение. Проведенные по формулам (12), (13), (16), (21) и (24) исследования характера изменения реакций опорной поверхности и угла крена на различных грунтах при перемещении шагающим способом перемещения транспортного средства (рисунок 1, 2) позволили:

- получить зависимости изменения касательных реакций опорной поверхности R_{x2} , R_{x3} на грунте типа суглинок. Значения реакций изменяются в интервале 3,5-3,94 Н (рисунок 3);

- получить зависимости изменения угла крена на различных грунтах при перемещении шагающим способом экспериментального транспортного средства (рисунок 4). Максимальный угол наклона наблюдается на глинистых грунтах $\varphi_3=2,75^\circ$, а минимальный на мелком песке $\varphi_2=2,23^\circ$, в свою очередь на суглинистых грунтах угол наклона составил $\varphi_1=2,52^\circ$;

- определить зависимость изменения нормальных реакций опорной поверхности на различных грунтах при перемещении шагающим способом экспериментального транспортного средства (рисунок 5). Реакции опорной поверхности перераспределяются между движителями, находящимися в контакте с опорной поверхностью (рисунок 1, 2), причем нагрузка на движители средней оси R_{y21} , R_{y22} , R_{y23} возрастает, а крайней задней оси R_{y31} , R_{y32} , R_{y33} снижается. В свою очередь при работе на различных грунтах реакции опорной поверхности изменяются, так из рассмотренных в исследовании грунтов максимальные реакции на средней оси наблюдаются на мелком песке $R_{y22}=880$ Н, а минимальные на глинистом грунте $R_{y22}=670$ Н. На крайней задней оси максимальные реакции опорной поверхности на глинистых основаниях $R_{y33}=395$ Н, а минимальные на мелком песке $R_{y32}=350$ Н.

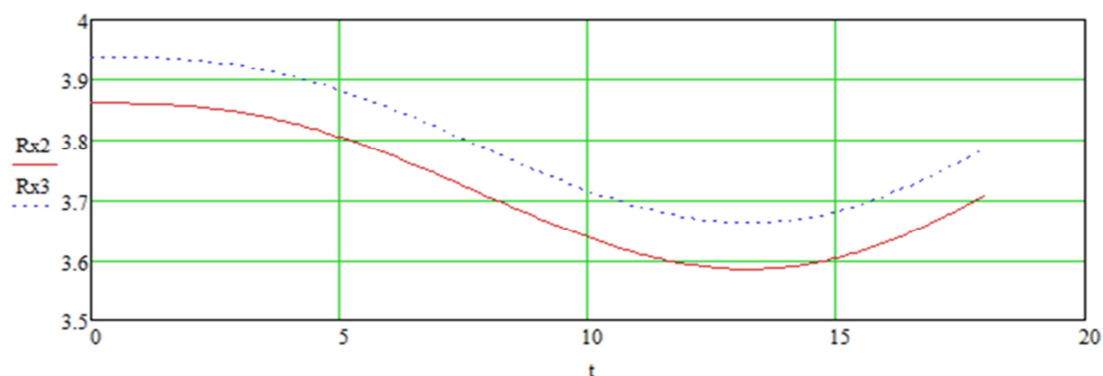


Рисунок 3 – Зависимость касательных реакций R_{x2} , R_{x3} (Н) опорной поверхности на грунте суглинок при перемещении шагающим способом экспериментального транспортного средства

Figure 3 – Dependence of tangential reactions R_{x2} , R_{x3} (N) of the supporting surface on loam soil when moving the moving an experimental vehicle by walking

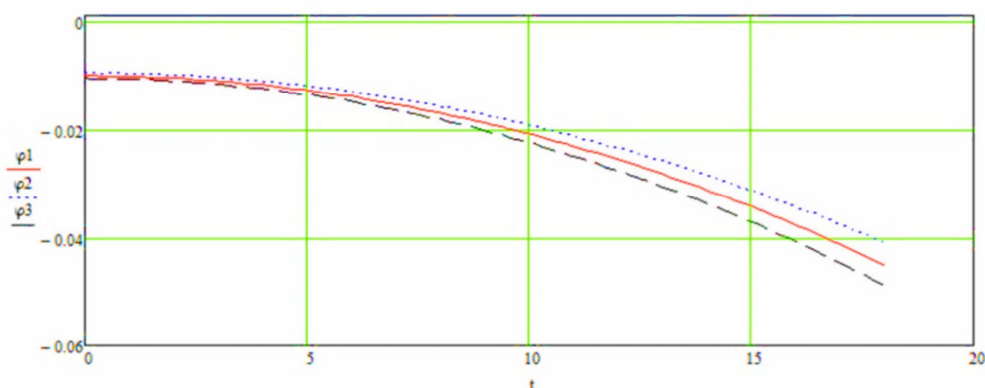


Рисунок 4 – Зависимость углов крена φ_1 , φ_2 , φ_3 (рад) соответственно на грунтах суглинок, мелкий песок, глина при перемещении шагающим способом экспериментального транспортного средства
Figure 4 – Dependence of roll angles φ_1 , φ_2 , φ_3 (rad), respectively, on soils of loam, fine sand, clay when moving the moving of an experimental vehicle in a walking manner

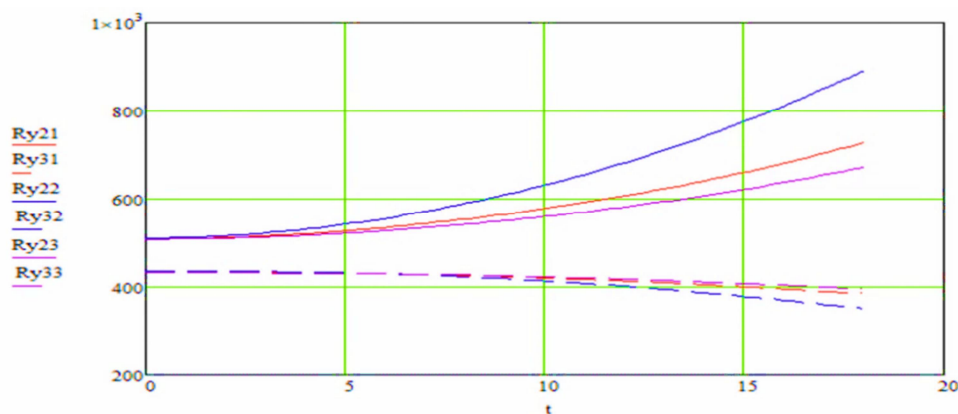


Рисунок 5 – Зависимость нормальных реакций R_{y21} , R_{y31} , R_{y22} , R_{y32} , R_{y23} , R_{y33} (Н) опорной поверхности соответственно по грунтам суглинок, мелкий песок, глина при перемещении шагающим способом экспериментального транспортного средства
Figure 5 – Dependence of normal reactions R_{y21} , R_{y31} , R_{y22} , R_{y32} , R_{y23} , R_{y33} (N) of the supporting surface, respectively, on soils of loam, fine sand, clay when moving the moving an experimental vehicle by walking method

Выводы. Приведенные результаты математических экспериментов позволили определить углы крена (рисунок 4) и реакции опорных поверхностей для некоторых видов грунтов (рисунок 3, 5). Полученная информация показывает, что при шагающем способе передвижения в опорных стойках движителей происходит перераспределение нагрузок и под опорами движителей происходит необратимая деформация опорной поверхности, вследствие чего образуется угол наклона корпуса экспериментального транспортного средства. В рамках исследования установлено, что на различных грунтовых поверхностях угол крена не превышает 3° , что позволяет экспериментальному транспортному средству при использовании технических возможностей механизма продольного передвижения корпуса с кабиной передвигаться шагающим способом без риска опрокидывания при выполнении «шага» (рисунок 4). В свою очередь, в ходе исследований определены нормальные реакции опорных поверхностей – не более 880 Н на две стойки движителя, расположенные по разные стороны бортов экспериментального транспортного средства (рисунок 5). Полученные значения нормальных реакций опорных поверхностей являются основанием при выполнении проектных прочностных расчетов стоек движителей с учетом динамики работы, включая шагающий способ передвижения.

Conclusions. The results of mathematical experiments made it possible to determine the angles of heeling (Figure 4) and the reaction of the supporting surfaces for some types of soils (Figures 3, 5). The information obtained shows that during the walking method of movement in the propeller support legs, there is a redistribution of loads and irreversible deformation of the supporting surface

occurs under the propeller supports, as a result of which the angle of inclination of the body of the experimental vehicle is formed. Within the framework of the study, it was established that on various soil surfaces, the roll angle does not exceed 30, which allows the experimental vehicle, using the technical capabilities of the mechanism of longitudinal movement of the hull with the cab, to move in a walking way without the risk of overturning when performing a "step" (Figure 4). In turn, in the course of the studies, the normal reactions of the supporting surfaces were determined – no more than 880 N per two propeller struts located on opposite sides of the sides of the experimental vehicle (Figure 5). The obtained values of normal reactions of the supporting surfaces are the basis for performing the design strength calculations of the propeller struts, taking into account the dynamics of operation, including the walking method of movement.

Библиографический список

1. Алейников Ю. Г., Дидманидзе О. Н. Моделирование движения опоры шагающей машины с динамической устойчивостью при помощи стенда. Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31. № 1. С. 80-96.
2. Брискин Е. С., Чернышев В. В., Малолетов А. В. Исследование механизма преодоления локальных препятствий мобильными робототехническими системами с шагающими движителями. Мобильные роботы и мехатронные системы: сборник материалов научной школы-конференции. М.: МГУ, 2004. С. 167-179.
3. Градетский В. Г., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Движение мобильного робота по горизонтальным, наклонным и вертикальным поверхностям при наличии возмущений и подвижных препятствий. Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 3.
4. Дидманидзе О. Н., Митягина Я. Г., Алейников Ю. Г. Методика определения рабочего пространства опоры. Плоды и овощи – основа структуры здорового питания человека. Мичуринск: ОАО "Издательский дом "Мичуринск", 2012. С. 378-380.
5. Дидманидзе О. Н., Митягина Я. Г., Алейников Ю. Г. Особенности применения датчиков в автоматической системе движения шагающих машин. Международный технико-экономический журнал. 2012. № 5. С. 72-75.
6. Дидманидзе О. Н., Митягина Я. Г., Алейников Ю. Г. Принцип перемещения опор шагающих машин во время движения. Плоды и овощи – основа структуры здорового питания человека. Мичуринск: ОАО "Издательский дом "Мичуринск", 2012. С. 381-384.
7. Методические рекомендации по определению динамических свойств грунтов, скальных пород и местных строительных материалов П 01-72.8.
8. Мясников А. С., Фомин С. Д. Повышение проходимости машинно-тракторных агрегатов на основе оптимизации способов передвижения. Перспективные тенденции развития научных исследований по приоритетным направлениям модернизации АПК и сельских территорий в современных социально-экономических условиях: мат. нац. науч.-практич. конф. Волгоград, 2021. Т. 3. С. 451-457.
9. Мясников А. С., Фомин С. Д. Численное моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния конструктивных деталей и сборочных узлов экспериментального транспортного средства с комбинированным способом передвижения для АПК. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1 (69). С. 575-587.
10. Фомин С. Д. Математическая модель для исследования неустановившегося криволинейного движения погрузочно-транспортного агрегата. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 1 (45). С. 234-245.
11. Чернышев А. С., Губарев С. А. Учет реологических особенностей грунта. Вектор ГеоНаук. 2016. № 1 (1). 3 с.
12. Чернышов В. В., Шаронов Н. Г., Вершинина И. П., Гончаров А. А. Динамика изменения опорных реакций двуногого шагающего движителя на деформируемых грунтах. Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 145-152.
13. Чернышов В. В., Арыканцев В. В. Моделирование взаимодействия стопы шагающего движителя с водонасыщенными грунтами. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 4 (20).
14. Briskin E. S. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application). Emerging Trends in Mobile Robotics: proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Japan, 2010. Pp. 769-776.

References

1. Aleinikov Y. G., Didmanidze O. N. Simulation of the Motion of a Walking Machine Support with Dynamic Stability Using a Stand. Engineering technologies and systems. 2021. T. 31. № 1. Pp. 80-96.
2. Briskin E. S., Chernyshev V. V., Maloletov A. V. Investigation of the Mechanism for Overcoming Local Obstacles by Mobile Robotic Systems with Walking Propulsion. Mobile Robots and Mechatronic Systems: Collection of Materials of the Scientific School-Conference. Moscow, MGU Publ., 2004. Pp. 167–179.
3. Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N. Motion of a Mobile Robot on Horizontal, Inclined and Vertical Surfaces in the Presence of Perturbations and Movable Obstacles. Mechatronics, automation, control. 2015. V. 16. № 3.
4. Didmanidze O. N., Mityagina Y. G., Aleinikov Y. G. Methods of determining the working space of support. Fruits and vegetables are the basis of the structure of a healthy human diet. Michurinsk: OAO "Publishing House "Michurinsk", 2012. Pp. 378-380.
5. Didmanidze O. N., Mityagina Y. G., Aleinikov Y. G. Features of the Use of Sensors in the Automatic Motion System of Walking Machines. International Technical and Economic Journal. 2012. № 5. Pp. 72-75.
6. Didmanidze O. N., Mityagina Y. G., Aleinikov Y. G. Principle of Movement of Walking Machine Supports during Movement. Fruits and vegetables are the basis of the structure of a healthy human diet. Michurinsk: OAO "Publishing House "Michurinsk", 2012. Pp. 381-384.

7. Methodical recommendations for determining the dynamic properties of soils, rocks and local building materials P 01-72.8.
8. Myasnikov A. S., Fomin S. D. Improving the Cross-Country Ability of Machine-Tractor Units on the Basis of Optimization of Moving Methods. Promising trends in the development of scientific research in priority areas of modernization of the agro-industrial complex and rural areas in modern socio-economic conditions. national. Scientific and Practical Conf. Volgograd, 2021. V. 3. Pp. 451-457.
9. Myasnikov A. S., Fomin S. D. Numerical Modeling and Analysis of the Stress-Strain State of Structural Parts and Assembly Units of an Experimental Vehicle with a Combined Method of Movement for the Agro-Industrial Complex. Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2023. № 1 (69). Pp. 575-587.
10. Fomin S. D. Mathematical Model for the Study of Unsteady Curvilinear Motion of a Loading and Transport Unit. Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2017. № 1 (45). Pp. 234-245.
11. Chernyshev A. S., Gubarev S. A. Taking into account the rheological features of the soil. GeoScience Vector. 2016. № 1 (1). 3 p.
12. Chernyshov V. V., Sharonov N. G., Vershinina I. P., Goncharov A. A. Dynamics of Changes in the Support Reactions of a Bipedal Walking Propulsion on Deformable Soils. Electrotechnical systems and complexes. 2013. № 21. Pp. 145-152.
13. Chernyshov V. V., Arykantsev V. V. Modeling of the Interaction of the Foot of the Walking Propulsion Unit with Water-Saturated Soils. Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2015. № 4 (20).
14. Briskin E. S. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application). Emerging Trends in Mobile Robotics: proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Japan, 2010. Pp. 769-776.

Информация об авторах

Мясников Алексей Сергеевич, преподаватель ЧПОУ «Газпром колледж Волгоград им. И. А. Матлашова» (Российская Федерация, 400011, г. Волгоград, проспект Университетский, д. 71.), e-mail: Alexey1987M@yandex.ru
Фомин Сергей Денисович, доктор технических наук, профессор кафедры "Механика", ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, проспект Университетский, д. 26), e-mail: fsd_58@mail.ru
Воробьева Наталья Сергеевна, доктор технических наук, профессор кафедры "Механика", ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, проспект Университетский, д. 26), e-mail: vgsha@mail.ru
Жога Виктор Викторович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры "Теоретическая механика", ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (Российская Федерация, 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28), e-mail: viczhoga@gmail.com

Author's Information

Myasnikov Aleksey Sergeevich, Lecturer, Gazprom College Volgograd named after I. A. Matlashov (Russian Federation, 400011, Volgograd, Universitetsky Ave., 71), e-mail: Alexey1987M@yandex.ru
Fomin Sergey Denisovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Mechanics, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Volgograd, Universitetsky Ave., 26), e-mail: fsd_58@mail.ru
Vorobyeva Natalya Sergeevna, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Mechanics, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Volgograd, Universitetsky Ave., 26), e-mail: vgsha@mail.ru
Zhoga Viktor Viktorovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Theoretical Mechanics, Volgograd State Technical University (Russian Federation, 400005, Volgograd, Lenin Ave., 28), e-mail: viczhoga@gmail.com