

Научная статья

УДК 629.1.02

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687>

МОДЕЛЬ НЕУПРАВЛЯЕМОГО СДВИГА НА ПРИМЕРЕ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

И.П. Трояновская, А.О. Жаков

Южно-Уральский государственный университет,

г. Челябинск, Россия

tripav63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>,andrey.zhakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4403-0776>

АННОТАЦИЯ

Введение. Наличие внешних сил на рабочих орудиях тракторных агрегатов и строительно-дорожных машин часто приводит к неуправляемому отклонению от заданной траектории. Такое движение можно представить как сумму управляемого движения и неуправляемого смещения (сдвига). В настоящее время неуправляемое движение мало изучено в силу отсутствия адекватных моделей сдвига (страгивания). Целью является построение модели неуправляемого сдвига под действием внешней силы, позволяющей определить максимальное значение сдвигающей силы в зависимости от ее направления.

Материалы и методы. Математическая модель предельного равновесия была построена на примере бульдозерного агрегата, работающего с перекосом отвала. Входящие в нее силовые факторы взаимодействия движителя с грунтом сформированы на основе математической теории трения. Модель была усовершенствована путем введения различных коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлениях, что позволило учесть анизотропию взаимодействия гусеничного движителя с грунтом.

Результаты. В результате численного эксперимента построен годограф предельной сдвигающей силы. Его анализ показал, что сдвигающая сила равна пределу сцепления в единственном случае поступательного сдвига. Во всех остальных случаях (при мгновенно вращательном сдвиге) значение предельной сдвигающей силы значительно меньше предела сцепления. Учет анизотропных свойств дополнительно снижает значение предельной сдвигающей силы.

Заключение. Годограф позволяет рассчитать значение предельной поперечной силы и оценить возможность неконтролируемого отклонения машины от заданной траектории. Полученная модель впоследствии может быть использована при разработке системы управления работой беспилотной машины с учетом внешнего воздействия со стороны рабочих орудий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неуправляемый сдвиг, математическая теория трения, анизотропия взаимодействия, контакт движителя с грунтом, предельная сдвигающая сила, дорожно-строительные машины

Статья поступила в редакцию 04.11.2021; одобрена после рецензирования 23.11.2021; принята к публикации 14.12.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Трояновская И.П., Жаков А.О. Модель неуправляемого сдвига на примере строительно-дорожной техники // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 678-687. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687>

© Трояновская И.П., Жаков А.О., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687>

MODEL OF UNCONTROLLED DISPLACEMENT ON THE EXAMPLE OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES

Irina P. Troyanovskaya, Andrey O. Zhakov

South Ural State University, Cheliabinsk, Russia

tripav63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>,

andrey.zhakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4403-0776>

ABSTRACT

Introduction. External forces from the working implements of tractor units or road construction machines often lead to uncontrollable displacement from a given trajectory. This movement is the sum of controlled movement and uncontrolled displacement (start of moving). The lack of adequate models of displacement (start of movement) is the reason for the insufficient study of uncontrolled movement at the present time. The goal is to build a model of uncontrolled displacement under the action of an external force, which allows obtaining the maximum value of the external force, depending on its direction.

Materials and methods. The mathematical model of limiting equilibrium is built on the example of a bulldozer unit with a skewed blade. The force factors of the interaction of the mover with the soil included in the model were formed on the basis of the mathematical theory of friction. The model was improved by introducing different coefficients of adhesion in the longitudinal and transverse directions. This made it possible to take into account the anisotropy of the interaction of the propeller with the ground.

Results. The hodograph of the limiting shift force was constructed as a result of a numerical experiment. His analysis showed that the shift force is equal to the adhesion limit only in the case of translational shear. In all other cases (instantaneous rotational shear) the value of the ultimate shift force is less than the adhesion limit. Anisotropy further reduces the value of the limiting external shear force and rotates the hodograph towards the lowest friction coefficient.

Conclusion. The hodograph allows calculating the value of the limiting shear force and assessing the possibility of an uncontrolled deviation of the machine from a given trajectory. The resulting model will subsequently be used to build a control system for the operation of an unmanned vehicle, taking into account the external influence from the working tools.

KEYWORDS: Uncontrolled displacement; Mathematical theory of friction; Anisotropy of interaction; Contact of the propeller with the ground; Ultimate displacement force; Road construction machines.

The article was submitted 04.11.2021; approved after reviewing 23.11.2021; accepted for publication 14.12.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods.

There is no conflict of interest.

For citation: Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O. Model of uncontrolled displacement on the example of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (6): 678-687. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687>

© Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O., 2021



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВЕДЕНИЕ

Строительно-дорожные машины, в отличие от других типов самоходной техники, характеризуются особым отношением к грунту¹. Для них грунт не только внешняя среда, обеспечивающая взаимодействие движителя с грунтом, но и рабочее тело², свойства которого во многом определяют производительность работы [1, 2]. В отличие от автомобилей и других транспортных машин строительно-дорожные машины взаимодействуют с грунтом не только движителем, но и рабочим орудием. Порой внешние силы со стороны рабочего орудия приводят к неуправляемому сдвигу (смещению) и последующему уводу (отклонению) машины от управляемого движения³. Классическим примером может служить работа автогрейдера⁴ по укладке и расширению дорожного полотна [3]. В этом случае рабочее орудие вынесено вбок, и действующая на него сила сопротивления способна разворачивать машину (Рисунок 1).

Аналогичная ситуация наблюдается при расчистке дорог от снега [4, 5]. За счет неравномерного набора снежной массы результирующая внешняя сила сопротивления смещается ближе к краю отвала. В случае перекоса отвала сила сопротивления, направленная по

нормали к его поверхности, приобретает еще и боковую составляющую, что тоже может дестабилизировать прямолинейное движение машины (Рисунок 2). Для сохранения прямолинейного движения водителю приходится постоянно подправлять машину, что приводит к его повышенной утомляемости.

Неуправляемый сдвиг под действием внешних сил со стороны рабочего орудия наблюдается порой и при работе землеройной техники: например, бульдозеров [6, 7] и автогрейдеров (при перекосе отвала), рыхлителей и корчевателей (при смещении сопротивления на крайний зуб), экскаваторов (при боковом смещении стрелы) и др.

Научная проблема состоит в том, что неуправляемое движение пока мало изучено, несмотря на широкое распространение при работе строительно-дорожных машин и различных тракторных агрегатов. В настоящее время основное внимание уделяется моделированию управляемого движения⁵ [8, 9]. Научные труды [3, 10, 11, 12, 13, 14] по исследованию курсовой устойчивости тракторных агрегатов и строительно-дорожных машин показали, что результирующее движение представляет собой совокупность управляемого движения и неуправляемого отклонения (сдвига) машины под действием внешних сил.



Рисунок 1 – Укладка и расширение дорожных обочин

Figure 1 – Laying and widening of road shoulders

¹ Позин Б.М., Трояновская И.П. Тяговая характеристика трактора (основы теории и расчет). Челябинск. 2016. 84 с.

² Баловнев В.И., Глаголев С.Н., Данилов Р.Г., Кустарев Г.В., Шестопалов К.К., Герасимов М.Д. Машины для земляных работ. Конструкция, расчет, потребительские свойства. В 2 томах. Белгород. 2011.

³ Огай В.А., Довбыш В.О., Медведев Е.В. Увод от управляемого движения строительно-дорожных машин под действием внешних сил // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды IV Международной научно-технической конференции. 2015. С. 455–457.

⁴ Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Кустарев Г.В., Селиверстов Н.Д. Автогрейдеры (Устройство, основы расчета). Москва. 2014. 144 с.

⁵ Носов С.В. Математическое моделирование динамики наземных транспортно-технологических средств при взаимодействии с деформируемым опорным основанием. Липецк. 2016. 164 с.



Рисунок 2 – Расчистка дорог от снега

Figure 2 – Clearing snow from roads

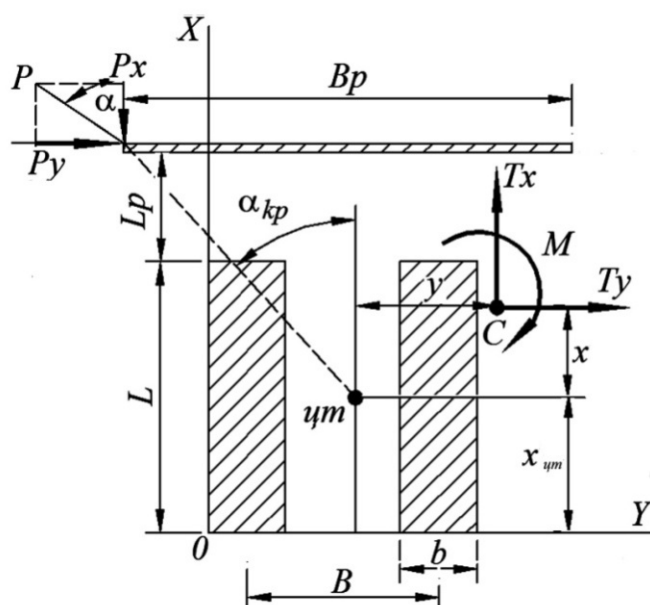


Рисунок 3 – Силовая схема при сдвиге бульдозера

Figure 3 – Force scheme of the bulldozer sliding

Эксперименты [15] доказывают, что пассивный (неуправляемый) сдвиг наблюдался не всегда. Иногда начало скольжения машины по грунту начинается под действием силы, много меньшей предела сцепления.

Цель исследования – построение математической модели неуправляемого сдвига машины для расчета предельного значения внешней сдвигающей силы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характер неуправляемого сдвига определяется положением линии действия внешней

силы со стороны рабочего орудия относительно центра тяжести машины. В случае, когда сдвигающая сила проходит через этот центр, имеет место поступательный сдвиг. Во всех других случаях сдвиг представляет собой мгновенно вращательное скольжение [16, 17].

Уравнения предельного равновесия

Модель предельного сдвига рассмотрим на примере гусеничного бульдозерного агрегата, когда внешняя сила сопротивления смещена на край отвала (Рисунок 3).

Для момента начала движения можно записать уравнения предельного равновесия [18].

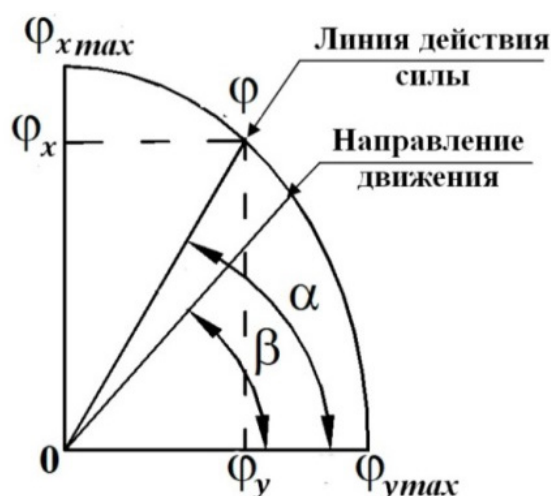


Рисунок 5 – Голограф коэффициента анизотропного трения

Figure 5 – Hodograph of the coefficient of anisotropic friction

где dF – элементарная площадка в контакте с координатами ξ, η , Н; x, y – координаты мгновенного центра скольжения C , м.

Согласно (2), силовые факторы T_x, T_y, M , являются функциями координат x, y мгновенного центра C скольжения, положение которого определяется линией действия внешней силы P . Для каждой линии действия внешней силы P соответствует единственный мгновенный центр скольжения C и единственное предельное значение сдвигающей силы $P_{\max}$ ⁷. [24]:

Влияние анизотропии

Взаимодействие гусеничного движителя с грунтом в продольном и поперечном направлениях отличаются. В продольном направлении начало смещения машины относительно грунта происходит за счет смятия грунта (за счет упругих свойств почвы), а в поперечном направлении – за счет среза (грунтозацепы сразу врезаются в грунт). Анизотропия взаимодействия характеризуется различными коэффициентами сцепления φ_x, φ_y в продольном

и поперечном направлении. При этом направление сдвига (предполагаемого движения) не совпадает с направлением сил в контакте, а отклоняется в сторону наименьшего сцепления⁸ (Рисунок 5).

Учет анизотропных свойств взаимодействия позволил усовершенствовать модель Ф.А. Опейко и силовые факторы (2) приобрели вид [21]:

$$\left. \begin{aligned} T_x &= \frac{dN}{dF} \iint \varphi_x \frac{y-\eta}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF, \\ T_y &= -\frac{dN}{dF} \iint \varphi_y \frac{x-\xi}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF, \\ M &= \frac{dN}{dF} \iint \frac{\varphi_x(y-\eta)^2 + \varphi_y(x-\xi)^2}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Математическая модель предельного сдвига

Поставив силовые факторы (2), (3) в уравнения предельного равновесия (1), получили математическую модель сдвига

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{dF} \iint \varphi_x \frac{y-\eta}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF - P_x &= 0, \\ -\frac{dN}{dF} \iint \varphi_y \frac{x-\xi}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF + P_y &= 0, \\ \frac{dN}{dF} \iint \frac{\varphi_x(y-\eta)^2 + \varphi_y(x-\xi)^2}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF + P_y(L + Lp - x_{um} - x) - P_x(0,5Bp + y) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

⁷ Опейко Ф.А. Mathematical Theory of Friction. Minsk. 1971. 149 p.

⁸ Опейко Ф.А. Анизотропное трение // Труды МИМЭСХ. 1948. С.18–22.

В качестве неизвестных выступают координаты мгновенного центра скольжения C и предельное значение внешней сдвигающей силы P . Это позволило при заданной точке приложения внешней силы (край отвала) исследовать весь диапазон возможных ее направлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе разработанной математической модели (4) был проведен численный эксперимент. В результате построен годограф предельной сдвигающей силы, позволяющий определить значение от угла α ее наклона к продольной оси машины (Рисунок 6).

Максимальное значение сдвигающей силы kH , равное пределу сцепления (где G – вес машины), соответствует направлению поступательного сдвига. При любом отклонении от этого направления значение максимальной сдвигающей силы меньше предела сцепления. Это объясняется наличием кроме результирующей силы дополнительного момента трения. Наименьшее значение сдвигающей силы kH наблюдается в направлении перпендикулярном поступательному сдвигу.

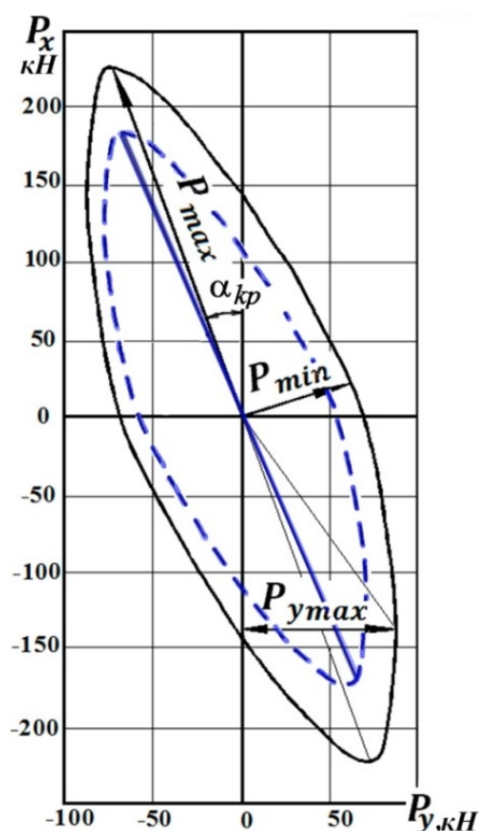


Рисунок 6 – Годограф предельной сдвигающей силы P_{max}

Figure 6 – Hodograph of ultimate shear force P_{max}

Иногда в прикладных задачах необходимо определить составляющую сдвигающего усилия в заданном направлении. Например, максимальные значения продольной (тяговой) или боковой (поперечной) составляющей. Годограф позволяет это сделать. При kH , а к H .

Учет анизотропных свойств взаимодействия движителя с грунтом приводит к дополнительному уменьшению предельной сдвигающей силы и развороту направления поступательного сдвига в сторону наименьшего коэффициента сцепления (штриховая линия на Рисунке 6). Так, при kH и максимальное сдвигающее усилие уменьшается до kH , тяговое усилие kH . Чем больше различие в значениях продольного и поперечного коэффициента сцепления, тем больше разворот годографа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Причиной отклонения от прямолинейного движения строительно-дорожной машины является сдвиг под действием внешней силы со стороны рабочего орудия. Модель неуправляемого сдвига представляет собой систему уравнений предельного равновесия машины. Формирование силовых факторов в контакте движителя с грунтом на основе математической теории трения, что позволило установить взаимосвязь между силой и моментом трения. Новизна модели заключается в расширении области применения математической теории трения, т. е. распространение ее на неуправляемый сдвиг. Совершенствование модели путем введения различных коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлении позволило учесть анизотропные свойства взаимодействия гусеницы с грунтом. Полученная модель впоследствии может быть использована при разработке системы управления работой беспилотной машины с учетом внешнего воздействия со стороны рабочих орудий.

На примере бульдозера Б12, работающего с перекосом отвала, был построен годограф предельной сдвигающей силы. Анализ результатов показал, что сдвигающая сила равна пределу по сцеплению kH только в случае поступательного сдвига, когда линия действия внешней силы проходит через центр масс машин. Во всех остальных случаях сдвиг является мгновенно вращательным и значение предельной сдвигающей силы меньше предела сцепления. Наименьшее значение (kH) наблюдается в направлении, перпендикулярном поступательному сдвигу.

Учет анизотропии приводит к дополнительному снижению предельной сдвигающей силы и смещению направления поступательного сдвига в сторону наименьшего сцепления. Для бульдозерного агрегата весом максимальная сдвигающая сила составила кН (при и , при этом тяговое усилие на гусенице равно кН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мерданов Ш.М., Закирзаков Г.Г., Конев В.В., Половников Е.В., Красиков А.А. Определение показателей эксплуатационных свойств современных строительно-дорожных машин // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 312–317.
2. Kozbagarov R.A., Taran M.V., Zhussupov K.A., Kanazhanov A.E., Kamzanov N.S., Kochetkov A.V. Increasing the efficiency of motor graders work on the basis of working elements perfection. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2021. vol. 1(445), pp. 98-105. doi:10.32014/2021.2518-170X.14
3. Shevchenko V., Chaplyhina O., Pimonov I., Reznikov O., Ponikarovska S. Mathematical model of a motor-grader movement in the process of performing working operations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. vol. 985(1). no. 012009. doi:10.1088/1757-899X/985/1/012009
4. Баловнев В.И., Данилов Р.Г. Снегопогрузчики // Строительные и дорожные машины. 2020. № 1. С. 3–9.
5. Zonta T., Selvanathan J., Patel J., Wilson K., Kaura H., Berry C., Tayefeh M., Barari A. Autonomous snowblower utilizing internet of things for minimal power consumption. In 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2021 – Proceedings). 2021. pp. 686-69. doi:10.1109/INDUSCON51756.2021.9529823
6. Савельев А.Г., Михайловская В.А. Максимально возможные нагрузки, действующие на отвал бульдозера при принятых расчетных положениях // Техника и технология транспорта. 2019. № 5(13). 41 с.
7. Kaukarov A., Kokodeeva N., Kochetkov A., Yankovsky L., Chelpano I. Capture of Large Objects by the Earthmoving Machine's Implement During Operation on Motor and Toting Roads. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. vol. 1116 AISC, pp. 285-295. doi:10.1007/978-3-030-37919-3_28
8. Du J., Zhou H., Jin X. Vehicle motion simulation method in urban traffic scene. Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics). 2020. vol. 12341 LNCS, pp. 312-321. doi:10.1007/978-3-030-60816-3_34
9. Kotiev G., Padalkin B., Miroshnichenko A., Stadukhin A., Kositsyn B. A Theoretical study on the high-speed electric tracked vehicle mobility. IOP Conference series: Materials science and engineering. 2019. vol. 820(1). no. 012012. doi:10.1088/1757-899X/820/1/012012

10. Keller A., Aliukov S., Anchukov V. Studies of stability and control of movement of multipurpose vehicle. Lecture notes in engineering and computer science. 2017. vol. 2230, pp. 815-820.

11. Игнатов С.Д., Портнова А.А. Способы решения проблемы управляемости дорожных машин // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации: материалы Международного конгресса СибАДИ. 2013. С. 51–57.

12. Ермаков Б.Е. Боковой увод двухзвенного транспортера при его движении по криволинейной траектории // Механизация строительства. 2012. № 2 (812). С. 27–31

13. Сергеев Н.В., Сенькевич С.Е., Чичиль Р.А. Курсовая устойчивость агрегата // Вестник ВИАХС. 2017. № 1. С. 61–66.

14. Stroganov Yu.N., Lukashuk O.A., Akulova A.A. Movement stability of tractor unit. ACM International Conference Proceeding Series. 2018. Part F137690. pp. 117-120. doi:10.1145/3191477.3191501

15. Андреева Е.В. Экспериментальные исследования пассивного поворота гусеничной машины при страгивании // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2005. № 3. 613 с.

16. Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O., Starunova I.N. Mathematical model of passive withdrawal of a tractor unit. IOP Conference series: Earth and environmental Science. 2021. vol. 659(1), no. 012081. doi:10.1088/1755-1315/659/1/012081

17. Андреева Е.В. Пассивный поворот гусеничной машины (задача страгивания) // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2005. № 3. 611 с.

18. Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Тройнич В.А. Уравнения равновесия при уводе гусеничной машины и их исследование // Горная механика и машиностроение. 2020. № 1. С. 17–22.

19. Вязников М.В. Использование теории комбинированного трения при составлении математической модели криволинейного движения гусеничных машин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 279–290. doi: 10.7463/0815.9328000

20. Troyanovskaya I., Ulanov A., Zhakov A., Voinash S. Friction forces at the wheel's contact with the ground in a turning vehicle, Tribology in industry. 2019. vol. 41, no. 2. pp. 166-171. doi:10.24874/ti.2019.41.02.03

21. Жаков А.О., Трояновская И.П. Влияние анизотропии на взаимодействие гусеничного движителя с грунтом при повороте машины // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 2. С. 43–49. doi:10.31992/0321-4443-2020-2-43-49

REFERENCES

1. Merdanov Sh.M., Zakirzakov G.G., Konev V.V., Polovnikov E.V., Krasikov A.A. Opredeleniye pokazateley ekspluatatsionnykh svoystv sovremennykh stroitel'no-dorozhnykh mashin [Definition of indicators performance characteristics of modern building and

road machines] *Basic research*. 2016. 12(2): 312-317. (in Russian)

2. Kozbagarov R.A., Taran M.V., Zhussupov K.A., Kanazhanov A.E., Kamzanov N.S., Kochetkov A.V. Increasing the efficiency of motor graders work on the basis of working elements perfection. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2021. 1(445): 98-105. doi:10.32014/2021.2518-170X.14

3. Shevchenko V., Chaplyhina O., Pimonov I., Reznikov O., Ponikarovska S. Mathematical model of a motor-grader movement in the process of performing working operations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 985(1): 012009. doi:10.1088/1757-899X/985/1/012009

4. Balovnev V.I., Danilov R.G. Snegopogruzchiki [Snow loaders] *Construction and road machines*. 2020. 1: 3-9. (in Russian)

5. Zonta T., Selvanathan J., Patel J., Wilson K. Kaura H., Berry C, Tayefeh M., Barari A. Autonomous snowblower utilizing internet of things for minimal power consumption. In 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2021 – Proceedings). 2021: 686-69. doi:10.1109/INDUSCON51756.2021.9529823

6. Savelyev A.G., Mikhaylovskaya V.A. Maximum possible loads acting on the blade bulldozer under the assumed settlement provisions. [Maksimal'no vozmozhnyye nagruzki, deystvuyushchiye na otval bul'dozera pri prinyatykh raschetnykh polozheniyakh] *Wheeled and tracked vehicle technology*. 2019. 5(13): 41. (in Russian)

7. Kaukarov A., Kokodeeva N., Kochetkov A., Yankovsky L., Chelpano I. Capture of Large Objects by the Earthmoving Machine's Implement During Operation on Motor and Toting Roads. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. 1116 AISC, pp. 285-295. doi:10.1007/978-3-030-37919-3_28

8. Du J., Zhou H., Jin X. Vehicle motion simulation method in urban traffic scene. *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)*. 2020. 12341 LNCS: 312-321. doi:10.1007/978-3-030-60816-3_34

9. Kotiev G., Padalkin B., Miroshnichenko A., Stadukhin A., Kositsyn B. A Theoretical study on the high-speed electric tracked vehicle mobility. *IOP Conference series: Materials science and engineering*. 2019. 820(1): 012012. doi:10.1088/1757-899X/820/1/012012

10. Keller A., Aliukov S., Anchukov V. Studies of stability and control of movement of multipurpose vehicle. *Lecture notes in engineering and computer science*. 2017. 2230: 815-820.

11. Ignatov S.D., Portnova A.A. Sposoby resheniya problemy upravlyayemosti dorozhnykh mashin [Methods for solving the problem of control of road ve-

hicles]. *Materials of the international congress SibADI: Architecture. Building. Transport. Technologies. Innovations*. 2013: 51-57. (in Russian)

12. Ermakov B.E. Bokovoy uvod dvukhzvennogo transportera pri yego dvizhenii po krivolineynoy trayektorii [Lateral withdrawal of the two-link transporter at its movement on curvilinear trajectory]. *Mechanization of construction*. 2012, 2(812): 27-31. (in Russian)

13. Sergeev N.V., Senkevich S.E., Chichil R.A. Heading stability of the unit. [Kursovaya ustoychivost' agregata] *Bulletin of the all-Russian scientific research institute of agricultural electrification*. 2017. 1: 61-66. (in Russian)

14. Stroganov Yu.N., Lukashuk O.A., Akulova A.A. Movement stability of tractor unit. *ACM International Conference Proceeding Series*. 2018. Part F137690: 117-120. doi:10.1145/3191477.3191501

15. Andreeva E.V. Jeksperimental'nye issledovaniya passivnogo povorota gusenichnoy mashiny pri stragivanii // *Inzhenerno-tehnicheskoe obespechenie APK. Referativnyy zhurnal*. 2005. 3: 613.

16. Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O., Starunova I.N. Mathematical model of passive withdrawal of a tractor unit. *IOP Conference series: Earth and environmental Science*. 2021. 659(1): 012081. doi:10.1088/1755-1315/659/1/012081

17. Andreeva E.V. Eksperimental'nyye issledovaniya passivnogo povorota gusenichnoy mashiny pri stragivanii [Experimental studies of passive rotation caterpillar with breakaway]. *Engineering and technical support of the agro-industrial complex. Abstract journal*. 2005. 3: 613. (in Russian)

18. Kazachenko G.V., Basalai R.A., Troinich V.A. Uravneniya ravnovesiya pri uvode gusenichnoy mashiny i ikh issledovaniye [Equations of equilibrium at slipping a track machine and their study]. *Mining mechanics and mechanical engineering*. 2020. 1: 17-22. (in Russian)

19. Vyaznikov M.V. Using the theory of combined friction when making mathematical models of curvilinear motion of tracked vehicles. [Ispol'zovaniye teorii kombinirovannogo treniya pri sostavlenii matematicheskoy modeli krivolineynogo dvizheniya gusenichnykh mashin] *Science and education of the Bauman MSTU*. 2014. 12: 279-290. doi: 10.7463/0815.9328000 (in Russian)

20. Troyanovskaya I., Ulanov A., Zhakov A., Voynash S. Friction forces at the wheel's contact with the ground in a turning vehicle, *Tribology in industry*. 2019. 41(2): 166-171. doi:10.24874/ti.2019.41.02.03

21. Zhakov A.O., Troyanovskaya I.P. The effect of anisotropy on the interaction of the caterpillar propeller with the soil during the vehicle turn. [Vliyaniye anizotropii na vzaimodeystviye gusenichnogo dvizhitel'ya s gruntom pri povorote mashiny] *Tractors and agricultural machines*. 2020. 2: 43-49. doi:10.31992/0321-4443-2020-2-43-49 (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Трояновская И.П. – 50%.
Жаков А.О. – 50%.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Irina P. Troyanovskaya – 50%.
Andrey O. Zhakov – 50%.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трояновская Ирина Павловна – д-р техн. наук,
проф., проф. кафедры «Колесные и гусеничные
машины».

Жаков Андрей Олегович – аспирант кафедры
«Колесные и гусеничные машины».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina P Troyanovskaya, Dr. of Sci., Professor, the
Wheeled and Tracked Vehicles Department.

Andrey O Zhakov, Postgraduate student, the
Wheeled and Tracked Vehicles Department.