

Тип статьи: научная

УДК 629.3.017

DOI: 10.35887/2305-2538-2024-5-105-112

СОГЛАСОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАКТИЧЕСКОГО ПОВОРОТА КОЛЁСНОЙ МАШИНЫ

*Александр Николаевич Беляев*¹, *Владимир Иванович Оробинский*²,
*Татьяна Владимировна Тришина*³, *Павел Викторович Шередекин*⁴,
*Алексей Максимович Мухин*⁵

^{1,2,3,4,5} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
г. Воронеж, Российская Федерация

¹aifkm_belyaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9195-7091>

²n7477@mail.ru

³t.v.trishina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9976-979X>

⁴pavel.sheredekin@syngenta.com, <https://orcid.org/0009-0007-2852-5844>

⁵alex.fly2002@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Александр Николаевич Беляев, aifkm_belyaev@mail.ru
Corresponding author: Alexander Belyaev, aifkm_belyaev@mail.ru

Реферат. Исходя из приведенной расчетной схемы управляемого криволинейного движения колесной машины выявлено, что рулевая трапеция вызывает некоторое несоответствие между кинематикой реального и правильного поворота. Установлено, что при регулировке ширины колеи машины кинематическое рассогласование между оптимальными условиями качения колесами возрастает, и, следовательно, расчетные зависимости параметров идеального поворота не будут давать удовлетворительный результат при анализе фактического поворота. За оценочный показатель поворачиваемости колесной машины принят минимальный теоретический радиус поворота. Представлен вывод многофункциональной аналитической зависимости для определения теоретического минимального радиуса поворота колесной машины, управление колесами которой осуществляет рулевая трапеция. Полученная формула включает в себя продольную базу машины, шкворневую колею, углы поворота внутреннего и наружного управляемых колес. Дано сравнение результатов расчетов по разработанной и известной формулам, подтвердившее полную сходимость. Выявлено, что увеличение, например, шкворневой колеи машины на 0,2 м приводит к росту теоретического минимального радиуса фактического поворота на 16,5%, а расстояния от продолжения задней оси до мгновенного центра поворота – на 45,07...98,02 % при изменении угла поворота внутреннего управляемого колеса от 20° до 40°.

Ключевые слова: колесная машина, правильный поворот, фактический поворот, рулевая трапеция, минимальный радиус, колея, чистое качение.

COORDINATION OF THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE ACTUAL ROTATION OF THE WHEELED VEHICLE

*Alexander Belyaev*¹, *Vladimir Orobinsky*², *Tatiana Trishina*³, *Pavel Sheredekin*⁴, *Alexey Mukhin*⁵
^{1,2,3,4,5} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,

Voronezh, Russian Federation

¹aifkm_belyaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9195-7091>

²n7477@mail.ru

³t.v.trishina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9976-979X>

⁴pavel.sheredekin@syngenta.com, <https://orcid.org/0009-0007-2852-5844>

⁵alex.fly2002@mail.ru

Abstract. Based on the above calculation scheme of controlled curvilinear motion of a wheeled vehicle, it was revealed that the steering trapezoid causes some discrepancy between the kinematics of real and correct rotation. It is established that when adjusting the track width of the machine, the kinematic mismatch between the optimal rolling conditions of the wheels increases, and, consequently, the calculated dependences of the parameters of the ideal turn will not give a satisfactory result when analyzing the actual turn. The minimum theoretical turning radius is taken as an estimated indicator of the turnability of a wheeled vehicle. The conclusion of a multifunctional analytical dependence for determining the theoretical minimum turning radius of a wheeled vehicle, the wheels of which are controlled by a steering trapezoid, is presented. The resulting formula includes the longitudinal base of the machine, the pin track, the angles of rotation of the inner and outer steerable wheels. A comparison of the calculation results according to the developed and known formulas is given, which confirmed the complete convergence. It was found that, for example, an increase in the pivot track of the machine by 0.2 m leads to an increase in the theoretical minimum radius of the actual turn by 16.5%, and the distance from the continuation of the rear axle to the instantaneous center of rotation by 45.07...98.02% when the angle of rotation of the inner steering wheel changes from 20° to 40°.

Keywords: wheeled vehicle, correct turn, actual turn, steering trapeze, minimum radius, track, clean rolling.

Для цитирования: Беляев А.Н., Оробинский В.И., Тришина Т.В., Шередекин П.В., Мухин А.М. Согласование геометрических характеристик фактического поворота колёсной машины // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 71, № 5. С. 105-112. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-5-105-112>.

For citation: Belyaev A., Orobinsky V., Trishina T., Sheredekin P., Mukhin A. Coordination of the geometric characteristics of the actual rotation of the wheeled vehicle. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 71(5): 105-112. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-5-105-112>.

Введение. При выполнении различных работ колесные машины большую часть времени осуществляют движение по криволинейной траектории. По сути, каждый ее маневр является поворотом, представляющим собой достаточно сложный, а в некоторых случаях и опасный режим эксплуатации. Поэтому анализ и оценка поворачиваемости колесного транспортного средства, под которой будем понимать его способность совершать повороты по траектории заданной кривизны, является актуальной задачей, связанной в первую очередь с безопасностью движения.

Устойчивость, управляемость и маневренность при криволинейном движении колесной машины являются одними из наиболее важных эксплуатационных свойств, во многом определяющие энергетические затраты на ее передвижение, уровень психомоторного и эмоционального состояния водителя, активную безопасность, и, в целом, эффективность технико-экономических показателей и качество работы.

Радиус кривизны траектории (радиус поворота R), описываемой какой либо характерной точкой колесной машины, принимаемой за кинематический центр, является одной из основных геометрических характеристик, характеризующей ее поведение при движении по криволинейному пути. Посредством радиуса R проводится определение кинематических параметров поворота машины. Он также служит в качестве достаточно объективного критерия для оценки эффективности функционирования машины по таким эксплуатационным свойствам, как устойчивость движения, управляемость и маневренность [1]. Как правило, в теории движения колесных машин за кинематический центр принимают или центр тяжести машины, или середину одного из ее мостов, обычно – заднего. При этом, имея величину радиуса кинематического центра, можно, используя тригонометрические зависимости, легко определить радиус любой другой точки машины [2].

Величина радиуса поворота непосредственно влияет на маневренность колесной машины. Чем ниже показатель радиуса поворота, тем меньше места необходимо ей для выполнения разворота на 180°, и тем выше возможность для совершения маневра в ограниченном пространстве. С уменьшением радиуса поворота центробежная сила инерции, действующая на машину, возрастает,

что может являться причиной возникновения бокового увода шин колес, бокового скольжения и заноса машины, и, как следствие, потери устойчивости движения и управляемости [2].

Определить значение фактического радиуса поворота колесного транспортного средства поворота возможно опытным путем. Но для проведения экспериментов необходима разработка методики исследований, адекватной конкретным типу машины и условиям эксплуатации. При этом требуется применение достаточно оригинальных и дорогостоящих приборов и оборудования, которые к тому же требуют индивидуальной адаптации к выбранному объекту. Также реализация любой из известных методик является очень энергозатратным и трудозатратным процессом [2]. В связи с этим, теоретические разработки по определению радиуса поворота колесной машины являются наиболее приемлемыми.

Как показывает анализ литературы, чаще всего принято определять величину R_{\min} – теоретического минимального радиуса поворота, который представляет собой наименьшее расстояние от продольной оси машины до мгновенного центра ее поворота. Известные формулы для оценки R_{\min} относятся к так называемому правильному (идеальному) повороту, выполняемому в условиях чистого (свободного) качения всех колес [1]. В этом случае для двухосной четырехколесной машины с передними управляемыми колесами, как наиболее часто встречающейся компоновки, кинематический центр будет априори совпадать с серединой заднего моста.

Очевидно, проскальзывание колес транспортного средства относительно опорной поверхности является причиной потери управляемости и устойчивости. Чтобы не допустить подобного при криволинейном движении, углы поворота управляемых колес в любой момент должны быть согласованными таким образом, чтобы каждое колесо катилось по своей окружности. Для достижения этого необходимо, чтобы мгновенный центр поворота располагался на пересечении перпендикуляров к плоскостям качения всех колес с линией продолжения задней оси. В качестве устройства, с помощью которого происходит согласование углов поворота управляемых колес современных машин, в подавляющем большинстве случаев применяется механизм рулевой трапеции.

Однако, при выполнении колесной машиной фактического (реального) поворота посредством звеньев рычажного механизма *КГНМ* рулевой трапеции, состоящей из поворотных рычагов 1, балки управляемого моста 2 и поперечной тяги 3 (рисунок 1) и предназначенной для обеспечения рациональной кинематической связи между колесами машины, расчетные зависимости для исследования геометрии и кинематики идеального поворота не дают искомого положительного результата при оценке реального поворота [3, 4]. Причем изменение ширины колеи машины нарушает исходную геометрию рулевой трапеции, но при этом соотношения между углами поворота рычагов 1 остаются прежними, а условия правильного поворота будут другими, соответствующими «новой» колее, что приводит к увеличению погрешностей в расчетах [5, 6].

Таким образом, для корректной оценки поворачиваемости, построения адекватных теорий поворота и устойчивости колесной машины за основу следует выбирать расчетную кинематическую схему криволинейного движения, осуществляемого посредством рулевой трапеции (рисунок 1).

В связи с вышеизложенным, цель настоящих исследований – разработка, анализ и сравнение расчетной зависимости для оценки теоретического минимального радиуса реального поворота колесной машины, выполняемого рулевой трапецией.

Следует отметить, что подобная задача уже решалась авторами в работе [6], но с использованием другой методики.

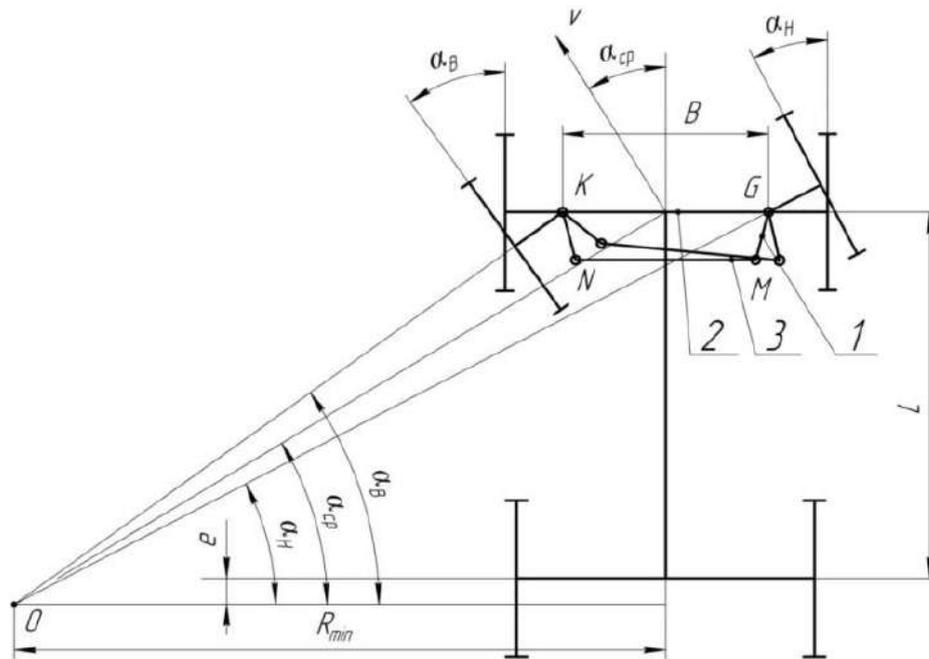


Рисунок 1 – Кинематическая схема реального поворота колесной машины с передними поворотными колесами, реализуемого рулевой трапецией

Методика исследования. На современных колесных машинах устанавливаются деформируемые в боковом направлении шины, поэтому векторы скоростей центров колес образуют со средними плоскостями колес угол бокового увода [1]. Очевидно, мгновенный центр поворота, являющийся всегда результатом пересечения перпендикуляров к векторам скоростей, не будет при этом совпадать с мгновенным центром поворота O машины, имеющей недеформируемые шины (рисунок 1). Так как во время движения колесной машины по дороге в реальных эксплуатационных условиях обстановка непрерывно меняется в виду множества объективных и субъективных факторов, учесть которые не представляется возможным, то сделано допущение о жестких в боковом направлении шинах, что позволяет поворотным колесам катиться без бокового скольжения и направление движения определять их положением [1].

Исходя из тригонометрии схемы реального поворота, соответствующий ему теоретический минимальный радиус поворота колесной машины с передними управляемыми колесами можно определить по следующим формулам (рисунок 1):

$$R_{min} = \frac{L+e}{tg\alpha_B} + \frac{1}{2}B; \quad (1)$$

$$R_{min} = \frac{L+e}{tg\alpha_H} - \frac{1}{2}B, \quad (2)$$

где L – колесная (продольная) база машины, м;

e – кратчайшее расстояние от мгновенного центра поворота O до задней оси машины, м;

α_B – угол поворота внутреннего поворотного колеса, град;

B – расстояние между осями шкворней, м;

α_H – угол поворота внешнего поворотного колеса [3], град.

При обозначении через

$$t=L+e, \quad (3)$$

формулы (1) и (2) примут вид:

$$R_{min} = \frac{t}{tg\alpha_B} + \frac{1}{2}B; \quad (4)$$

$$R_{min} = \frac{t}{tg\alpha_H} - \frac{1}{2}B. \quad (5)$$

Сумма (4) и (5) дает следующий результат:

$$2R_{min} = \frac{t}{tg\alpha_B} + \frac{t}{tg\alpha_H} = \frac{t \cdot tg\alpha_H + t \cdot tg\alpha_B}{tg\alpha_B \cdot tg\alpha_H} - \frac{t \cdot (tg\alpha_H + tg\alpha_B)}{tg\alpha_B \cdot tg\alpha_H}. \quad (6)$$

Из (6) с учетом (3) окончательно получаем расчетную зависимость для вычисления теоретического минимального радиуса реального поворота

$$R_{min} = \frac{(L+e) \cdot (tg\alpha_H + tg\alpha_B)}{2 \cdot tg\alpha_B \cdot tg\alpha_H}. \quad (7)$$

Из сравнения (1) и (2)

$$\frac{L+e}{tg\alpha_B} + \frac{1}{2}B = \frac{L+e}{tg\alpha_B} - \frac{1}{2}B,$$

также как и в работе [6], получаем наименьшее расстояние от задней оси машины до мгновенного центра поворота в (7)

$$e = B \cdot \frac{tg\alpha_H \cdot tg\alpha_B}{(tg\alpha_B - tg\alpha_H)} - L. \quad (8)$$

Отметим, что в работе [6] был также осуществлен вывод с использованием алгоритма, отличного от представленного, и проведена апробация следующей формулы для расчета того же, что и (7), теоретического радиуса фактического поворота колесной машины:

$$R_{min} = B \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{tg\alpha_H}{(tg\alpha_B - tg\alpha_H)} \right). \quad (9)$$

Результаты и их обсуждение. Сравнение расчетных зависимостей (7) и (9) показал, что эффективнее и функциональнее является формула (7), так как в ее состав входят дополнительно продольная база L и отклонение мгновенного центра поворота от задней оси машины e , что дает возможность проводить более глубокий и комплексный анализ криволинейного движения колесной машины.

Результаты расчетов по формулам (7) и (9), приведенные на рисунке 2 в виде графика зависимостей теоретического минимального радиуса поворота R_{min} от угла поворота внутреннего управляемого колеса α_B при реальном повороте колесного трактора, имеющего продольную базу $L = 2,37$ м, и двух вариантах ширины шкворневой колеи $B = 1,12$ м и $B = 1,32$ м [7], показали их полную идентичность.

Получено: $B=1,12$ м и $\alpha_B=20^\circ$ – $R_{min}=9,183$ м, $e=0,769$ м; $B = 1,12$ м и $\alpha_B=40^\circ$ – $R_{min}=3,396$ м, $e=0,01$ м; при $B=1,32$ м и $\alpha_B=20^\circ$ – $R_{min}=11,018$ м, $e=1,4$ м; при $B = 1,32$ м и $\alpha_B=40^\circ$ – $R_{min}=4,0855$ м, $e=0,5044$ м (рисунки 2, 3).

Таким образом, увеличение ширины колеи машины на 0,2 м приводит к росту теоретического минимального радиуса поворота R_{min} при $\alpha_B=20^\circ$ на величину $\Delta R_{min}=1,835$ м, а при $\alpha_B=40^\circ$ – $\Delta R_{min}=0,69$ м, что соответствует примерно 16,5 % (рисунок 2). Подобная картина наблюдается и в отношении значений отклонения e мгновенного центра поворота от задней оси машины: соответственно $\Delta e=0,631$ м (45,07%) и $\Delta e=0,494$ м (98,02 %). При этом большим углам поворота управляемых колес соответствуют меньшие величины Δe , что является показателем более благоприятных условий качения колес (рисунок 3).

Во всех исследуемых вариантах, кроме $B = 1,12$ м и $\alpha_B=40^\circ$, при котором точка O практически лежит на продолжении задней оси машины, мгновенный центр поворота располагается за задней осью, вне колесной базы, что является фактором неблагоприятных условий вращения колес, в виду чего происходит их интенсивное скольжение и повышенный износ шин.

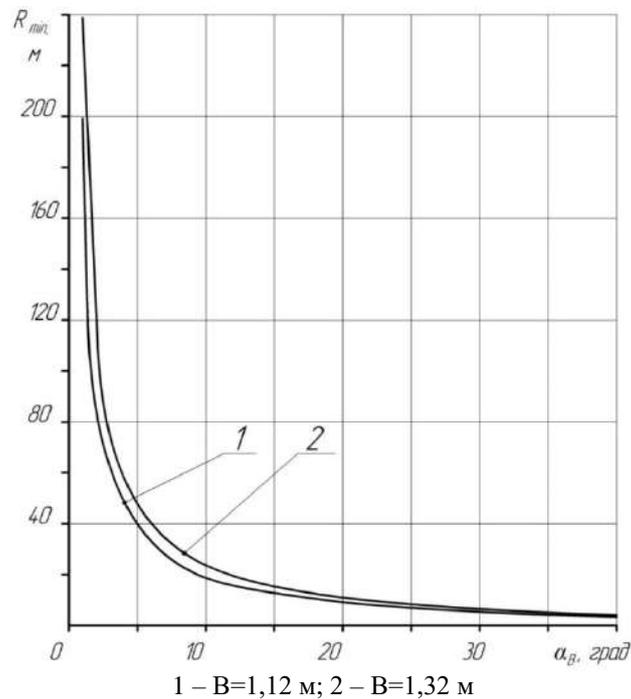


Рисунок 2 – Графики зависимостей теоретического минимального фактического радиуса поворота колесной машины от угла поворота внутреннего управляемого колеса

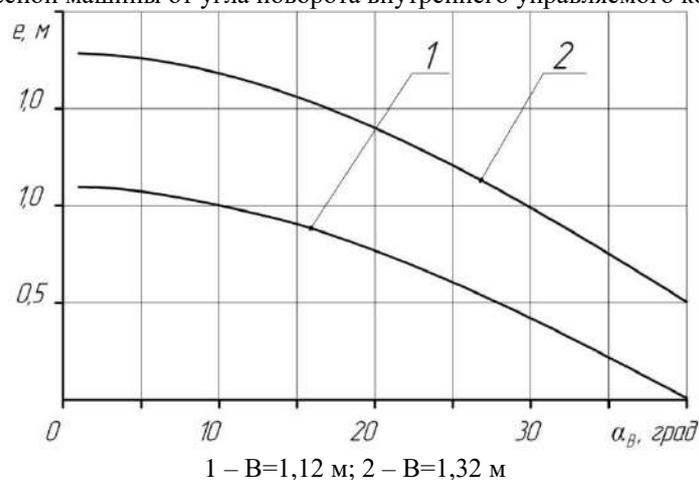


Рисунок 3 – Графики зависимостей расстояния от мгновенного центра поворота до задней оси колесной машины при реальном повороте от угла поворота внутреннего управляемого колеса

Выводы.

1. Известные расчетные зависимости, применяемые при исследовании криволинейного движения колесной машины, для определения геометрических и кинематических характеристик, разработаны, исходя из предположения о чистом, без проскальзывания, качении всех колес, дают адекватный результат только при оценке правильного поворота.

2. Геометрия шарнирно-рычажного механизма рулевой трапеции не может в полной мере согласовать условия свободного качения колес при фактическом повороте колесной машины и повторить кинематику правильного поворота.

3. Получены и подтверждены, сравнением с результатами ранее проведенных исследований, аналитические зависимости для расчета теоретического минимального радиуса фактического поворота при изменении ширины колеи колесной машины.

4. Выявлены закономерности изменения теоретического минимального радиуса фактического поворота, определяющего поведение колесной машины при криволинейном движении транспортного средства, в зависимости от угла поворота внутреннего управляемого колеса и ширины колеи.

Список источников

1. Смирнов Г.А. Теория движения колёсных машин. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
2. Беляев А.Н. Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колесных тракторов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Беляев. Мичуринск-научоград, 2019. 440 с.
3. Бухарин Н.А., Прозоров В.С., Щукин М.М. Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля: учебное пособие для вузов. 2-е изд., доп. и перераб. Л.: Машиностроение, 1973. 504 с.
4. Reza J. Vehicle Dynamics: Theory and Application. 2nd edition. New York: Springer International Publishing, 2008. 1045 p.
5. Беляев А.Н., Оробинский В.И., Тришина Т.В., Шередекин П.В. Обоснование геометрических параметров рулевой трапеции колесной машины // Вестник Воронежского государственного аграрного университета, 2023. Том 16. № 2 (77). С. 116-123.
6. Беляев А.Н., Оробинский В.И., Химченко А.В. и др. Определение положения мгновенного центра поворота и радиуса поворота при изменении ширины колеи колёсного трактора // Наука в Центральной России. 2024. № 3 (69). С. 73–84.
7. Руководство по эксплуатации тракторов «Беларус-80.1/82.1/820» // ООО «Минский тракторный завод», 2015. 381 с.

References

1. Smirnov G.A. Theory of motion of wheeled vehicles. 2nd ed., additional and revised. M.: Mechanical Engineering, 1990. 352 pp.
2. Belyaev A.N. Improving the efficiency of machine-tractor units based on integrated universal-rowed wheeled tractors: dis. ... Doctor of Technical Sciences: 05.20.01 / A.N. Belyaev. Michurinsk-naukograd, 2019. 440 pp.
3. Bukharin N.A., Prozorov V.S., Shchukin M.M. Automobiles. Design, load conditions, work processes, strength of car units: a textbook for universities. 2nd ed., additional and revised L.: Mechanical Engineering, 1973. 504 pp.
4. Reza J. Vehicle dynamics: theory and application. 2nd edition. New York: Springer International Publishing, 2008. 1045 pp.
5. Belyaev A.N., Orobinsky V.I., Trishina T.V., Sheredekin P.V. Substantiation of geometric parameters of the steering trapezoid of a wheeled vehicle // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University, 2023. Volume 16. No. 2 (77). pp. 116-123.
6. Belyaev A.N., Orobinsky V.I., Himchenko A.V., etc. Determination of the position of the instantaneous center of rotation and the radius of rotation when changing the track width of a wheeled tractor // Nauka v Tsentralnaya Rossiya. 2024. No. 3 (69). pp. 73-84.
7. The manual for the operation of tractors "Belarus-80.1/82.1/820 " // Minsk Tractor Plant LLC, 2015. 381 pp.

Информация об авторах

А. Н. Беляев – доктор технических наук, доцент; В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; Т. В. Тришина – кандидат технических наук, доцент; П. В. Шередекин – аспирант; А.М. Мухин – студент.

Information about the authors

A. Belyaev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; V. Orobinsky - Doctor of Agricultural Sciences, Professor; T. Trishina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; P. Sheredekin – graduate student; A. Mukhin – student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 10.08.2024 Принята к публикации (Accepted): 11.10.2024