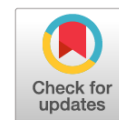


УДК 629.3.015

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106446>

Оригинальное исследование



Результаты моделирования плавности хода гусеничных машин при взаимодействии с деформируемым опорным основанием

С.В. Носов, Н.Е. Перегудов

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Движение гусеничных машин по деформируемому опорному основанию, в качестве которого может выступать, например, пересеченная местность или поле различных сельскохозяйственных культур, характеризуется различными показателями. В зависимости от условий внешней среды, параметров опорного основания и т. д. некоторые из этих показателей выбираются в качестве основных критериев оценки эксплуатационно-технических характеристик машин. Поиск оптимальных параметров и режимов работы гусеничных машин требует применять математическое моделирование рассматриваемых процессов.

Цель исследований. Получить путем имитационного моделирования графические представления о влиянии неровности пути, микропрофиля пути, скорости движения гусеничной машины, ее компоновки, характера связей отдельных агрегатов и систем, а также их свойств, физико-механических свойств опорного основания с учетом реологического подхода к их определению, параметров состояния его материала на изменение показателей плавности хода гусеничных машин.

Методы. Представлены результаты расчета показателей плавности хода различных гусеничных машин по ранее известной математической модели, учитывающие как их конструктивные и технологические характеристики, так и параметры состояния опорного основания в виде физико-механических характеристик, описываемых на основе известного реологического подхода. В качестве гусеничных машин принимались сельскохозяйственные тракторы различной массы, а также зенитно-ракетные комплексы С-300 на базе гусеничного шасси 832М.

Результаты. Анализ построенных зависимостей на основе применения имитационного моделирования позволил выявить ряд закономерностей изменения показателей плавности хода гусеничных машин. Установлено, что учет реологических характеристик слоя почвогрунта и его параметров состояния позволяет существенно повысить точность расчетов.

Получены конкретные данные по влиянию скорости движения гусеничных машин, их массы, продольной базы, смещения центра давления гусеничного движителя и других конструктивных параметров на развитие вертикальных и продольно-угловых колебаний.

Заключение. Проведенные исследования способствуют оптимальному конструированию гусеничных машин и комплектованию различных машинно-тракторных агрегатов, выполняющих соответствующие технологические операции в тех или иных условиях движения с конкретными параметрами состояния слоя опорного основания.

Ключевые слова: гусеничная машина; плавность хода; реологический подход.

Для цитирования:

Носов С.В., Перегудов Н.Е. Результаты моделирования плавности хода гусеничных машин при взаимодействии с деформируемым опорным основанием // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 2. С. 121–132. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106446>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106446>

Original study article

Results of the simulation of tracked vehicles ride considering the interaction with a deformable road

Sergey V. Nosov, Nikolay E. Peregudov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Tracked vehicles motion on a deformable road, which can be, for instance, cross-country terrain or field of various agricultural plants, is defined with various indicators. Depending on environment conditions, road surface properties etc., some of these indicators are chosen as main criteria of vehicles operational and technical performance assessment. Search of optimal parameters and operation modes of tracked vehicles demands using numerical modelling of considered processes.

AIMS: Using imitational modelling, to obtain visual representation of influence of path unevenness, path microprofile, tracked vehicle velocity, its layout, nature of relation between particular unit assemblies, systems and their properties, physical and mechanical road properties regarding rheological approach to determination of them, state parameters of road material on change of tracked vehicles ride comfort indicators.

METHODS: Results of simulation of ride comfort indicators for various tracked vehicles, obtained with the known earlier mathematical model, which considers design and technological properties of them as well as road surface state parameters, presented as physical and mechanical properties, based on a well-known rheological approach, are presented in the article. Agricultural tractors of different mass and the S-300 anti-aircraft missile systems, based on the 832M tracked chassis, are considered as tracked vehicles.

RESULTS: Analysis of obtained relations, based on use of imitational modelling, revealed a set of patterns of tracked vehicles ride comfort indicators changing. It is defined that consideration of rheological characteristics and state parameters of a soil layer helps to improve simulation accuracy significantly. The obtained data shows the influence of velocity, mass and base length of tracked vehicles, offset of pressure center of caterpillar mover and other design parameters on growth of vertical and longitudinal-angular oscillations.

CONCLUSIONS: The conducted study contributes to optimal development of tracked vehicles and assembling of different machine-tractor units, performing demanded technological operations in different conditions with specific road surface state parameters.

Keywords: *tracked vehicle; ride comfort; rheological approach.*

Cite as:

Nosov SV, Peregudov NE. Results of the simulation of tracked vehicles ride considering the interaction with a deformable road. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(2):121–132. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106446>

Received: 06.04.2022

Accepted: 15.04.2022

Published: 15.05.2022

ВВЕДЕНИЕ

Движение гусеничных машин по деформируемому опорному основанию, в качестве которого может выступать, например, пересеченная местность или поле различных сельскохозяйственных культур, характеризуется различными показателями. В зависимости от условий внешней среды, параметров опорного основания и т. д., некоторые из этих показателей выбираются в качестве основных критериев оценки эксплуатационно-технических характеристик машин. Задача поиска оптимальных параметров и режимов работы гусеничных машин может быть настолько сложна, что необходимо применять математическое моделирование рассматриваемых процессов.

При этом количество учитываемых факторов может быть настолько велико, что возникает вопрос о достаточности высокой степени неопределенности процессов взаимодействия гусеничных машин с деформируемым опорным основанием. Здесь могут и вынужденно проявляются такие факторы, на которые ранее не достаточно обращалось внимания при применении математического моделирования рассматриваемых процессов.

Так, в последних научных исследованиях обозначенной проблемы установлено, что в подобных ситуациях необходимо учитывать реологические свойства деформируемого опорного основания, причем с применением теории наследственной ползучести упруго-вязко-пластичных материалов, когда функции скоростей ползучести должны описываться экспоненциально-степенными выражениями, что обеспечивает более глубокое проникновение в сущность физических процессов взаимодействия гусеничных машин и их отдельных систем с опорным основанием и позволяет улучшить их эксплуатационно-технические характеристики [14].

Во время движения гусеничных машин по неровному деформируемому опорному основанию с различными реологическими свойствами возникают вынужденные колебания как машин, так и сидений рабочего места оператора. Для самих гусеничных машин эти колебания оцениваются амплитудными значениями вертикальных и продольно-угловых перемещений, что определяет такие их движения, как подпрыгивание и галопирование. При этом для упрощения исследований другими колебаниями часто пренебрегают, сводя задачу к плоскостной.

В работе [5] представлена математическая модель по оценке плавности хода гусеничного трактора, позволяющая произвести оценку вертикальных и продольно-угловых колебаний в зависимости от неровности пути, микропрофиля пути, скорости движения гусеничной машины, ее компоновки, характера связей отдельных агрегатов и систем, а также их

свойств, физико-механических свойств опорного основания с учетом реологического подхода к их определению, параметров состояния его материала. Данная модель принята в качестве основной при оценке плавности хода гусеничных машин двух типов: гусеничного сельскохозяйственного трактора и войскового унифицированного зенитно-ракетного комплекса С-300В4, принятого на вооружение в российской армии.

В данной статье представлены результаты имитационного моделирования плавности хода гусеничных машин по представленной в работе [5] математической модели с оценкой влияния на их вертикальные и продольно-угловые колебания основных эксплуатационных и конструктивных характеристик машин, а также параметров состояния опорного основания, выраженных через реологические характеристики, что определяет ее научную новизну.

Цель исследований – получить путем имитационного моделирования графические представления о влиянии неровности пути, микропрофиля пути, скорости движения гусеничной машины, ее компоновки, характера связей отдельных агрегатов и систем, а также их свойств, физико-механических свойств опорного основания с учетом реологического подхода к их определению, параметров состояния его материала на изменение показателей плавности хода гусеничных машин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Реализация поставленной цели исследований базируется на основе ранее разработанных метода оценки уплотняющего воздействия гусеничного движителя на слой почвы [2–4] и метода моделирования плавности хода гусеничных машин [5].

Исходные данные для получения результатов математического моделирования следующие. На рис. 1 представлена динамическая модель гусеничной машины для исследования вертикальных и угловых колебаний с учетом реологических свойств неровного опорного основания. При реализации этой модели приняты следующие допущения:

- 1) гусеничная машина движется прямолинейно и с постоянной скоростью;
- 2) профиль опорной поверхности под правым и левым движителями машины одинаков;
- 3) гусеницы сохраняют постоянный контакт с опорной поверхностью;
- 4) крутильные колебания трансмиссии не учитываются, а силы сопротивления движению отсутствуют;
- 5) подстилающий слой по отношению к деформируемому слою является абсолютно жестким;
- 6) принимается жестко сблокированная подвеска опорных катков;

7) внешние механические воздействия на деформируемый слой опорного основания от подстилающего слоя заданы функциями:

$$u_1 = A_u \sin \omega t + B_u \cos \omega t ;$$

$$\varphi_1 = A_\varphi \sin \omega t + B_\varphi \cos \omega t , \quad (1)$$

где $A_u, B_u, A_\varphi, B_\varphi$ – амплитудные значения колебаний; ω – частота внешнего механического воздействия.

$$P = \int_{-L/2}^{L/2} P_x dx = E' \int_{-L/2}^{L/2} u_x dx - \chi_k \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^t S(t-\tau) u_x(\tau) d\tau dx ; \quad (3)$$

$$M = \int_{-L/2}^{L/2} P_x x dx = E' \int_{-L/2}^{L/2} u_x x dx - \chi_k \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^t S(t-\tau) u_x(\tau) d\tau x dx , \quad (4)$$

где $E' = \frac{E \cdot F_k}{\varepsilon(t) \cdot h_{\text{сн}}}$ – отображение мгновенного модуля

деформации на единицу толщины деформируемого слоя опорного основания; F_k – площадь штампа; $\varepsilon(t)$ – относительная деформация слоя опорного основания при его нагружении через штамп по закону Хевисайда [6]; $h_{\text{сн}}$ – толщина деформируемого слоя опорного основания; $\chi_k = \chi_1 \cdot \chi_2 \cdot \chi_3$ – функция подобия кривых ползучести при различных параметрах состояния деформируемого слоя опорного основания (χ_1), параметрах грунтозацепов (χ_2) и характеристиках силового воздействия (χ_3), определяемая экспериментальным путем в инвариантных условиях; $S(t-\tau) = A \cdot e^{-\beta t} \cdot t^{\alpha-1}$ – ядро релаксации [6]; A, α, β – параметры ядра, определяемые по базовой кривой ползучести слоя опорного основания, полученной при штамповых испытаниях с контактными напряжениями σ_k ; e – основание натуральных логарифмов;

В i -м сечении деформируемого слоя опорного основания перемещения определяются по выражению:

$$u_x = u_1 - u_2 + x(\varphi_1 - \varphi_2) + l\varphi_2 . \quad (2)$$

Вертикальная и угловая реакции деформируемого слоя на гусеничную машину определяются суммированием вертикальных реакций $P_x(t)$ и моментов от них $P_x(t) \cdot x$ по длине опорной поверхности L :

t – текущее время; E – мгновенный модуль деформации деформируемого слоя опорного основания:

$$E = \chi_k \cdot \frac{1 + \int_0^t K(t-\tau) d\tau}{\varepsilon(t) / \sigma_k} , \quad (5)$$

где $K(t-\tau)$ – ядро ползучести [6].

При решении системы уравнений (1) – (5) получены расчетные формулы [5], по которым можно определить характеристики вертикальных $u_2(t)$ и продольно-угловых $\varphi_2(t)$ колебаний гусеничной машины при движении по неровному опорному основанию, обладающему различными реологическими свойствами. При этом имеется возможность оценить влияние на колебания гусеничной машины её основных конструктивных параметров. В силу сложных математических выражений эти формулы в данной статье не приведены.

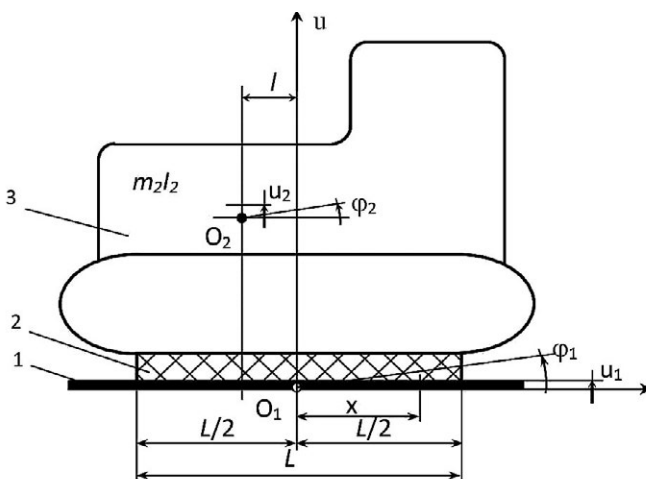


Рис. 1. Динамическая модель гусеничного трактора для исследований вертикальных и угловых колебаний с учетом реологических свойств опорного основания: 1 – подстилающий неровный слой; 2 – деформируемый слой опорного основания; 3 – гусеничная машина как абсолютно жесткое изделие массой m^2 ; u_i, φ_i – вертикальные и угловые перемещения подстилающего слоя ($i=1$) и гусеничной машины ($i=2$); l – расстояние между центром тяжести машины и серединой опорной поверхности гусениц; L – длина опорной поверхности гусениц.

Fig. 1. The dynamic model of a tracked vehicle for study of vertical on longitudinal-angular oscillations with considering of road surface rheological properties: 1 – an uneven bed course; 2 – a deformable layer of road surface; 3 – a tracked vehicle, considered as absolutely rigid body with mass of m^2 ; u_i, φ_i are vertical and angular displacement of an uneven bed course ($i=1$) and a tracked vehicle ($i=2$); l is the distance between vehicle center of mass and the center of track-ground contact; L is the length of track-ground contact.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 и 4 представлены графики изменения вертикальных и продольно-угловых колебаний гусеничных тракторов массой 4000, 7000 и 9000 кг в зависимости от параметров состояния слоя почвогрунта, а на рис. 5–8 – в зависимости от некоторых конструктивных параметров тракторов и гусеничного движителя при движении поперек пахоты при сплошной культивации с характеристикой неровностей по данным Аниловича В.Я. [7].

Здесь исходными значениями при имитационном моделировании были следующие (рис. 2): влажность почвы – 20%; плотность почвы – 1 г/см³; толщина слоя почвы – 0,3 м; параметры базовой кривой ползучести $\alpha=0,075$, $\beta=2,0$, $A=0,077$, $E_{баз}=2,5$ МПа: скорость трактора – 2 м/с; длина неровностей – 3 м; смещение центра

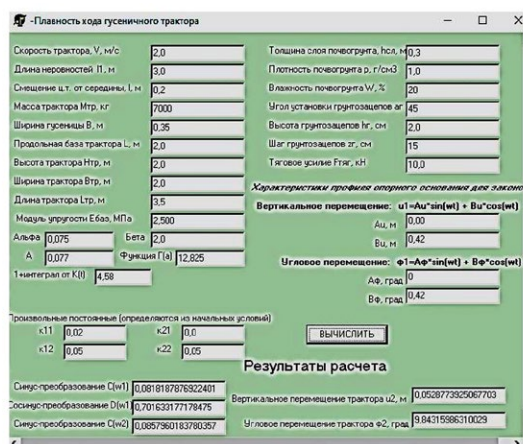


Рис. 2. Экранная форма программы по расчету показателей плавности хода гусеничных тракторов.

Fig. 2. The window of the program of calculation of tracked vehicles ride comfort characteristics.

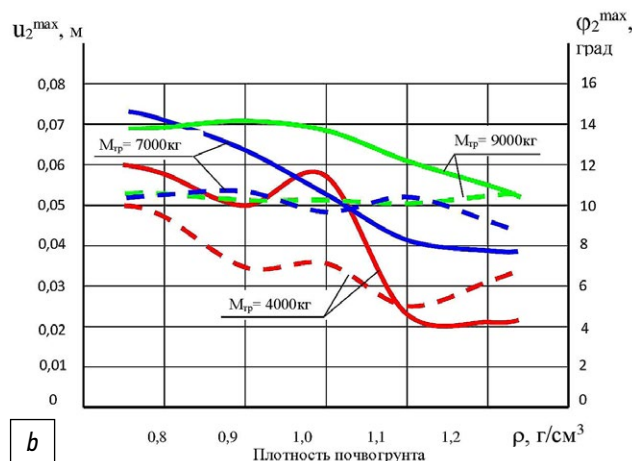
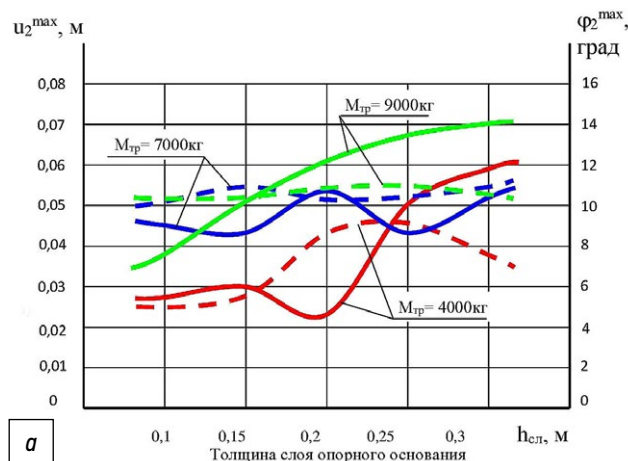


Рис. 3. Влияние толщины слоя почвогрунта (a) и его плотности (b) на вертикальные (сплошные линии) и продольно-угловые колебания (пунктирные линии) гусеничного трактора.

Fig. 3. The influence of thickness (a) and density (b) of a soil layer on vertical (solid lines) and longitudinal-angular (dashed lines) oscillations of a tracked tractor.

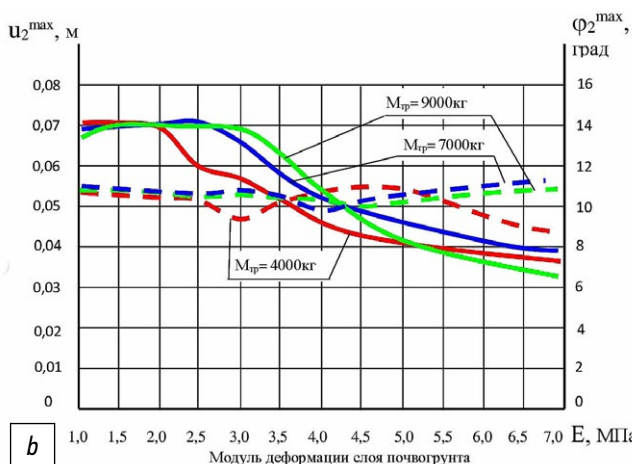
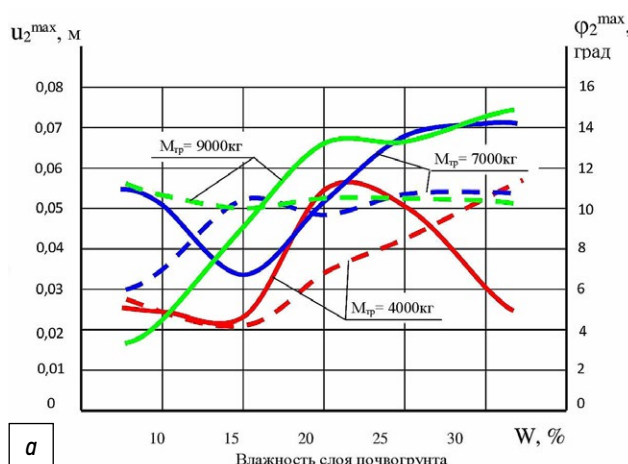


Рис. 4. Влияние влажности слоя почвогрунта (a) и его модуля деформации (b) на вертикальные (сплошные линии) и продольно-угловые колебания (пунктирные линии) гусеничного трактора.

Fig. 4. The influence of moisture (a) and modulus of deformation (b) of a soil layer on vertical (solid lines) and longitudinal-angular (dashed lines) oscillations of a tracked tractor.

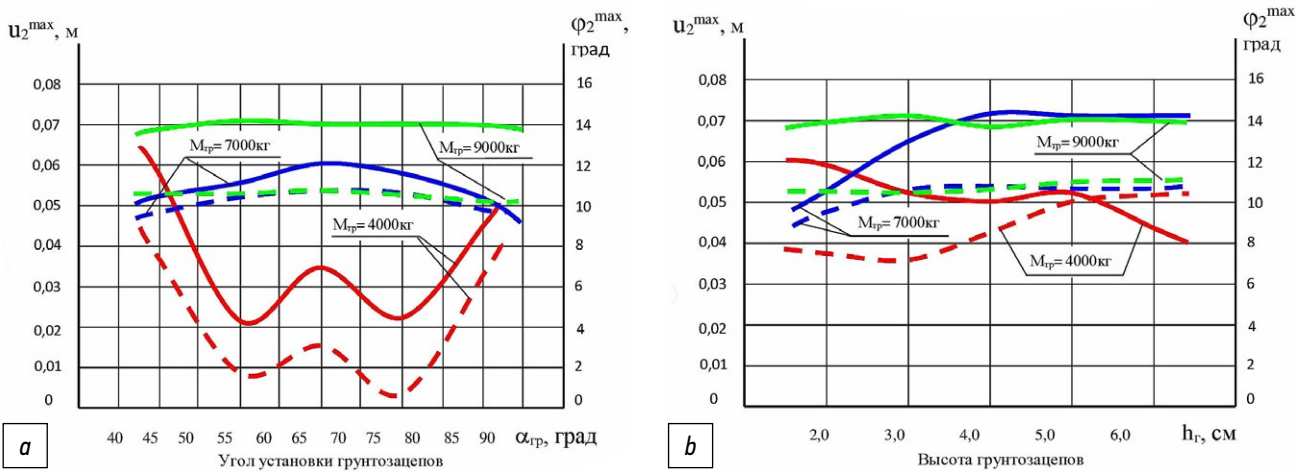


Рис. 5. Влияние угла установки гнтозацепов (a) и их высоты (b) на вертикальные (сплошные линии) и продольно-угловые колебания (пунктирные линии) гусеничного трактора.

Fig. 5. The influence of mount angle (a) and height (b) of grousers on vertical (solid lines) and longitudinal-angular (dashed lines) oscillations of a tracked tractor.

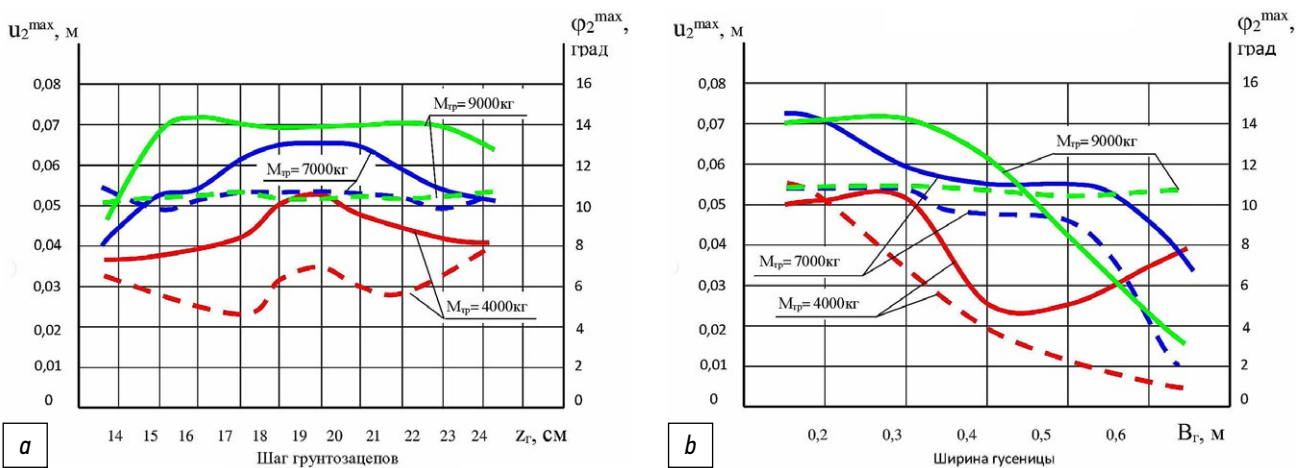


Рис. 6. Влияние шага гнтозацепов (a) и ширины гусеницы (b) на вертикальные (сплошные линии) и продольно-угловые колебания (пунктирные линии) гусеничного трактора.

Fig. 6. The influence of grouser pitch (a) and track width (b) on vertical (solid lines) and longitudinal-angular (dashed lines) oscillations of a tracked tractor.

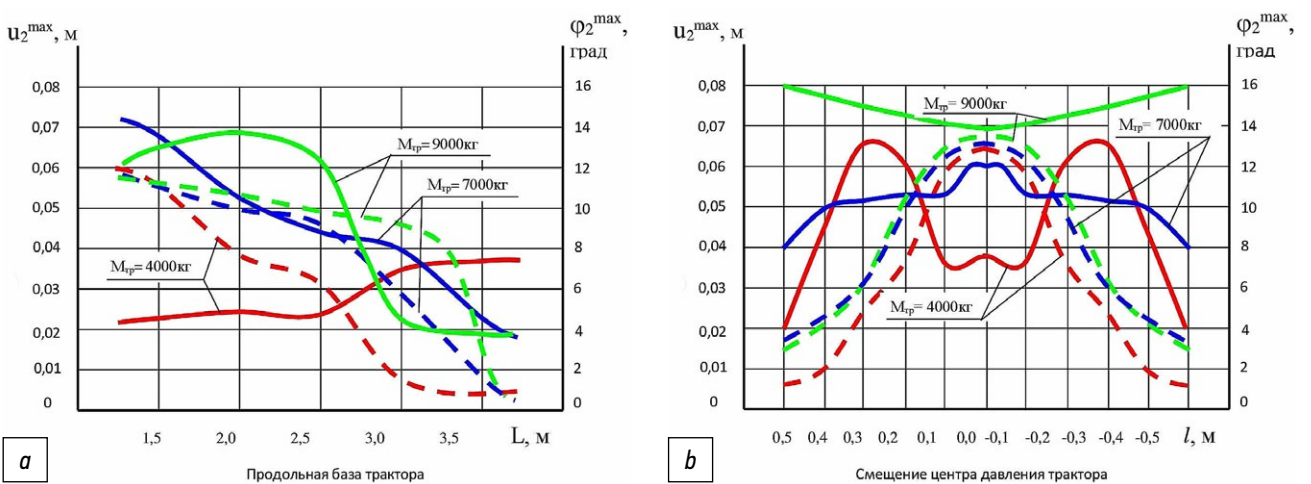


Рис. 7. Влияние продольной базы трактора (a) и смещения центра давления (b) на вертикальные (сплошные линии) и продольно-угловые колебания (пунктирные линии) гусеничного трактора.

Fig. 7. The influence of tractor base length (a) and offset of the pressure center (b) on vertical (solid lines) and longitudinal-angular (dashed lines) oscillations of a tracked tractor.

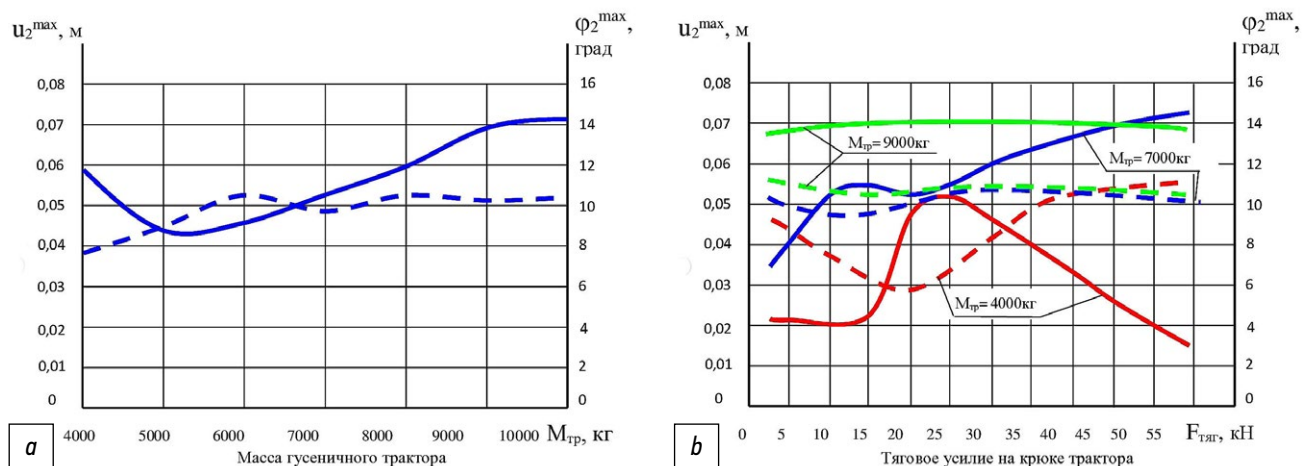


Рис. 8. Влияние массы гусеничного трактора (а) и тягового усилия на крюке (б) на вертикальные (сплошные линии) и продольно-угловые колебания (пунктирные линии).

Fig. 8. The influence of tracked tractor mass (a) and hook towing force (b) on vertical (solid lines) and longitudinal-angular (dashed lines) oscillations of a tracked tractor.

тяжести трактора от его середины вперед – 0,2 м: ширина гусеницы – 0,35 м: продольная база трактора – 2 м: высота, ширина и длина трактора, соответственно, 2 м, 2 м и 3,5 м: угол установки, высота и шаг грунтозацепов, соответственно, 45°, 2 см и 15 см: тяговое усилие трактора $F_{\text{тяг}}=10$ кН.

Неравномерность изменения искомых показателей объясняется запаздыванием воздействий во времени на систему последовательно от передней и задней областей опорной поверхности. Поэтому, в зависимости от угловой скорости продольно-угловых колебаний и изменяющегося модуля деформации слоя опорного основания по длине опорной поверхности, колебания усиливаются или уменьшаются. Максимумы и формы представленных характеристик могут изменяться и зависят не только от скорости движения и нагрузки на крюке трактора, но и от основных конструктивных параметров, таких как масса трактора, длина и ширина опорной поверхности гусеницы, смещение центра давления трактора. Отмечается существенное влияние параметров грунтозацепов для легких тракторов.

Установлено существенное влияние изменения параметров состояния слоя опорного основания в сочетании с изменением характера силового воздействия на него со стороны ходовой части трактора на амплитудные значения вертикальных и продольно-угловых колебаний, изменяющее их величины до 2–2,8 раз. При этом изменение влажности почвы наиболее значительно влияет на изменение колебаний для всех тракторов, а для легких тракторов большее значение имеет еще и толщина деформируемого слоя опорного основания.

На рис. 10 и 11 представлены графики изменения вертикальных колебаний зенитно-ракетного комплекса

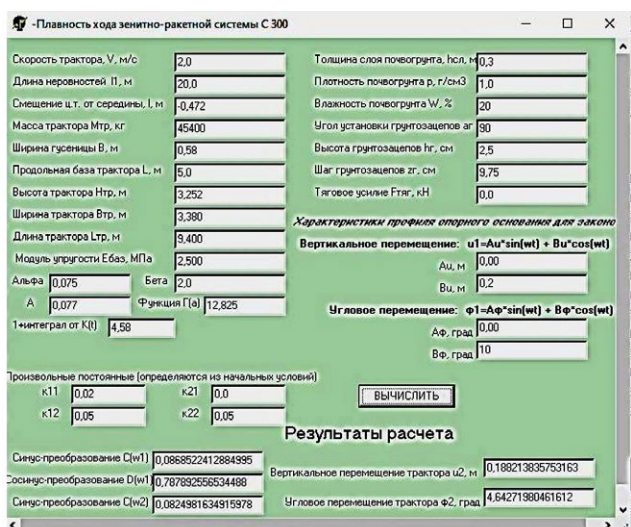


Рис. 9. Экранная форма программы по расчету показателей плавности хода зенитно-ракетного комплекса на базе гусеничного шасси 832М.

Fig. 9. The window of the program of ride characteristics calculation for the anti-aircraft missile system, based on the 832M tracked chassis.

(ЗРК) С-300В3 или С-300В4 массой 45400 кг в зависимости от параметров состояния слоя почвогрунта, а на рис. 12–15 – в зависимости от некоторых их конструктивных параметров при движении по пересеченной местности с амплитудными значениями вертикальных перемещений $B_{\text{в}}=0,2$ м и угловых перемещений $B_{\text{ф}}=10^\circ$.

При этом исходными значениями для имитационного моделирования были следующие (рис. 9): влажность почвогрунта – 20%; плотность почвогрунта – 1 г/см³; толщина слоя почвогрунта – 0,3 м; параметры базовой

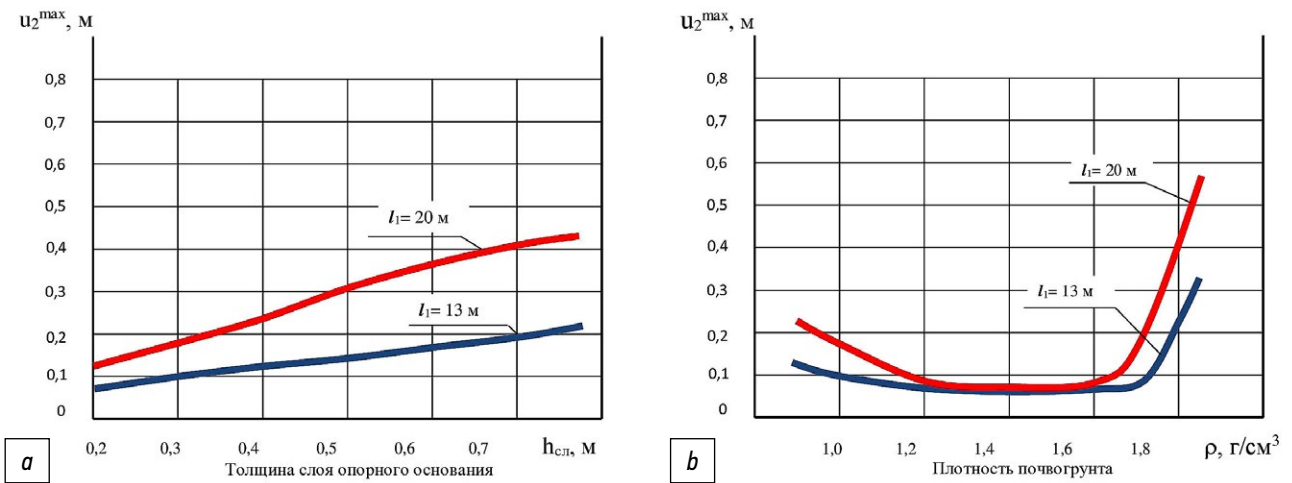


Рис. 10. Зависимость вертикальных колебаний ЗРК С-300ВЗ от толщины слоя почвогрунта (а) и его плотности (б).

Fig. 10. The dependence of vertical oscillations of the S-300V3 AMS on thickness (a) and density (b) of a soil layer.

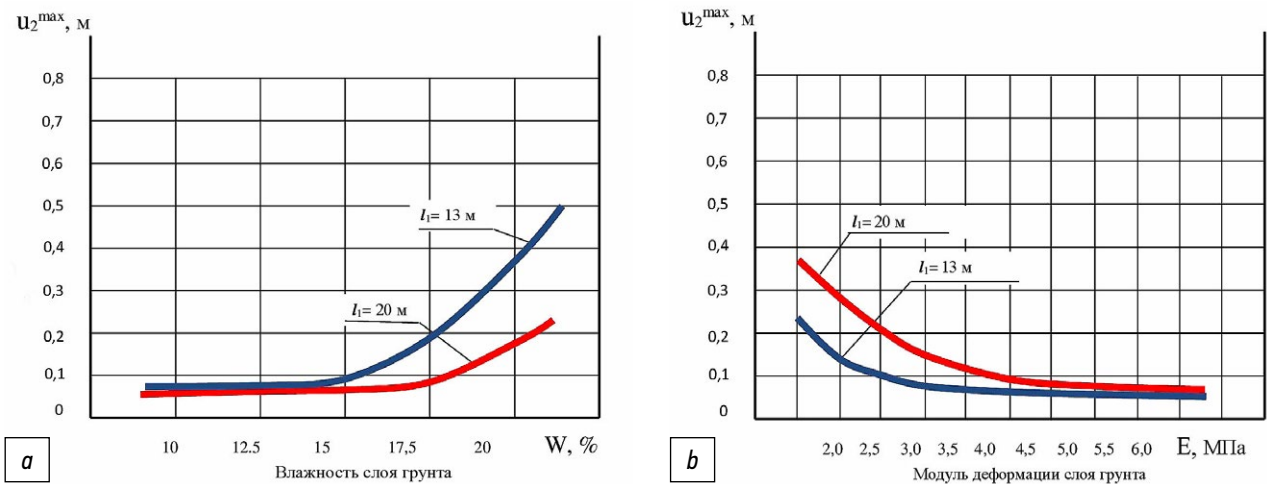


Рис. 11. Зависимость вертикальных колебаний зенитно-ракетной системы С-300 от влажности слоя грунта (а) и его модуля деформации (б).

Fig. 11. The dependence of vertical oscillations of the S-300V3 AMS on moisture (a) and module of deformation (b).

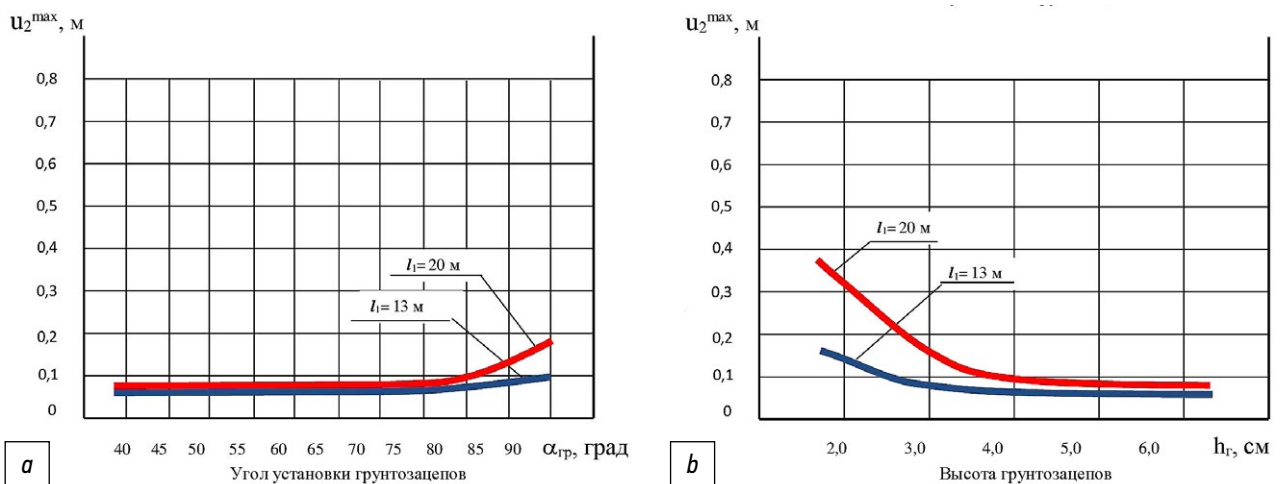


Рис. 12. Зависимость вертикальных колебаний зенитно-ракетной системы С-300 от угла установки гусениц (а) и их высоты (б).

Fig. 12. The dependence of vertical oscillations of the S-300V3 AMS on mount angle (a) and height (b) of grousers.

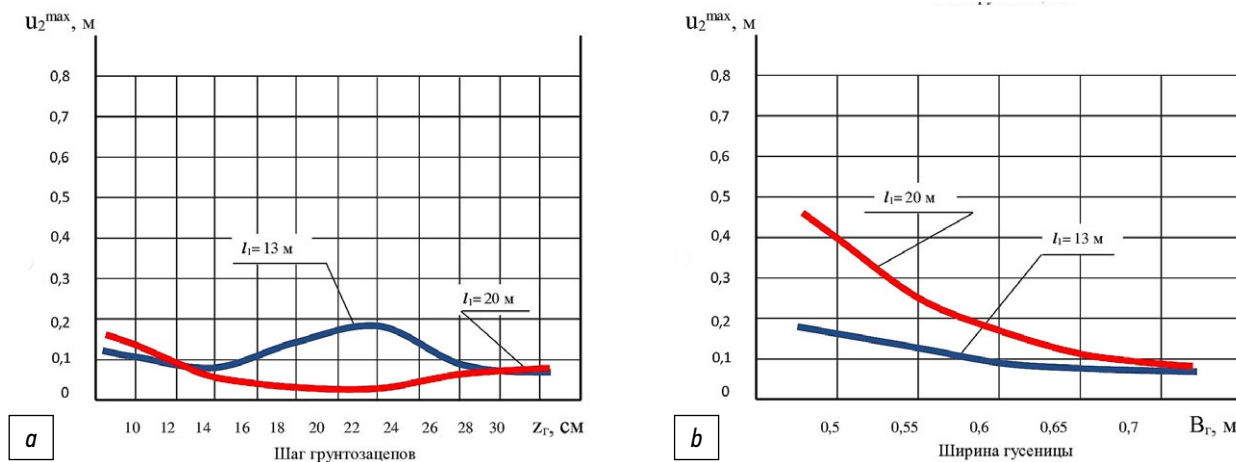


Рис. 13. Зависимость вертикальных колебаний зенитно-ракетной системы С-300 от шага грунтозацепов (а) и ширины гусеницы (b).
Fig. 13. The dependence of vertical oscillations of the S-300V3 AMS on grouser pitch (a) and track width (b).

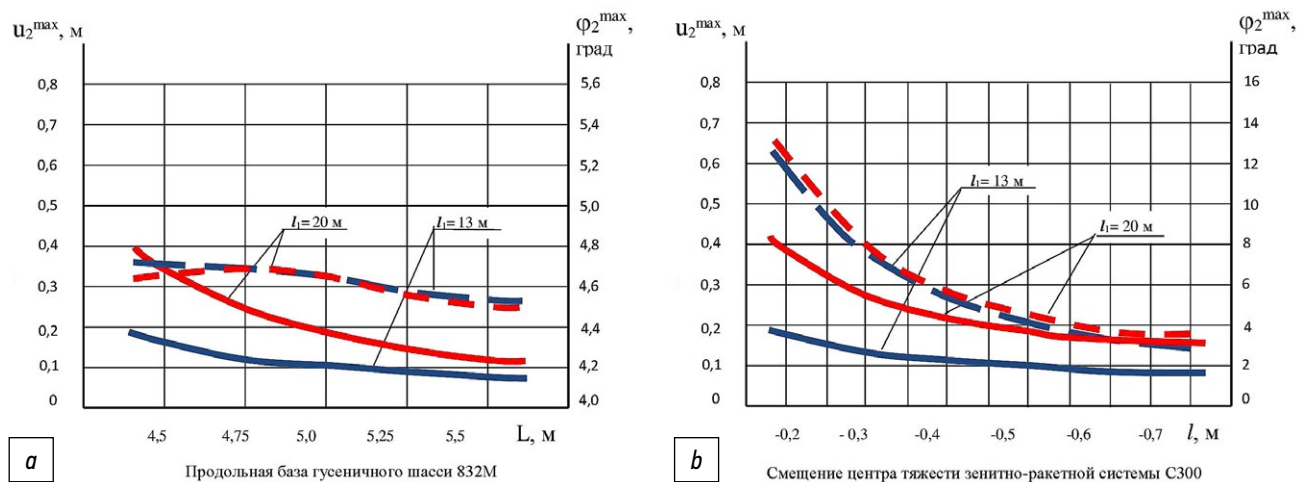


Рис. 14. Зависимость вертикальных (сплошные линии) и продольно-угловых колебаний (пунктирные линии) зенитно-ракетной системы С-300 от продольной базы (а) и смещения центра давления (b).
Fig. 14. The dependence of vertical (solid lines) and longitudinal-angular (dashed lines) oscillations of the S-300V3 AMS on base length (a) and offset of the pressure center (b).

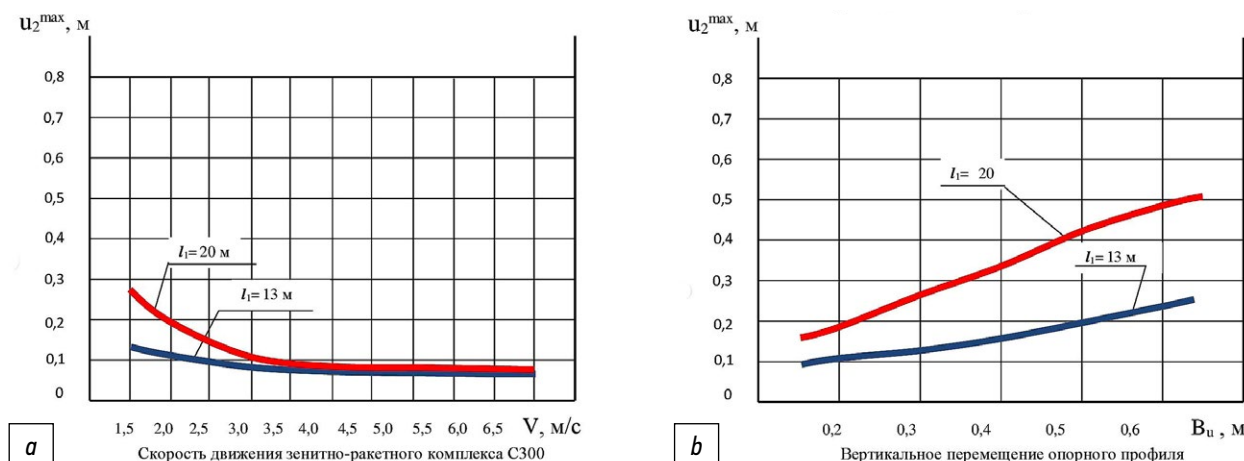


Рис. 15. Зависимость вертикальных колебаний зенитно-ракетной системы С-300 от скорости движения (а) и вертикального перемещения опорного профиля (b).
Fig. 15. The dependence of vertical oscillations of the S-300V3 AMS on velocity (a) and vertical displacement of road profile (b).

кривой ползучести аналогичны условиям движения гусеничных тракторов (для сравнения) $\alpha=0,075$, $\beta=2,0$, $A=0,077$, $E_{\text{баз}}=2,5$ МПа; скорость зенитно-ракетного комплекса – 2 м/с; длина неровностей $l_1=13$ м и $l_2=20$ м; смещение центра тяжести ЗРК С-300В3 и С-300В4 от середины опорной поверхности гусеницы назад – 0,472 м; ширина гусеницы – 0,58 м; продольная база – 5 м; высота, ширина и длина ЗРК, соответственно, 3,252 м, 3,380 м и 9,400 м; угол установки, высота и шаг грунтозацепов, соответственно, 90°, 2,5 см и 9,75 см; тяговое усилие ЗРК $F_{\text{тяг}}=0$ кН.

Расчеты показали, что продольно-угловые колебания ЗРК С-300В3 или С-300В4 на базе гусеничного шасси 832М при заданных исходных значения параметров находились в пределах 4...5 градусов, что вполне удовлетворительно сказывается на показателях плавности хода ЗРК, имеющего внушительную массу и, самое главное, вертикальную координату общего центра тяжести, составляющую 2,102 м от поверхности опорного основания или опорной поверхности гусеницы.

Такие незначительные величины продольно-угловых колебаний подтверждают правильность выбора в свое время конструктивных решений зенитно-ракетного комплекса, что обеспечивает минимальные значения инерционных нагрузок конструктивного расположения различных узлов и систем, а следовательно, и внутренних динамических нагрузок в этих узлах и системах, что существенно увеличивает их ресурсные показатели.

Компоновка ЗРК С-300В3 и С-300В4, обеспечившая горизонтальное смещение центра тяжести (центра давления) относительно середины опорной поверхности гусеницы на 0,472 м назад, позволила также снизить и амплитудные значения вертикальных колебаний ЗРК, которые меняются по-разному в зависимости от различных факторов колебательной системы, представленных в математической модели (1) – (5).

Следует особым образом заметить, что дальнейшее смещение центра давления гусеничного движителя назад по ходу движения ЗРК приводит к значительному снижению тягово-сцепных качеств ходовой системы, повышению сопротивления движению, буксования и снижению в целом проходимости ЗРК, что недопустимо в особо тяжелых условиях передвижения.

Как показали отдельные расчеты, смещение центра тяжести машины хотя бы на 0,2 м вперед привело бы к значительным и недопустимым увеличениям вертикальных колебаний ЗРК в различных условиях эксплуатации, резко снизив плавность хода рассматриваемой гусеничной машины.

Многолетние и даже десятилетние усилия конструкторов и испытателей военной техники путем многочисленных проб и ошибок все же позволили создать

практически совершенную зенитно-ракетную систему С-300В3 или С-300В4 с точки зрения высокой надежности гусеничного шасси 832М и подобных ему.

Такие длительные по времени проектирование, конструирование, изготовление и испытания рассматриваемых ЗРК объясняются отсутствием на тот период развития науки реологического подхода к оценке физико-механических характеристик опорного основания гусеничных машин, учитывающего фактор времени и фактор скорости изменения контактных давлений под гусеничным движителем, на которые раньше не достаточно или вовсе не обращалось внимания. Отсутствие в то время современной вычислительной техники, программного обеспечения и IT-технологий значительно тормозили эффективное проектирование и создание многообразных технических систем, включая различные мобильные энергетические средства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная математическая модель по оценке параметров плавности хода гусеничных машин позволила получить результаты имитационного моделирования колебаний гусеничных тракторов и зенитно-ракетного комплекса С-300 на базе гусеничного шасси 832М при перемещении по неровному деформируемому опорному основанию с описанием его характеристик на основе недавно разработанного реологического подхода.

Установлено, что для менее тяжелых гусеничных машин плавность хода меняется значительно интенсивнее в зависимости от разнообразных влияющих факторов, к которым в первую очередь относятся конструктивные и технологические, а также условия внешней среды, влияющие на изменение параметров состояния опорного основания. Также значительное влияние на изменение характеристик плавности хода гусеничных машин оказывают продольная база (длина опорной поверхности гусеницы) машины и смещение центра давления гусеничного движителя от середины его опорной поверхности.

Имитационное моделирование плавности хода зенитно-ракетного комплекса С-300 подтвердило адекватность применяемой математической модели и оптимальность выбора конструктивных параметров гусеничной машины. Наиболее важным из всех определений параметр смещения центра тяжести относительно середины опорной поверхности гусеницы гусеничного шасси 832М.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.В. Носов, Н.Е. Перегудов – поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи,

редактирование текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли равноправный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. *S.V. Nosov, N.E. Peregudov* contributed to analysis of research topic publications, data processing and images design, edited the manuscript. All authors certify that they meet the *ICMJE* international criteria for authorship.

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов С.В. Мобильные энергетические средства: выбор параметров и режимов работы через реологические свойства опорного основания: монография. Липецк: ЛГТУ, 2006. 228 с.
2. Перегудов Н.Е., Носов С.В. Гусеничный трактор: исследования особенностей взаимодействия со слоем почвы: монография. Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2020. 151 с.
3. Носов С.В., Перегудов Н.Е. Математическая модель взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 11, С. 29–33.

4. Носов С.В., Перегудов Н.Е. Развитие деформации и изменение плотности почвогрунта под трактом гусеничной машины // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 11. С. 14–16.
5. Носов С.В. Математическое моделирование динамики наземных транспортно-технологических средств при взаимодействии с деформируемым опорным основанием: монография. Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2016. 164 с.
6. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. М.: Высшая школа, 1976. 278 с.
7. Барский И.Б., Анилович В.Я., Кутьков Г.М. Динамика трактора. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.

REFERENCES

1. Nosov SV. Mobil'nye energeticheskie sredstva: vybor parametrov i rezhimov raboty cherez reologicheskie svoystva opornogo osnovaniya. Lipetsk: LGTU; 2006. (In Russ).
2. Peregudov NE, Nosov SV. Gusenichnyi traktor: issledovaniya osobennostei vzaimodeistviya so sloem pochvy. Elets: Eletskiy gosudarstvennyi universitet im. I.A. Bunina; 2020. (In Russ).
3. Nosov SV, Peregudov NE. Matematicheskaya model' vzaimodeistviya gusenichnogo dvizhitelya s opornym osnovaniem. Traktory i sel'skokhozyaistvennye mashiny. 2006;(11):29–33. (In Russ).

4. Nosov SV, Peregudov NE. Razvitie deformatsii i izmenenie plotnosti pochvogrunta pod trakom gusenichnoi mashiny. Traktory i sel'khoz mashiny. 2009;(11):14–16. (In Russ).
5. Nosov SV. Mathematical modeling of the dynamics of terrestrial transport-technological means in interaction with a deformable support base. Lipetsk: Izd-vo Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta; 2016. (In Russ).
6. Koltunov MA. Polzuchest' i relaksatsiya. Moscow: Vysshaya shkola; 1976. (In Russ).
7. Barskii IB, Anilovich VYa, Kut'kov GM. Dinamika traktora. Moscow: Mashinostroenie; 1973. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

***Носов Сергей Владимирович,**

профессор, д.т.н.,
кафедра «Транспортных средств и техносферной безопасности»;
адрес: Россия, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30,
корпус Б;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8427-1606>;
eLibrary SPIN: 2387-5413;
e-mail: nosovsergej@mail.ru

Перегудов Николай Евгеньевич,

к.т.н., доцент,
кафедра «Транспортных средств и техносферной безопасности»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-3939>;
eLibrary SPIN: 9664-2946;
e-mail: ne_peregoodov@mail.ru

***Автор для переписки**

AUTHORS' INFO

***Sergei V. Nosov,**

Dr. Sci. (Engin.), Professor,
"Vehicles and Technosphere Safety" Department;
address: 30 Moskovskaya street, B.B, Lipetsk,
398055, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8427-1606>;
eLibrary SPIN: 2387-5413;
e-mail: nosovsergej@mail.ru

Nicholay E. Peregoodov,

Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor,
"Vehicles and Technosphere Safety" Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-3939>;
eLibrary SPIN: 9664-2946;
e-mail: ne_peregoodov@mail.ru

***Corresponding author**