

11. Degirmenci H., Tanriverdi C., Arslan F. Assessment of irrigated areas by sprinkler and drip irrigation methods in lower Seyhan plain. *Kahramanmaraş suture imam university journal of natural sciences*. 2016. Vol. 19. I. 4. Pp. 454-461.

12. Goosheh M., Pazira E., Gholami A., Andarzian B., Panahpour E. Improving irrigation scheduling of wheat to increase water productivity in shallow groundwater conditions using aquacrop. *Irrigation and drainage*. 2018. V. 67. I. 5. Pp. 738-754.

13. Santos O. F., Cunha F. F., Taira T. L. Increase in pea productivity associated with irrigation management. *Horticultura Brasileira*. 2018. Vol. 36. I. 2. Pp. 178-183.

Информация об авторах

Пенькова Раиса Ивановна, научный сотрудник ВНИИОЗ – филиала ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова», (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, ул. Тимирязева, д. 9), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9348-4408>, e-mail: raja14-1@mail.ru

Майер Александр Владимирович, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник ВНИИОЗ – филиала ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова» (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, ул. Тимирязева, д. 9), ORCID: <https://orcid.org/1000-0002-0065-8916>, e-mail: vkovniigim@yandex.ru

Author's Information

Penkova Raisa Ivanovna, Researcher at the VNIIOZ – branch of the Federal State Budgetary scientific institution "Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Melioration named after A. N. Kostyakov", (Russian Federation, 400002, Volgograd, Timiryazeva str., 9), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9348-4408>, e-mail: raja14-1@mail.ru

Mayer Aleksander Vladimirovich, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher at VNIIOZ – branch of the Federal State budgetary scientific institution "Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Melioration named after A. N. Kostyakov" (Russian Federation, 400002, Volgograd, Timiryazeva str., 9), ORCID: <https://orcid.org/1000-0002-0065-8916>, e-mail: vkovniigim@yandex.ru

DOI: 10.32786/2071-9485-2024-02-45

ENERGY CONSUMPTION FOR THE COMBINED MOVEMENT OF AN EXPERIMENTAL VEHICLE ON A DEFORMABLE SURFACE

¹Myasnikov A. S., ²Fomin S. D., ²Gapich D. S.

¹ChPOU "Gazprom College Volgograd named after. I. A. Matlashov"

²Volgograd State Agrarian University
Volgograd, Russian Federation

Corresponding author E-mail: fsd_58@mail.ru

Received 10.12.2023

Submitted 26.03.2024

Abstract

Introduction. The combined method of transportation assumes the ability for an experimental vehicle to move by rolling on the bases with a load-bearing capacity sufficient for adhesion and walking, provided that the load-bearing capacity to move in the first way is not enough. The combined method of movement allows, without the use of external sources of energy and attachment to surrounding objects on the ground, to increase the cross-country ability of an experimental vehicle, which is determined in the study by the indicators of work spent on soil deformation when moving by rolling and walking methods. **Object.** The object of the study is the results of energy costs when moving by rolling and walking methods of an experimental vehicle. **Materials and methods.** Energy costs for movement in a combined way are defined as the work spent on soil deformation when overcoming the test section using the rolling and walking methods. Based on the results of the study, dependency graphs were constructed and conclusions were drawn. **Results and conclusions.** A comparative analysis of the results of theoretical studies of the energy costs of moving using a combined method showed that when moving using the rolling method, compared to the walking method, significantly more work is spent on soil deformation when moving, and that moving using the walking method allows the vehicle to get out without the use of external energy sources and continue a similar movement along the base with a weak load-bearing capacity until its adhesion properties allow you to switch to a higher-speed method of movement – rolling.

Keywords: *experimental vehicles, rolling motion, stepping motion, combined modes of propulsion.*

Citation. Myasnikov A. S., Fomin S. D., Gapich D. S. Energy consumption for the combined movement of an experimental vehicle on a deformable surface. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2024. 2(74). 383-393 (in Russian). DOI:10.32786/2071-9485-2024-02-45.

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

ЭНЕРГОЗАТРАТЫ НА ПЕРЕДВИЖЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПО ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

¹Мясников А. С., преподаватель

²Фомин С. Д., доктор технических наук, доцент

²Гапич Д. С., доктор технических наук, профессор

¹ЧПОУ «Газпром колледж Волгоград им. И. А. Матлашова»

²ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ

г. Волгоград, Российская Федерация

Актуальность. Комбинированный способ передвижения предполагает возможность движения экспериментального транспортного средства качением по основаниям с достаточной для сцепления несущей способностью и шаганием при условии, что несущей способности двигаться первым способом недостаточно. Комбинированный способ передвижения позволяет без использования внешних источников энергии и привязанности к окружающим объектам на местности повысить опорную проходимость экспериментального транспортного средства, которая определяется в исследовании показателями работы, затрачиваемой на деформацию грунта при передвижении способами качения и шагания. **Объект.** Объектом исследования являются энергетические затраты при передвижении способами качения и шагания экспериментального транспортного средства. **Материалы и методы.** Энергетические затраты на передвижение комбинированным способом определены как работа, затрачиваемая на деформацию грунта при преодолении зачетного участка способами качения и шагания. По результатам исследования построены графики зависимостей, сделаны выводы. **Результаты и выводы.** Проведенный сравнительный анализ результатов теоретических исследований энергетических затрат на передвижение комбинированным способом показал, что при движении способом качения по сравнению со способом шагания затрачивается при движении значительно большая работа по деформации грунта, причем передвижение способом шагания позволяет выбраться транспортному средству без использования внешних источников энергии и продолжить аналогичное движение по основанию со слабой несущей способностью до тех пор, пока его сцепные свойства не позволят перейти на более скоростной способ движения – качением.

Ключевые слова: экспериментальные транспортные средства, движение качения, движение шагания, комбинированные способы движения.

Цитирование. Мясников А. С., Фомин С. Д., Гапич Д. С. Энергозатраты на передвижение комбинированным способом экспериментального транспортного средства по деформируемой поверхности. *Известия НВ АУК.* 2024. 2(74). 383-393. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-02-45.

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. Комбинированный способ передвижения предполагает возможность движения транспортного средства посредством качения по основаниям с достаточными сцепными свойствами и посредством шагания при условии, что несущей способности двигаться первым способом недостаточно [1-5]. Комбинированный способ передвижения позволяет без использования внешних источников энергии и привязанности к окружающим объектам на местности повысить опорную проходимость экспериментального транспортного средства [6-10]. Предлагаемое нами экспериментальное транспортное средство, способное передвигаться по опорной поверхности комбинированным способом – качением и шаганием [11-14], состоит из следующих сборочных узлов (рисунок 1) [15-17]: 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; 12 – кабина; 13 – кузов.



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

Материалы и методы. При исследовании энергозатрат на передвижение экспериментального транспортного средства с эластичными ведущими колесами по деформируемой поверхности в работе приняты следующие допущения [18]:

- колеса транспортного средства движутся в установившемся режиме по горизонтальной поверхности, в связи с этим центр масс не изменяет своего положения;
- грунт является однородным, в связи с чем учитываются только пластические деформации грунта, упругие ввиду их малости не учитываются;
- давление на площади контакта шины с грунтом принимаем осредненным;
- энергозатраты на движение экспериментального транспортного средства по деформируемой поверхности определяются показателем работы, затрачиваемой при движении качением на сдвиг и срез грунта соответственно под грунтозацепами движителя и его боковыми гранями, а при шагающем передвижении – на деформацию грунта под движителями. Передвижение выполняется на зачетном участке, длина которого постоянна для работы в режиме качения и шагания;
- скорость движения способами качения и шагания постоянна при передвижении экспериментального транспортного средства по зачетному участку.

Передвижение качением. Сцепление опорной поверхности колес транспортного средства с грунтом происходит за счет сил трения, возникающих между шиной и грунтом, а также силы сдвига и среза грунтовых кирпичей, зажатых между грунтозацепами. При установившемся движении колес сдвиг и срез грунтовых кирпичей происходит в основном в периоды выхода последнего грунтозацепа опорной поверхности колес из грунта. В этот момент нагрузка от вышедшего из зацепления грунтозацепа перераспределяется на остальные, находящиеся в зацеплении [18-21].

Касательная сила тяги каждого из ведущих колес транспортного средства равна сумме сил трения, реакций сдвига и среза на каждом грунтозацепе и определяется по формуле [10, 11].

$$F_k = \frac{f_{ск} \cdot k_r \cdot G}{\delta \cdot L} \cdot \left[\ln \left(ch \frac{\delta \cdot L}{k_r} - f_{np} \cdot \left(\frac{1}{ch \frac{\delta \cdot L}{k_r}} - 1 \right) \right) + 2 \cdot \tau_{cp} \cdot \frac{h_z \cdot L}{t} \right], \quad (1)$$

где $f_{ск}$ – коэффициент трения скольжения, принимаемый в зависимости от типа грунта; G – нормальная нагрузка, образуемая от снаряженной массы транспортного средства и перевозимого им груза, Н; δ – коэффициент буксования движителей транспортного средства, зависящий от нормальной нагрузки, типа и состояния грунта; τ_{cp} – модуль среза, принимаемый в зависимости от типа грунта; t – шаг грунтозацепов, мм; h_z – высота грунтозацепов, мм; k_r – коэффициент деформации, мм, определяемый по формуле

$$k_T = 0,4 \cdot t, \quad (2)$$

f_{np} – приведенный коэффициент трения, определяемый по формуле

$$f_{np} = 2,55 \cdot \left(\frac{f_n - f_{ск}}{f_{ск}} \right)^{0,825}, \quad (3)$$

f_n – коэффициент трения покоя приближенно равный тангенсу угла внутреннего трения грунта; L – длина площади контакта, мм, определяемая по формуле [8,9]

$$L = r_{np} \cdot \alpha_0 + \sqrt{2 \cdot r_{np} \cdot h}, \quad (4)$$

где α_0 – коэффициент, определяемый по формуле [8, 9]

$$\alpha_0 = \arctg \sqrt{\frac{2 \cdot r_{np} \cdot h - h^2}{r_{np} - h}}, \quad (5)$$

где h – глубина колеи, мм; r_{np} – приведенный радиус колеса, мм, определяемый по формуле [18,19]

$$r_{np} = [(D_0 + \frac{h_{ш}}{h} (D_0 - 2 \cdot h - h_{ш}))] / 2, \quad (6)$$

где D_0 – статический диаметр колеса, мм; $h_{ш}$ – статический прогиб шины при нагрузке G_k , мм, определяемый по формуле Хейдекеля [18]

$$h_{ш} = \frac{G_k}{\pi \cdot D_0 \cdot p_w}, \quad (7)$$

где G_k – вертикальная нагрузка на движитель, Н; p_w – внутреннее давление в шинах транспортного средства, МПа;

Исходные данные для определения касательной силы тяги на передвижение экспериментального транспортного средства по деформируемой поверхности в режиме качения представлены в таблице 1. Пределы изменения буксования взяты из расчета минимальные 5% и максимальные 100%, при котором передвижение способом качения невозможно, а нормальные нагрузка колеблется от 480 Н (без груза) до 960 Н (максимальная загрузка).

Таблица 1 – Исходные данные для определения касательной силы тяги F_k

Table 1 – Input Data for Determination of Shear Thrust Force F_k

Наименование параметра / Parameter name	Величина параметра / Parameter value
Тип грунта / Soil type	Влажный суглинок легкий / Wet loam is light
Влажность грунта, % / Soil moisture, %	30-35
Коэффициент трения скольжения $f_{ск}$ / Slip friction coefficient f_{sk}	0,6
Коэффициент буксования движителей δ / Thrust coefficient δ	0,05...1,0
Модуль среза $\tau_{ср}$, Н/м / Shear modulus τ_{sr} , N/m	$1,5 \cdot 10^3$
Коэффициент трения покоя f_n / Coefficient of friction at rest f_p	0,7
Снаряженная масса транспортного средства, кг / Curb weight of the vehicle, kg	48
Масса транспортного средства с грузом G , Н / Laden vehicle mass G , N	480...960
Вертикальная нагрузка на движитель max. G_k , Н / Vertical load on propulsion max. G_k , N	160
Статический диаметр колеса D_0 , мм / Static wheel diameter D_0 , mm	215
Шаг грунтозацепов движителя t , мм / Propeller lug pitch t , mm	17,9
Высота грунтозацепов h_z , мм / Lug height h_g , mm	4
Глубина колеи h , мм / Track depth h , mm	20
Внутреннее давление в шинах транспортного средства p_w , Мпа / Internal tyre pressure of vehicle p_w , Mpa	0,2

Результаты и обсуждение. Решение уравнения 1 в зависимости от изменения нормальной нагрузки G , H и буксования δ приведено на рисунке 1.

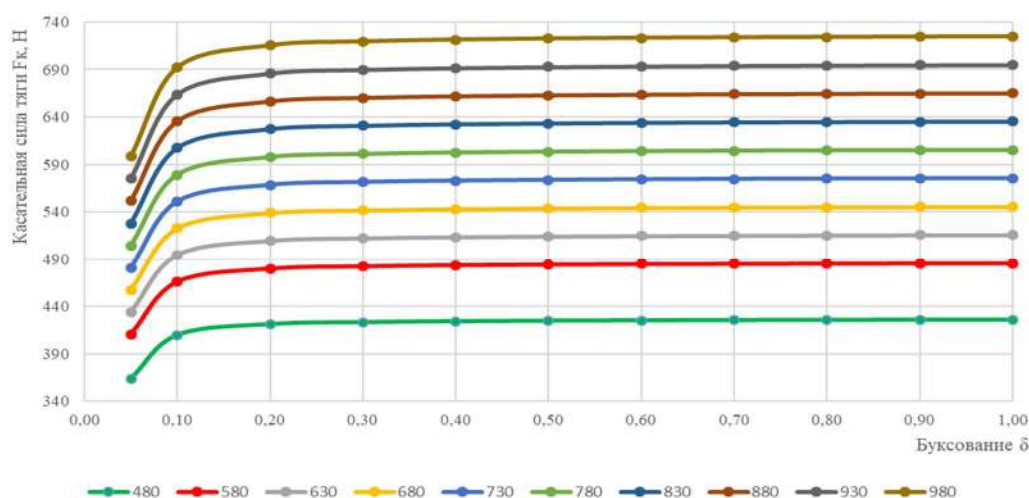


Рисунок 2 – Зависимость касательной силы тяги F_k от нормальной нагрузки G и буксования δ экспериментального транспортного средства

Figure 2 – Dependence of tangential traction force F_k on normal load G and slipping δ of an experimental vehicle

Из результатов расчетов видно, что при увеличении нормальной нагрузки G на экспериментальное транспортное средство касательная сила тяги F_k увеличивается. При постоянной нормальной нагрузке G и буксовании не более $\delta \leq 20\%$ касательная сила тяги F_k увеличивается значительно, после 20% изменение F_k происходит незначительно, а по мере приближения $\delta \rightarrow 100\%$ $F_k \rightarrow \text{const}$.

Работу по передвижению экспериментального транспортного средства по деформируемой поверхности в режиме качения при установившейся касательной силе тяги $F_k \rightarrow \text{const}$ (при $\delta \geq 20\%$) можно определить по формуле

$$A = F_k \cdot S, \quad (8)$$

где S – длина пройденного пути (зачетного участка) экспериментальным транспортным средством, м.

При движении качением пройденный путь можно определить по формуле

$$S = V_1 \cdot t, \quad (9)$$

где t – время передвижения экспериментальным транспортным средством зачетного участка, с; V_1 – установившаяся линейная скорость передвижения экспериментального транспортного средства на зачетном участке, м/с, которая связана с угловой скоростью на валу двигателя выражением

$$V_1 = \omega_1 \cdot R = (\pi \cdot n_1 \cdot D) / 60, \quad (10)$$

где ω_1 – угловая скорость вращения движителя, об/мин; R , D – радиус, диаметр движителя, м; n_1 – количество оборотов вала двигателя, об/мин.

Таким образом, с учетом формул 8 – 10, энергозатраты на передвижение экспериментального транспортного средства движением качения будет определяться по формуле

$$A = (F_k \cdot \pi \cdot D \cdot n_1 \cdot t) / 60, \quad (11)$$

Анализ изменения энергозатрат на преодоление зачетного участка $S=1$ м по основанию влажный суглинок легкий при постоянной скорости передвижения $n=\text{const}$ способом качения в зависимости от нормальной нагрузки G влияющей на касательную силу тяги F_k (рисунок 1) приведен на рисунке 2, согласно которому зависимости имеют линейный характер, минимальные значения наблюдаются при нормальной нагрузке $G=480$ Н и $\delta=0,05$, а максимальные при $G=960$ Н и $\delta=1,0$, при которых соответственно $A_{\text{мин}}=364$ Дж, $A_{\text{макс}}=725$ Дж, причем при $\delta \geq 20\%$ энергозатраты изменяются незначительно, что обусловлено незначительными изменениями F_k в интервале $20\% \leq \delta \leq 100\%$ при постоянной нагрузке G (рисунок 1).

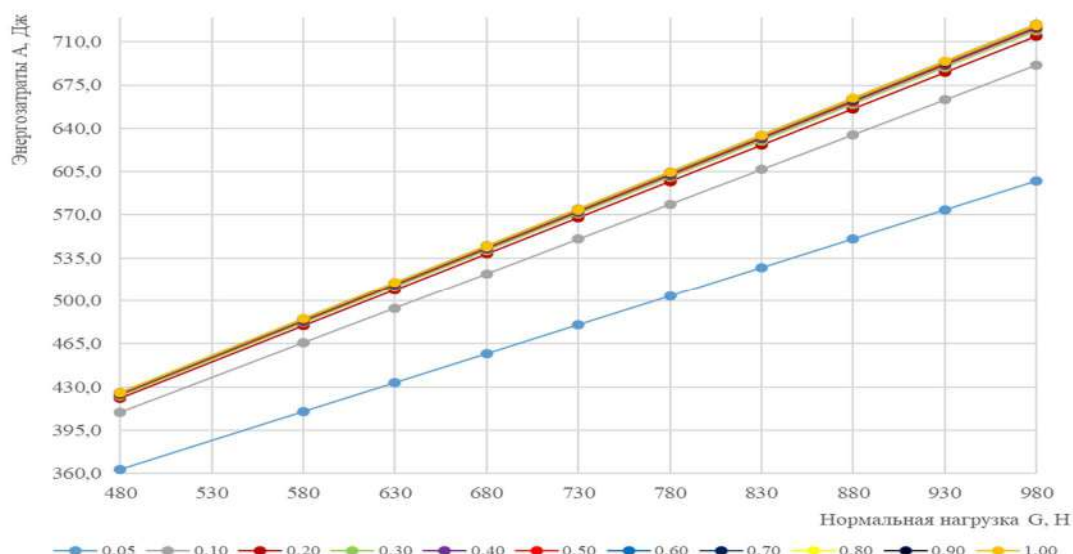


Рисунок 3 – Кривые изменения энергозатрат в зависимости от нормальной нагрузки G и буксования δ на преодоление способом качения экспериментальным транспортным средством зачетного участка $S=1$ м

Figure 3 – Curves of changes in energy consumption depending on the normal load G and slipping δ to overcome the testing section $S=1$ m by an experimental vehicle using the rolling method

Передвижение шаганием. Согласно [22] для шагающего движителя энергозатраты по деформации грунта зависят от длины шага и площади опоры и определяются по формуле

$$A = \frac{L}{l_{ш}} \cdot l_{cm} \cdot f_{ш} \cdot Q_{ш}, \quad (12)$$

где $Q_{ш}$ – вес шагающего устройства с грузом, Н; L – пройденный путь, м; $l_{ш}$ – длина шага (расстояние переноса подвижной части с движителями), м; l_{cm} – длина стопы, м, для колесного движителя зависит от нормальной нагрузки и определяется экспериментальным путем; $f_{ш}$ – коэффициент сопротивления шагнию, который определяется по формуле

$$f_{ш} = \frac{M_{дв} \cdot \omega_2}{P \cdot V_2} \cdot \eta, \quad (13)$$

где $M_{дв}$ – крутящий момент на валу электродвигателя, обеспечивающего вертикальное перемещение движителя, Н·м; ω_2 – угловая скорость вращения вала электродвигателя, рад⁻¹; P – сила, реализуемая приводом вертикального перемещения движителя, Н; V_2 – линейная скорость перемещения движителя в вертикальной плоскости, м/с, определяемая по формуле

$$V_2 = \frac{z_2 \cdot p_2 \cdot n_2}{60 \cdot 10^3}, \quad (14)$$

где n_2 – частота вращения винтовой пары двигателем, обеспечивающим вертикальное перемещение движителя, об/мин; p_2 – шаг резьбы винтовой пары вертикального перемещения подвижных частей, мм; z_2 – число заходов резьбы винтовой пары; η – коэффициент полезного действия передачи винт-гайка, определяемый по формуле [23-25]

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg}(\psi + \varphi_1)}, \quad (15)$$

где ψ – угол подъема средней винтовой линии; φ_1 – приведенный угол трения резьбы винта с треугольным профилем. Угол подъема ψ средней винтовой линии определяется по формуле [9-11]

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{H}{\pi \cdot d_2}, \quad (16)$$

где H – ход винта за один его оборот на 360° ; d_2 – средний диаметр винтовой линии, определяется по формуле

$$d_2 = \frac{d + d_1}{2}, \quad (17)$$

где d_1 – внутренний диаметр резьбы, мм; d – наружный диаметр резьбы, мм.

Приведенный угол трения φ_1 резьбы винтовой пары определяется по формуле

$$\varphi_1 = \frac{\varphi}{\cos(\alpha / 2)}, \quad (18)$$

где α – угол профиля резьбы; φ – угол трения резьбы винтовой пары, определяемы по формуле

$$\varphi = \operatorname{arctg} f, \quad (19)$$

где f – коэффициент трения винтовой пары.

С учетом формул 14 – 19 коэффициент сопротивления шаганию определяется по формуле

$$f_{wy} = \frac{M_{\text{дв}} \cdot 2\pi \cdot 10^3}{P \cdot z_2 \cdot p_2} \cdot \frac{2 \cdot H}{\pi(d + d_1) \cdot \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot H}{\pi \cdot (d + d_1)} \right) + \frac{\operatorname{arctg} f}{\cos(\alpha / 2)} \right]}, \quad (20)$$

С учетом формул 13, 21 энергозатраты по деформации грунта будут определяться выражением

$$A = \frac{L}{l_w} \cdot l_{cm} \cdot Q_{wy} \cdot \frac{M_{\text{дв}} \cdot 2\pi \cdot 10^3}{P \cdot z_2 \cdot p_2} \cdot \frac{2 \cdot H}{\pi(d + d_1) \cdot \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot H}{\pi \cdot (d + d_1)} \right) + \frac{\operatorname{arctg} f}{\cos(\alpha / 2)} \right]}, \quad (21)$$

Исходные данные для определения энергозатрат экспериментальным транспортным средством на деформацию грунта под его движителями при преодолении способом шагания зачетного участка $S=1$ м представлены в таблице 2.

Решение уравнения 21 в зависимости от изменения нормальной нагрузки, образуемой от собственного веса транспортного средства и перевозимого им груза, а также технических характеристик, заложенных в конструкцию экспериментального транспортного средства, приведено на рисунке 3. Зависимость энергозатрат на преодоление экспериментальным транспортным средством зачетного участка $S=1$ м шагающим способом от его нагрузки Q_{wy} носит линейный характер. По изменении длины шага l_w , максимальный размер которого определен конструктивным исполнением механизмов машины и составляет $l_{w.\max}=0,43$ м, энергозатраты на деформацию грунта под движителями снижаются, при снижении – увеличиваются. Так при изменении нагрузки в диапазоне $Q_{wy}=480 \dots 960$ Н энергозатраты на преодоление зачетного участка $S=1$ м составили при $l_w=0,4$ м и $Q_{wy}=480$ Н – $A_w=141$ Дж, а при $l_w=0,2$ м и $Q_{wy}=960$ Н – $A_w=476$ Дж. Увеличение энергозатрат при снижении длины шага l_w объясняется увеличением количества необходимых для преодоления зачетного участка шагов.

Таблица 2 – Исходные данные для определения затрачиваемой работы на деформацию грунта под движителями экспериментального транспортного средства при передвижении способом шагания
Table 2 – Initial data for determining the work spent on soil deformation under the propellers of the experimental vehicle when moving by the walking method

Наименование параметра / Parameter name	Величина параметра / Parameter value
Вес шагающего устройства $Q_{шy}$, Н / Weight of the walking device Q_{shu} , N	480...960
Пройденный путь L , м / Distance traveled L , m	1
Длина шага $l_{ш}$, м / Stride length l_{sh} , m	0,33
Длина стопы $l_{ст}$, м / Foot length l_{st} , m	0,08
Число заходов резьбы винтовой передачи для перемещения движителей подвижных частей z_2 в вертикальной плоскости / Number of Thread Runs of Screw Drive for Moving Moving Part Propellers z_2 in the Vertical Plane	1
Шаг резьбы винтовой передачи для перемещения движителей подвижных частей в вертикальной плоскости p_2 , мм / Screw Drive Thread Pitch for Moving Moving Parts Movers in the Vertical Plane p_2 , mm	1,5
Частота вращения винтовой пары электродвигателем, обеспечивающим перемещение движителей подвижных частей в вертикальной плоскости n_2 , об/мин. / Rotational speed of the screw pair by the electric motor that ensures the movement of the moving parts propellers in the vertical plane n_2 , rpm.	76
Крутящий момент на валу электродвигателя, обеспечивающего перемещение движителей в вертикальной плоскости $M_{де}$, Н·м / Torque on the shaft of the electric motor providing the movement of the propellers in the vertical plane M_{dv} , N·m	0,178
Сила, реализуемая приводом продольного перемещения движителей подвижных частей в вертикальной плоскости P , Н / Force Realized by the Drive of Longitudinal Motion of Moving Parts Propulsion in the Vertical Plane P , N	160
Наружный диаметр резьбы винтовой передачи вертикального перемещения движителей d , мм / Outer diameter of the thread of the screw transmission of the vertical movement of the propellers d , mm	9,968
Внутренний диаметр резьбы винтовой передачи вертикального перемещения движителей d_1 , мм / Inner diameter of the thread of the screw transmission of the vertical movement of the propellers d_1 , mm	8,344
Ход винта за один его оборот на 360° H , мм / Propeller stroke per rotation at 360° H , mm	1,5
Коэффициент трения винтовой пары f / Coefficient of friction of screw pair f	0,15
Угол профиля резьбы α , град / Thread profile angle α , deg	60

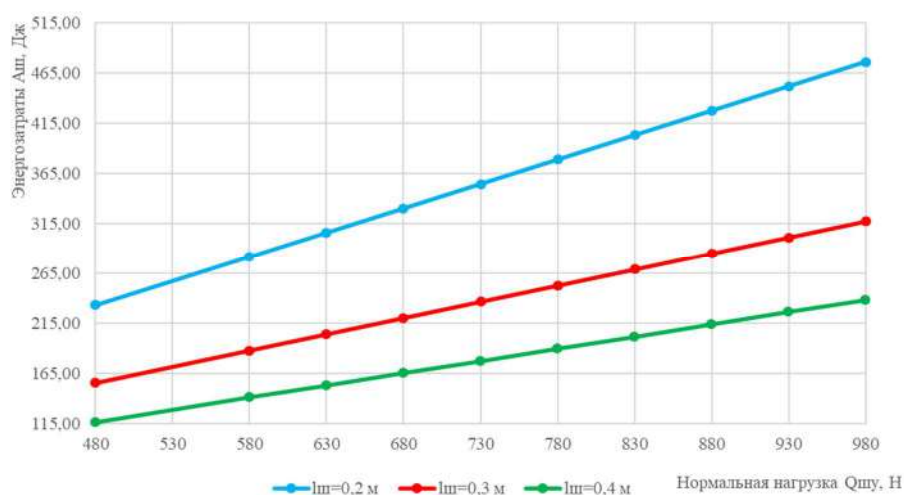


Рисунок 4 – Кривые изменения энергозатрат $A_{ш}$ на преодоление зачетного участка $S=1$ м шагающим способом в зависимости от нормальной нагрузки экспериментального транспортного средства $Q_{шy}$ и длины шага $l_{ш}$

Figure 4 – Curves of changes in energy consumption $A_{ш}$ to overcome the test section $S = 1$ m in a walking way, depending on the normal load of the experimental vehicle $Q_{шy}$ and step length $l_{ш}$

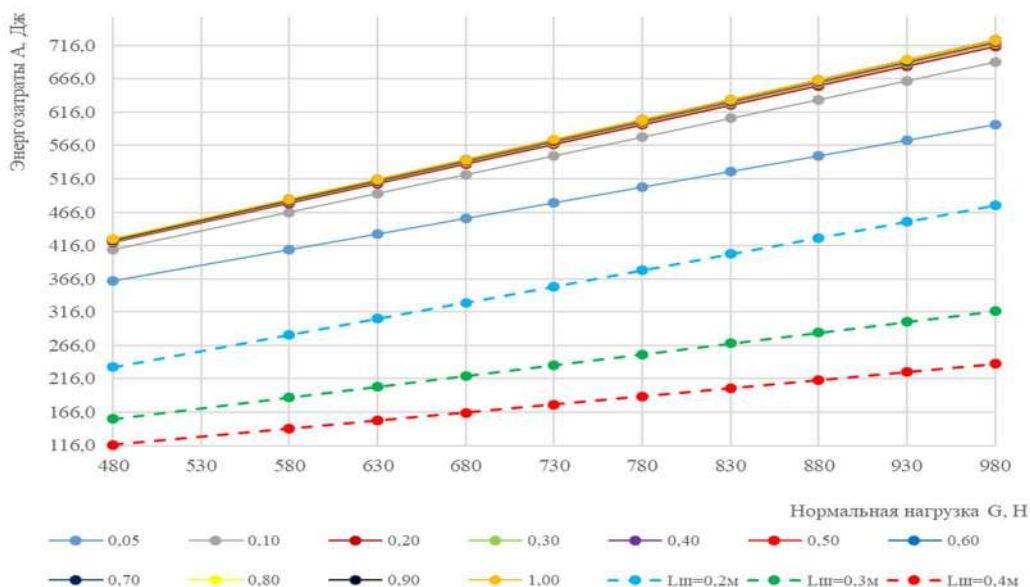


Рисунок 5 – Сравнительный анализ энергозатрат на передвижение по зачетному участку $S=1\text{м}$ с нормальной нагрузкой $480 \leq G \leq 960$ способами качения при изменении $0,05 \leq \delta \leq 1$ и шагания при изменении $0,2 \leq l_w \leq 0,4$

Figure 5 – Comparative analysis of energy consumption for movement along the test section $S=1\text{m}$ with a normal load of $480 \leq G \leq 960$ using rolling methods with a change of $0.05 \leq \delta \leq 1$ and walking with a change of $0.2 \leq l_w \leq 0.4$

Анализ полученных результатов энергозатрат на преодоление зачетного участка способами качения и шагания с учетом технических характеристик и конструктивного исполнения экспериментального транспортного средства показал, что передвижение способом качения при любой несущей способности опорной поверхности является более энергозатратным по сравнению с шагающим передвижением (рисунок 4). При $\delta \rightarrow 100\%$ наступает момент полного застревания и движение способом качения становится невозможным без использования внешних источников энергии, а дальнейшее передвижение возможно с переходом на шагающий способ движения, что в свою очередь повышает опорную проходимость экспериментального транспортного средства при его движении по опорной поверхности со слабой несущей способностью. Однако соотношение скоростей выполнения работы движениями качения и шагания с учетом технических характеристик и конструктивного исполнения экспериментального транспортного средства показало, что движение качением по сравнению с шагающим передвижением имеет значительно большую скорость, что определяет его преимущество при передвижении по основаниям с достаточной несущей способностью.

Закключение. Таким образом, использование транспортных средств с комбинированным способом передвижения позволяет передвигаться с высокой скоростью способом качения по участкам с твердым покрытием, а на участках со слабой несущей способностью – движением шагания, сохраняя возможность выполнения транспортных работ в непрерывном цикле производственного процесса вне зависимости от состояния опорной поверхности.

Conclusions. Thus, the use of vehicles with a combined mode of transport makes it possible to move at high speed by the method of rolling on sections with a hard surface, and in areas with a weak load-bearing capacity – by the movement of walking, while maintaining the possibility of performing transport work in a continuous cycle of the production process, regardless of the condition of the bearing surface.

Библиографический список

1. Скойбеда А. Т., Жуковец В. Н., Калина А. А., Комяк И. М. Перспективные ходовые системы мобильных машин. Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Т. 8. С. 100-103.
2. Гутиев Э. К. Сравнение эффективности колесных и колесно-шагающих движителей мобильных машин. Перспективы развития АПК в современных условиях. Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2022. Том 1. С. 260-263.

3. Гутиев Э. К. Обоснование выбора колесно-шагающего движителя для мобильной машины. Инновационные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2021. Ч. 2. С. 66-68.
4. Тюрин Я. И., Мандровский К. П. Исследование устойчивости колёсно-шагающих экскаваторов при помощи системы автоматизированного проектирования. Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. № 4 (55). С. 34-38.
5. Скойбеда А. Т., Калина А. А., Жуковец В. Н. Динамика и нагруженность привода колесно-шагающего движителя. Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2016. № 1 (32). С. 289-291.
6. Добрецов Р. Ю., Матросов С. И., Борисов Е. Г. О проекте рекогносцировочной машины на основе колесно-шагающего шасси. Инженерные исследования и достижения – основа инновационного развития: Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2014. С. 258-267.
7. Скойбеда А. Т., Жуковец В. Н., Комяк И. М. и др. Шагающие движители - перспективное направление создания агрофильных ходовых систем мобильных машин. Актуальные вопросы машиноведения. 2014. Т. 3. С. 102-105.
8. Андреева Е. В. Перспективные конструкции агрофильных ходовых систем мобильных машин. Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2009. № 1. С. 9.
9. Журавков М. А., Гляков С. А., Громыко А. О., Громыко О. В. Кинематический и динамический анализ колесно-шагающей машины на основе компьютерных моделей в пакетах ADAMS и VisualNastran. Теоретическая и прикладная механика: межведомственный сборник научно-методических статей. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2008. Т. 23. С. 109-111.
10. Анопоченко В. Г. Колесно-шагающие движители для колесных машин высокой проходимости. Повышение эффективности работы колесных и гусеничных машин в суровых условиях эксплуатации. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 1996. С. 8-11.
11. 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: материалы конференции. Волгоград, 2021. Т. III. С. 451-457.
12. Мясников А. С., Фомин С. Д. Повышение профильной проходимости транспортных средств для перевозки грузов в сельском хозяйстве. Известия НВ АУК. 2022. № 4 (68).
13. 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.
14. Мясников А. С., Фомин С. Д., Ярунов А. А. Полевые исследования профильной проходимости экспериментального транспортного средства для перевозки грузов в сельском хозяйстве. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 3 (71). С. 635-652.
15. Мясников А. С., Фомин С. Д., Гапич Д. С. Сравнительный анализ результатов полевых испытаний опорной проходимости экспериментального транспортного средства. Известия НВ АУК. 2024. № 1 (73). С. 392-403.
16. Мясников А. С., Фомин С. Д. Полевые исследования опорной проходимости экспериментального транспортного средства на влажном вспаханном грунте. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 3 (71). С. 469-482.
17. Мясников А. С., Фомин С. Д. Совершенствование ходовой системы роботизированной платформы. Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации: материалы Международной научно-практической конференции. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2023. Т. 5. С. 211-216.
18. Гуськов В. В., Велев Н. Н., Атаманов Ю. Е. Тракторы: Теория. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
19. Гуськов А. В. Тягово-сцепные свойства и проходимость колесного движителя по грунтам со слабой несущей способностью. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2008. № 2. С. 63-75.
20. Гуськов В. В., Дзема А. А., Колола А. С., Макаренко Р. Ю., Зетенко Н. И. Исследование процесса взаимодействия ведущих колес трактора с грунтовой поверхностью. Наука и техника, 2017. Т. 16. № 1.
21. Гуськов В. В. и др. Динамическая характеристика многоцелевых колесных машин при движении по грунтовым поверхностям. Минск: БНТУ, 2018. 38 с.
22. Игнатьев М. Б., Кулаков Ф. М., Покровский А. М. Алгоритмы управления роботами-манипуляторами. Л.: Машиностроение, 1972. 248 с.
23. Узяков Р. Н., Пояркова Е. В. Определение коэффициентов трения в резьбовом соединении. Оренбург: Оренбургский гос.ун-т. 2018. 18 с.
24. Коробова Н. П., Шум Ж. Е., Тукмаков В. П. и др. Определение КПД и трения скольжения винтового механизма. Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. 16 с.
25. Варганов В. О., Аввакумов М. В., Колычев М. В., Гребенникова В. М., Романов В. А. Передача винта. СПб. 2015. 57 с.

References

1. Skoibeda A. T., Zhukovets V. N., Kalina A. A., Komyak I. M. Perspective running systems of mobile machines. Topical Issues of Mechanical Engineering. 2019. V. 8. Pp. 100-103.
2. Gutiev E. K. Comparison of the Efficiency of Wheeled and Wheel-Walking Movers of Mobile Machines. Prospects for the development of the agro-industrial complex in modern conditions. Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University, 2022. V. 1. Pp. 260-263.
3. Gutiev E. K. Justification of the choice of a wheel-walking mover for a mobile machine. Innovative technologies for the production and processing of agricultural products. Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University, 2021. Part 2. Pp. 66-68.

4. Tyurin Y. I., Mandrovsky K. P. Study of the Stability of Wheel-Walking Excavators with the Help of a Computer-Aided Design System. Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. 2018. № 4 (55). Pp. 34-38.
5. Skoibeda A. T., Kalina A. A., Zhukovets V. N. Dynamics and Loading of the Wheel-Walking Dripper Drive. Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport. 2016. № 1 (32). Pp. 289-291.
6. Dobretsov R. Yu., Matrosov S. I., Borisov E. G. On the project of a reconnaissance machine based on a wheel-walking chassis. Engineering research and achievements are the basis of innovative development: Rubtsovsk: Rubtsovsk Industrial Institute, 2014. Pp. 258-267.
7. Skoibeda A. T., Zhukovets V. N., Komyak I. M., et al. Walking Movers - A Promising Direction for the Creation of Agrophilic Running Systems of Mobile Machines. Topical Issues of Mechanical Engineering. 2014. V. 3. Pp. 102-105.
8. Andreeva E. V. Perspective Constructions of Agrophilic Running Systems of Mobile Machines. Engineering and technical support of the agro-industrial complex. Abstract Journal. 2009. № 1. P. 9.
9. Zhuravkov M. A., Glyakov S. A., Gromyko A. O., Gromyko O. V. Kinematic and Dynamic Analysis of a Wheel-Walking Machine Based on Computer Models in ADAMS and VisualNastran Packages. Theoretical and Applied Mechanics: Interdepartmental Collection of Scientific and Methodological Articles. Minsk: Belarusian National Technical University, 2008. V. 23. Pp. 109-111.
10. Anopchenko V. G. Wheel-Walking Movers for Wheeled Vehicles of High Cross-Country Ability. Improving the efficiency of wheeled and tracked vehicles in harsh operating conditions. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 1996. Pp. 8-11.
11. Myasnikov A. S., Fomin S. D. Improving the Cross-Country Ability of Machine and Tractor Units Based on the Optimization of Movement Methods. Perspective trends in the development of scientific research in priority areas of modernization of the agro-industrial complex and rural territories in modern socio-economic conditions: conference materials. Volgograd, 2021. V. III. Pp. 451-457.
12. Myasnikov A. S., Fomin S. D. Improving the Profile Cross-Country Ability of Vehicles for Cargo Transportation in Agriculture. Izvestiya NV AUK. 2022. № 4 (68).
13. 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 Mode of Movement for the Agro-Industrial Complex. Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: science and higher professional education. 2023. № 1 (69). Pp. 575-587.
14. Myasnikov A. S., Fomin S. D., Yarunov A. A. Field Studies of Profile Cross-Country Ability of an Experimental Vehicle for Cargo Transportation in Agriculture. Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: science and higher professional education. 2023. № 3 (71). Pp. 635-652.
15. Myasnikov A. S., Fomin S. D., Gapich D. S. Comparative Analysis of the Results of Field Tests of Support Cross-Country Ability of an Experimental Vehicle. Izvestiya NV AUK. 2024. No 1 (73). Pp. 392-403.
16. Myasnikov A. S., Fomin S. D. Field Studies of the Supporting Cross-Country Ability of an Experimental Vehicle on Wet Ploughed Ground. Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: science and higher professional education. 2023. № 3 (71). Pp. 469-482.
17. Myasnikov A. S., Fomin S. D. Improvement of the running system of the robotic platform. Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex in the Context of Digital Transformation: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Volgograd: Volgograd State Agrarian University, 2023. T. 5. P. 211-216.
18. Guskov V. V., Velez N. N., Atamanov Y. E. Tractors: Theory. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 376 p.
19. Guskov A. V. Traction and Coupling Properties and Cross-Country Ability of a Wheeled Mover on Soils with Weak Bearing Capacity. Vestnik MSTU N. E. Bauman. 2008. № 2. Pp. 63-75.
20. Guskov V. V., Dzema A. A., Kolola A. S., Makarenko R. Yu., Zetenko N. I. Investigation of the Process of Interaction of the Leading Wheels of a Tractor with a Ground Surface. Science and Technology, 2017. V. 16. № 1.
21. Guskov V. V., et al. Dynamic Characteristics of Multipurpose Wheeled Machines in Unpaved Surface Movement. Minsk: BNTU, 2018. 38 p.
22. Ignatiev M. B., Kulakov F. M., Pokrovsky A. M. Algorithms for controlling robotic manipulators. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 248 p.
23. Uzyakov R. N., Poyarkova E. V. Determination of Friction Coefficients in a Threaded Connection. Orenburg: Orenburg State University. 2018. 18 p.
24. Korobova N. P., Shum Zh. E., Tukmakov V. P., et al. Determination of Efficiency and Sliding Friction of a Screw Mechanism. Samara: Samar Publishing House. State Aerospace. University, 2012. 16 p.
25. Varganov V. O., Avvakumov M. V., Kolychev M. V., Grebennikova V. M., Romanov V. A. Screw-nut transmission. St. Petersburg, 2015. 57 p.

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

Гапич Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Электроснабжение и энергетические системы" ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, проспект Университетский, д. 26), e-mail: Gds-08@mail.ru

Author's Information

Myasnikov Aleksey Sergeevich, Lecturer, Gazprom College Volgograd named after I. A. Matlashov (Russian Federation, 400011, Volgograd, Universitetsky Avenue, 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 Avenue, 26), e-mail: fsd_58@mail.ru

Gapich Dmitry Sergeevich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Energy Systems of Systems, Volgograd State Agrarian University (Russian Federation, 400002, Volgograd, Universitetsky Avenue, 26), e-mail: Gds-08@mail.ru