

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 658.52011

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-2-41-47

Оригинальная статья /Original Paper

**Математическое моделирование угловых перемещений базовой машины
двухконсольного дождевального агрегата**

Т.Г. Гасанов, Э.З. Батманов, М.Р. Гусейнов, М.Т. Муталибов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является раскрытие теоретических и практических аспектов математического моделирования угловых перемещений базовой машины, что позволяет более глубоко понять принципы ее работы и взаимодействие с окружающей средой. **Метод.** При помощи математической модели проанализированы вопросы взаимодействия базовой машины с поверхностью дороги и дождевальной фермой при трех динамических состояниях агрегата в плоскости, перпендикулярной рабочему движению базовой машины, угловые характеристики поворота базовой машины в поперечном направлении при наезде с различными скоростями на препятствие без учета упругодеформирующей способности грунта. **Результат.** Результаты исследования создают возможность оценивать технические параметры угловых перемещений базовой машины на величину воздействий, возмущающих агрегат. **Вывод.** Модель позволяет правильно выбрать основные принципы построения системы автоматического управления дождевальной фермы, и ориентировочно определить главные параметры элементов аппаратуры базовой машины двухконсольного дождевального агрегата.

Ключевые слова: степень свободы, уравнение Лагранжа, математическая модель, подвеска, расчетная схема, уравнение моментов, консоль, автоматика управления, базовая машина, угловое движение

Для цитирования: Т.Г. Гасанов, Э.З. Батманов, М.Р. Гусейнов, М.Т. Муталибов. Математическое моделирование угловых перемещений базовой машины двухконсольного дождевального агрегата. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(2):41-47. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-41-47

Mathematical modeling of angular displacements of the base machine of a two-console sprinkler unit

T.G. Gasanov, E.Z. Batmanov, M.R. Guseynov, M.T. Mutalibov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to reveal the theoretical and practical aspects of mathematical modeling of the angular displacements of the base machine, which allows a deeper understanding of the principles of its operation and interaction with the environment. **Method.** With the help of a mathematical model, the issues of the interaction of the base machine with the road surface and the sprinkler farm were analyzed in three dynamic states of the unit in a plane perpendicular to the working movement of the base machine, the angular characteristics of the base machine turning in the transverse direction when hitting an obstacle at different speeds without taking into account the elastic-deforming ability of the soil. **Result.** The results of the study make it possible to evaluate the technical parameters of the angular displacements of the base machine on the magnitude of the impacts that disturb the unit. **Conclusion.** Allows you to correctly choose the basic principles of building an automatic control system for a sprinkler farm

and roughly determine the main parameters of the equipment elements of the base machine of a two-console sprinkler unit.

Keywords: degree of freedom, Lagrange equation, mathematical model, suspension, calculation scheme, equation of moments, console, automatic control, basic machine, angular motion

For citation: T.G. Gasanov, E.Z. Batmanov, M.R. Huseynov, M.T. Mutalibov. Mathematical modeling of angular displacements of the base machine of a two-console sprinkling unit. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(2):41-47. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-41-47

Введение. В общем случае движение базовой машины – трактора имеет шесть степеней свободы. Составленные с помощью уравнений Лагранжа второго рода, уравнения движения позволяют представить движение трактора как отдельные колебания в продольном и поперечном направлениях [1-2,4,5,6,7].

Уравнение движения трактора с навесным оборудованием в поперечном направлении имеет сложную структуру, а наличие значительного количества неизвестных затрудняет практическое определение передаточной функции базовой машины (трактора).

Кроме того, дождевальная агрегат имеет отличительные особенности конструкции и эксплуатации, которые не могут быть учтены уравнениями движения при обычных условиях эксплуатации агрегатов в сельском хозяйстве. Эти особенности эксплуатации дождевального агрегата и динамики отдельных его элементов (фермы и трактора) заключаются в сравнительно медленном ($0,1-0,2$ м/с) перемещении трактора вдоль оросителя с возможными максимальными амплитудами углового поперечного движения, равными $87,5 \cdot 10^3 - 105,0 \cdot 10^3$ рад ($5-6^\circ$) для трактора и $35,0 \cdot 10^3 - 44,0 \cdot 10^3$ рад ($2,0 - 2,5^\circ$) для фермы [6,10,12,13].

Постановка задачи. Ходовая часть трактора перегружена почти вдвое, центр масс агрегата расположен значительно выше в (1,5 - 2 раза), чем у других машин, агрегатируемых с гусеничным трактором, а момент инерции фермы заполненной водой, примерно в 10-20 раз больше момента инерции трактора.

В зависимости от положения рукоятки гидравлического распределителя при движении по неровностям могут возникнуть три динамических состояния агрегата: плавающее, когда на трактор воздействует только вес фермы; ферма и трактор составляют единое целое при неработающих гидроцилиндрах; относительное перемещение фермы и трактора в момент включения гидроцилиндров управления. Трактор является основным источником возмущенного углового движения фермы.

Методы исследования. Для получения упрощенной математической модели поперечного углового движения трактора, отображающей влияние главных действующих факторов (скорости появления препятствий под гусеницей $Z_{оп}$ и жесткости подвески трактора) составим уравнение движения трактора при наезде одной гусеницы на препятствие. Демпфирующая способность подвески и грунта не учитывается.

В начальный момент трактор занимает горизонтальное положение 1-1 (рис. 1). Оси Z и Y инерциальной системы координат проходят через центр масс трактора и по линии контакта гусениц трактора с горизонтальной поверхностью дороги.

Реакция опор $F_A = F_B = \frac{G}{2}$. Если под гусеницей А трактора появилось препятствие, при скорости его возникновения $\dot{Z}_{оп}$ произойдет поворот трактора относительно опоры Б на угол $\varphi_{оп}$ (положение II-II) со скоростью $\dot{\varphi}_{оп} = \frac{\dot{Z}_{оп}}{l}$, когда жесткость ходовой части трактора равна бесконечности (l – колея трактора).

При жесткости ходовой части, равной C , возникает дополнительный поворот трактора относительно точки O на угол $\varphi_{пр}$ (положение III – III) из-за перераспределения усилий F_A и F_B между соответствующими опорами.

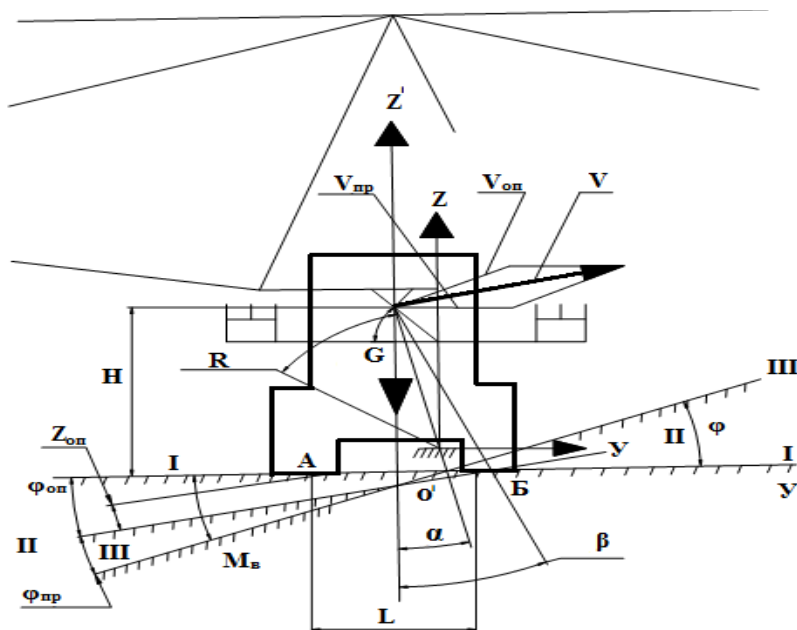


Рис. 1. Определение координат действительного поворота трактора

Fig. 1. Determining the coordinates of the actual turn of the tractor

Скорость поворота трактора под действием пружин подвески равна

$$\dot{\phi}_{\text{пр}} = \frac{\Delta \dot{F}_{\text{оп}}}{cl} = \frac{2GH\dot{Z}_{\text{оп}}}{cl^3}$$

где $\Delta \dot{F}_{\text{оп}} = \frac{2GH\dot{\phi}_{\text{оп}}}{l}$ - скорость перераспределения составляющих сил веса агрегата

та; G и H – вес агрегата и вертикальная координата центра масс его; относительное смещение центра масс фермы и трактора равна нулю, т.к. центр подвеса принят расположенным в центре масс ее.

В свою очередь поворот трактора на угол $\phi_{\text{пр}}$ вызовет дополнительное перераспределение усилий между опорами $\Delta \dot{F}_{\text{оп}}$.

Это усилие можно рассматривать как величину второго порядка малости и принять $\Delta \dot{F}_{\text{оп}} \approx 0$, т.к. в реально существующих условиях эксплуатации агрегата $\phi_{\text{пр}} < \phi_{\text{оп}}$.

Суммарная скорость угла поворота трактора составит

$$\dot{\phi} = \left(1 + \frac{2GH}{cl^2}\right) \cdot \frac{\dot{Z}_{\text{оп}}}{l}$$

При появлении под гусеницей трактора препятствия трактор совершает сложное движение, при котором происходит поворот его на угол ϕ и перемещение центра масс агрегата.

Угловые скорости $\dot{\phi}_{\text{оп}}$ и $\dot{\phi}_{\text{пр}}$ приводят к линейной скорости перемещения центра масс агрегата, что позволяет определить координаты точки действительного поворота трактора.

$$\bar{V} = \bar{V}_{\text{оп}} + \bar{V}_{\text{пр}}$$

Радиус вращения определится из выражения

$$R = \frac{V}{\dot{\phi}} = \frac{\sqrt{V_{\text{оп}}^2 + V_{\text{пр}}^2 - 2V_{\text{оп}} \cdot V_{\text{пр}} \cos(\pi - \beta)}}{\dot{\phi}}$$

где $V_{оп} = \sqrt{H^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} \dot{\phi}_{оп}$ и $V_{пр} = \sqrt{H + \left(\frac{z_{оп}}{2}\right)} \dot{\phi}_{пр}$ являются составляющими $\bar{V}$

$\beta = \arctg \frac{l}{2H}$ – угол между осью симметрии и линией, проходящей через центр масс и середину опорной поверхности гусеницы.

Угол α наклона к оси симметрии трактора можно получить из решения треугольника для плана скоростей линейного перемещения центра масс агрегата.

Так как $\bar{V}_{оп}$ и $\bar{V}_{пр}$ изменяются пропорционально $\dot{Z}_{оп}$ в процессе поворота трактора угол α остается неизменным, радиус поворота трактора после соответствующих упрощений равен $R = K_H \cdot H$

$K_H = \sqrt{1 - \frac{4ab(1 - \cos\beta)}{(1 + 2ab)^2}}$ – безразмерный коэффициент, зависящий только от техни-

ческой характеристики трактора $a = \frac{H}{l}$; $b = \frac{G}{cl}$.

В новой инерциальной системе координат (рис. 2) при расположении нулевой точки в центре действительного вращения трактора и оси Z направленной вертикально, координаты центра масс агрегата в зависимости от φ равны

$$Z = R \cos \alpha \cdot \cos \varphi \approx R \cos \alpha$$

$$Y = -R \sin \alpha \cdot \sin \varphi \approx R \sin \varphi$$

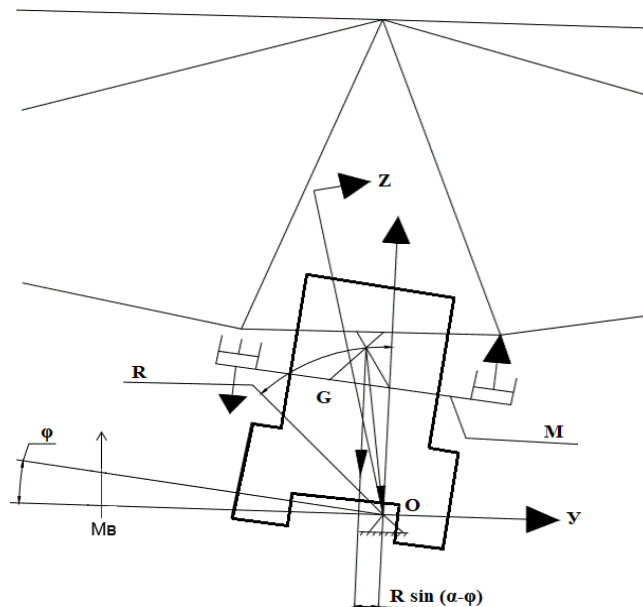


Рис. 2. Расчетная схема для определения характеристик поворота трактора и фермы

Fig. 2. Calculation scheme for determining the characteristics of the rotation of the tractor and farm

Таким образом, при наезде на препятствие трактор поворачивается под действием возмущающего момента вокруг фиксированной точки, определяемой характеристикой трактора, и в любой момент движения должно обеспечиваться равновесие активных (возмущающих) и реактивных моментов относительно этой точки поворота

$$M_B = \left(J_{OT} + \frac{G_T}{g} \cdot R_T^2 \right) \ddot{\phi}_\beta - GR \cdot \cos \alpha \cdot \varphi_B + GR \cdot \sin \alpha$$

$$\varphi_B = \frac{2}{l + 2R \sin \alpha} Z_{оп}$$

где $J_{от} + \frac{G_T}{g} \cdot R_T^2 = J_T$ - момент инерции трактора относительно начала координат;

$R_T^2 = H_T^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2$ - радиус вращения центра масс трактора, за положительное направление

поворота трактора принято вращение его по часовой стрелке.

Коэффициент вязкого трения гидросистемы равен нулю.

Для анализа уравнения возмущающих моментов целесообразно записать в новых переменных $Z_{оп}$ и $\ddot{Z}_{оп}$

$$M_{вт} = K_{\varphi} (J_T \ddot{Z}_{оп} - GR \cos \alpha \cdot Z_{оп}) + GR \cdot \sin \alpha$$

$$K_{\varphi} = \frac{2}{l + 2R \sin \alpha}$$

Это уравнение соответствует динамическому состоянию агрегата, при котором на трактор действует только вес фермы. В дождевальных агрегатах типа ДДА-100МА коэффициенты при $Z_{оп}$ и $\ddot{Z}_{оп}$ равны $J_T \approx GR \cos \alpha \approx 20000 - 1800$ [2, 8].

При запертом положении гидроцилиндров с учетом известного соотношения моментов инерции N трактора $N = \frac{J_{\varphi}}{J_T} = 17$ возмущающий момент равен

$$M_{ва} = K_{\varphi} [(N+1) \cdot J_T \ddot{Z}_{оп} - GR \cos \alpha \cdot Z_{оп}] + GR \cdot \sin \alpha$$

Принимая [1]

$$Z_{оп} = Z_o \sin \frac{2\pi V}{l} \cdot t$$

$$\ddot{Z}_{оп} = -Z_o \frac{4\pi^2 V^2}{\bar{l}^2} \cdot \sin \frac{2\pi V}{\bar{l}} \cdot t$$

V – скорость движения агрегата; $\bar{l}$ – средняя протяженность неровности, можно получить зависимость возмущающих моментов от скорости рабочего движения при двух динамических состояниях агрегата.

$$M_{вт} = K_{\varphi} \frac{4\pi^2 J_T}{\bar{l}^2 Z_o \sin \frac{2\pi V}{l} t} \left(\frac{l^2}{4\pi^2} - V^2 \right) + GR \sin \alpha$$

$$M_{ва} = K_{\varphi} \frac{4\pi^2 J_T}{\bar{l}^2 Z_o \sin \frac{2\pi V}{\bar{l}} t} \left[\frac{l^2}{4\pi^2} - (N+1)V^2 \right] + GR \sin \alpha$$

Обсуждение результатов. Для средней протяженности неровности около 3 м и $V=0,11$ м/с возмущающий момент дождевального агрегата в 14 раз больше возмущающего момента трактора. При скорости движения в 10 раз большей необходимой при транспорте или мелкодисперсном дождевании возмущающий момент для агрегата будет более чем в 20 раз превышать возмущающий момент тракторов.

При третьем динамическом состоянии агрегата трактора на действие управляющего момента (M) неоднозначно и зависит от его угловых характеристик. Действие M на трактор, находящийся в горизонтальном положении выражается уравнением

$$J_T (\ddot{\varphi} + \ddot{\varphi}_c) = M + 2GH\varphi - G_M (\varphi + \varphi_c)$$

где $2GH\varphi$ – момент, вызванный смещением центра масс между опорами при повороте трактора от управляющего воздействием; $G_M = Gl^2$ – жесткость подвески трактора,

выраженная в угловых величинах; φ и φ_c – углы поворота трактора под действием M и смещения центра масс.

После преобразования это уравнение, приведенное к стандартному виду, будет равно:

$$\ddot{\varphi} + \frac{G_M}{J_T} \varphi = \frac{M}{J_T}$$

а его решение будет представлено зависимостью

$$\varphi = G_1 \cos \sqrt{\frac{G_M}{J_T}} t + G_2 \sin \sqrt{\frac{G_M}{J_T}} t + \frac{M}{G_M}$$

где G_1 и G_2 (постоянные интегрирования) учитывают угловые характеристики поворота трактора в начале действия управляющего момента. При нулевых начальных условиях ($t_0=0$; $\varphi_0=0$) это уравнение имеет вид

$$\varphi = \frac{M}{G_M} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{G_M}{J_T}} t \right)$$

Для мгновенного возникшего $M=\text{const}$, который появляется при включении гидро-системы, время полного поворота трактора τ на угол φ определится из круговой частоты процесса

$$\tau \cdot \frac{T}{2} = \sqrt{\frac{J_T}{G_M}} \pi$$

Таким образом, в этом случае τ не зависит от M , а характеризуется постоянными техническими параметрами трактора, т.е. полный управляющий момент будет воздействовать на ферму спустя τ после его появления. Максимальный угол поворота трактора пропорционален управляющему воздействию.

Вывод. Проведенный анализ в статье дает возможность количественно оценивать влияние технических параметров базовой машины (трактора), на величину воздействий возмущающих агрегат, и на угловые характеристики поворота трактора в поперечном направлении при наезде с различными скоростями на препятствие без учета упругодеформирующей способности грунта. Это позволяет правильно выбрать основные принципы построения систем автоматического управления положением дождевальной фермы и ориентировочно определить главные параметры элементов аппаратуры.

Библиографический список:

1. Барский И.Б. и др. Динамика трактора, М., «Машиностроение», 1973.
2. Лебедев Б.М. Дождевальные машины М., «Машиностроение», 1965.
3. Дубенок Н.Н., Бородычев В.В., Чечко Р.А. Малоинтенсивное дождевание картофеля в условиях юга России. Монография. Издательство: Проспект. 2017- 188 с.
4. Агаханов Э.К., Агаханов Г.Э. Математическое моделирование воздействия порового давления на скелет грунта. Строительство: проблемы и перспективы: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, 29-30 марта 2013 г. Махачкала: ДГИНХ, 2013. – 154 с.
5. Гасанов Т.Г., Гусейнов М.Р. К вопросу повышения эффективности строительства и эксплуатации рисовых оросительных систем в условиях РД. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала, 2014. – Том 34 (3). – С.59-68.
6. Лурье А.Б. Автоматизация сельскохозяйственных агрегатов, Л., «Колос», 1967
7. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. М. Издательство АСВ, 1995.- 568 с.
8. Варданян Г.С. Прикладная механика: применение методов теории подобия и анализа размерностей к моделированию задач механики деформируемого твердого тела. Учебное пособие, - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 174 с.
9. Гасанов Т.Г. Устройство термического кротового дренажа. Москва, Издательство «Колос», «Хлопководство», 1978. - С.40-41.

10. Краснощеков В.С. Критерии оценки равномерности полива при дождевании // Сб.науч.тр./ВНИИ механизации и техники полива,- 1975.- Т.8.- С.3-22. 38.
11. Краснощеков В.С. К вопросу размещения слоя осадков при дождевании // Новое в технике и технологии полива.- М., 1980. - С.72-81.
12. Рябенков Н.Г. О выполнении условий свободной границы торца связующего в теории слоистых конструкций// Матер. 4-го Междунар. Симпозиума, Дин.и техно. Проблемы механики констр. и сплошн. сред. Ярополец, 16-18 февр., 1998. М., 1998, с. 21-22.
13. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для вузов/С.М. Тарг. - 20-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2010. - 416 с.

References:

1. Barsky I.B. et al. Tractor dynamics, M., Mashinostroenie, 1973. (In Russ)
2. Lebedev B.M. Irrigation machines M., "Engineering", 1965. (In Russ)
3. Dubenok N.N., Borodichev V.V., Chechko R.A. Low-intensity sprinkling of potatoes in the conditions of the south of Russia. Monograph. Publisher: Prospect. 2017; 188. (In Russ)
4. Agakhanov E.K., Agakhanov G.E. Mathematical modeling of the impact of pore pressure on the soil skeleton. Construction: problems and prospects: a collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference, March 29-30, 2013. Makhachkala: DGINKh, 2013; 154. (In Russ)
5. Gasanov T.G., Guseynov M.R. On the issue of increasing the efficiency of construction and operation of rice irrigation systems in the conditions of the Republic of Daghestan. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science*. Makhachkala, 2014; 34 (3):59-68. (In Russ)
6. Lurie A.B. Automation of agricultural units, L., "Kolos", 1967 (In Russ)
7. Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Resistance of materials with the fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. M. DIA Publishing House, 1995; 568. (In Russ)
8. Vardanyan G.S. Applied mechanics: application of methods of similarity theory and dimensional analysis to the modeling of problems in the mechanics of a deformable solid body. Textbook, - M.: NITs IN-FRA-M, 2016; 174. (In Russ)
9. Gasanov T.G. Thermal mole drainage device. Moscow, *Kolos Publishing House, Cotton Growing*, 1978; 40-41. (In Russ)
10. Krasnoshchekov B.C. Criteria for assessing the uniformity of irrigation during sprinkling. *Sat.nauch.tr./All-Russian Research Institute of Mechanization and Irrigation Techniques*. 1975; .8 (3): 22. 38. (In Russ)
11. Krasnoshchekov B.C. On the issue of placing a layer of precipitation during sprinkling. *New in irrigation technology and technology*. M., 1980;72-81. (In Russ)
12. Ryabenkov N.G. On the fulfillment of the conditions of the free boundary of the butt end of the binder in the theory of layered structures//Mat. 4th Intern. Symposium, Dynamic and techno. Problems of constructive mechanics. and continuums. Yaropolets, February 16-18, 1998. M., 1998 21-22. (In Russ)
13. Targ S.M. A short course in theoretical mechanics: Proc. for higher educational institutions / S.M. Targ. - 20th ed., erased. M.: Higher. School, 2010; 416. (In Russ)

Сведения об авторах:

Гасанов Тельман Гамзатович, кандидат технических наук, доцент кафедры организации и безопасности движения g.telman2022@bk.ru

Батманов Эдвард Загидинович, кандидат технических наук, декан факультета права и управления на транспорте, batmanov.1978@mail.ru

Гусейнов Марат Рамизович, старший преподаватель кафедры транспортных сооружений и строительных материалов, Maratdgtu@mail.ru

Муталибов Магомедсалих Такидинович, аспирант кафедры организации и безопасности движения, mutalibovm98@mail.ru

Information about authors:

Telman G. Gasanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Organization and Traffic Safety g.telman2022@bk.ru
Edward Z. Batmanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Dean of the Faculty of Law and Management in Transport, batmanov.1978@mail.ru

Marat R. Guseynov, Senior Lecturer of the Department of Transport Structures and Building Materials, Maratdgtu@mail.ru

Magomedsalih T. Mutalibov, Post-graduate Student of the Department of Organization and Traffic Safety, mutalibovm98@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 23.04.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 16.05.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 16.05.2023.