

ОЦЕНКА БОКОВОГО ОТКЛОНЕНИЯ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ ОТ ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

✉ **Беляев А.Н., Шацкий В.П., Гулевский В.А., Тришина Т.В.**

Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I

Воронеж, Россия

✉ e-mail: aifkm_belyaev@mail.ru

Колесная машина при криволинейном движении всегда находится под действием боковой силы и вследствие бокового увода отклоняется от заданной траектории движения. Известные методы и способы изучения криволинейного движения колесной машины, особенно при неустановившихся режимах, на высоких скоростях и с малыми радиусами поворота, дают достоверную информацию лишь для ограниченных условий эксплуатации машины на твердом опорном основании. Предложена методика расчета бокового отклонения колесной машины при движении по деформируемому основанию от теоретической криволинейной траектории как разность между действительным минимальным и теоретическим минимальным радиусами поворота. Данная методика представляет ее как единый объект, а не описывает ввиду сложности качение отдельного колеса. При этом исключен трудоемкий и материально затратный процесс определения эмпирических коэффициентов и зависимостей. При аналитических исследованиях кривых траекторий использованы экспериментальные данные и описание этих траекторий методом нелинейной аппроксимации кусочно-гладкой функцией. Получена действительная аналитическая траектория путем сдвига теоретической траектории и минимального теоретического радиуса на величину бокового отклонения. Представленная методика аналитического описания действительной траектории криволинейного движения колесной машины по деформируемому опорному основанию с использованием экспериментальных данных и нелинейной аппроксимации их кусочно-гладкой функцией, а также методика определения ее бокового отклонения с учетом изменения расчетной и экспериментальной траекторий позволяют достаточно точно описать различные режимы неустановившегося движения по фактической траектории и решать необходимые для рационального использования колесных машин задачи по оптимизации их конструктивных свойств и эксплуатационных качеств.

Ключевые слова: боковое отклонение, колесная машина, траектория, поворот, аппроксимация

EVALUATION OF THE LATERAL DEVIATION OF A WHEELED VEHICLE FROM A GIVEN TRAJECTORY

✉ **Belyaev A.N., Shatsky V.P., Gulevsky V.A., Trishina T.V.**

Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I

Voronezh, Russia

✉ e-mail: aifkm_belyaev@mail.ru

A wheeled machine in a curved movement is always under the action of a lateral force and deviates from the set trajectory due to lateral guidance. Well-known methods and ways of studying the curvilinear motion of a wheeled machine, especially in unsteady modes, at high speeds and with small turning radii, provide reliable information only for limited conditions of machine operation on a solid support base. A methodology for calculating the lateral deviation of a wheeled machine when driving on a deformable base from a theoretical curvilinear trajectory as the difference between the actual minimum and theoretical minimum turning radii is proposed. This methodology presents it as a single object, rather than describing the rolling of an individual wheel due to its complexity. This eliminates the time-consuming and materially expensive process of determining empirical coefficients and dependencies. The analytical studies of the trajectory curves used experimental data and the description of these trajectories by the method of nonlinear approximation of the piecewise-smooth function. The actual analytical trajectory is obtained by shifting the theoretical trajectory and the minimum theoretical radius by the amount of lateral deviation. The proposed method of analytical description of the actual trajectory of the curvilinear motion of a wheeled machine on a

deformable support base using experimental data and nonlinear approximation of their piecewise smooth function, as well as the method of determining its lateral deviation with the changes in the calculated and experimental trajectories allow to accurately describe various regimes of unsteady motion along the actual trajectory and solve the problems necessary to rationally use wheeled machines to optimize their design properties and performance.

Keywords: lateral deviation, wheeled vehicle, trajectory, turn, approximation

Для цитирования: Беляев А.Н., Шацкий В.П., Гулевский В.А., Тришина Т.В. Оценка бокового отклонения колесной машины от заданной траектории движения // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2022. Т. 52. № 4. С. 120–128. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-4-13>

For citation: Belyaev A.N., Shatsky V.P., Gulevsky V.A., Trishina T.V. Evaluation of the lateral deviation of a wheeled vehicle from a given trajectory. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2022, vol. 52, no. 4, pp. 120–128. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-4-13>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Колесная машина при криволинейном движении всегда находится под действием боковой силы и вследствие бокового увода отклоняется от заданной траектории движения. При этом часто углы бокового увода соизмеримы даже с углами поворота управляемых колес, что негативно влияет на некоторые ее кинематические и динамические характеристики, а также ухудшает многие эксплуатационные свойства [1].

С момента открытия в 1925 г. французским механиком Дж. Брулье явления бокового увода эластичной шины [2, 3] разработано множество теорий, описывающих его. В основе большинства данных теорий лежит процесс качения колеса по тому или иному опорному основанию без проскальзывания. Однако известно, что на рыхлом грунте причиной дополнительного бокового увода могут быть скольжение контакта шины колеса в поперечном направлении, боковая деформация и сдвиг грунта. Даже незначительные для конкретных условий функционирования объекта по величине боковые силы, как показывают экспериментальные исследования, вызывают проскальзывание колеса, которое совместно с упругой деформацией пневматической шины, сдвигают в поперечном направлении его обод относительно опорной площадки. При этом и сама контактная площадка перемещается вбок относительно опорного основания вслед-

ствие ее деформации [4–7]. Также эффективному применению большинства теорий бокового увода, особенно при криволинейном движении, препятствуют допущения об установившемся режиме движения колес, о равнозначности условий их качения, об однородности грунта и постоянности его физико-механических свойств.

Вследствие указанных причин известные методы и способы исследования движения колесной машины по криволинейной траектории, особенно при неустановившихся режимах, на рабочих скоростях и с малыми радиусами поворота, несмотря на некоторое соответствие аналитических и экспериментальных данных [8], имеют ряд недостатков, например:

- сложно экспериментально определить при различных условиях движения эмпирические коэффициенты, входящие в расчетные формулы;
- полученные аналитические зависимости, как правило, громоздки, не дают полной и достоверной информации при анализе исследуемого процесса, не позволяют описать реальный характер контакта пневматического колеса с почвой;
- практическая точность расчетов достигается в основном для ограниченных условий функционирования машины, включающих в том числе небольшие углы поворота колес и низкие скорости движения;
- не исследовано влияние изменения времени маневра и угла поворота управляемых

колес на вид и форму траектории движения различных точек машины;

– не учитывается боковое скольжение колес машины.

Необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований и теоретического описания процесса криволинейного движения по деформируемому основанию связана с тем, что боковой увод нарушает связь между направлением движения колесной машины и траекторией ее точек, что является причиной ухудшения устойчивости движения и управляемости в достаточно сложных условиях функционирования [9–11].

Отсюда следует вывод о необходимости разработки методики расчета бокового отклонения от фактической траектории при повороте на деформируемом основании, которая описывает колесную машину как единый объект, а не качение каждого колеса ввиду неоднозначности процессов, происходящих при этом. Необходимо также минимизировать или совсем исключить эмпирические коэффициенты и зависимости из-за высокой трудоемкости и больших материальных затрат при их определении, поскольку для этого нужно проведение экспериментальных исследований бокового увода всех применяемых типоразмеров шин, используемых при эксплуатации машины, при их качении в различных почвенных условиях.

Цель исследования – обосновать и разработать методику определения бокового отклонения от требуемой (теоретической) траектории при криволинейном движении колесной машины по деформируемому основанию.

Задачи исследования:

– экспериментальное определение координат действительной траектории движения трактора по деформируемому основанию;

– разработка методики ее аналитического представления;

– установление закономерностей изменения теоретической и действительной кривых траекторий поворота на различных его участках.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Актуальность поставленных задач наиболее очевидна для универсально-пропашных тракторов, у которых при выполнении сельскохозяйственных операций значительная часть времени рабочего цикла приходится на поворот, особенно на многоконтурных полях малых и средних размеров. При этом, как правило, трактор проходит следующие стадии поворота [12]: вход в поворот, установившийся поворот, выход из поворота. Очевидно, чтобы понять особенности криволинейного движения колесного трактора, необходимо исследовать его поведение на всех указанных этапах поворота.

Наиболее существенное боковое скольжение колесной машины происходит при входе в поворот, где сцепление колеса с почвой резко уменьшается, особенно с увеличением скорости движения. Вследствие разрушения колесом слоя почвы, находящегося в контакте, наблюдается одновременно с качением более интенсивное проскальзывание, в том числе в направлении оси трактора, т.е. возникает так называемый бульдозерный эффект [1, 12]. На этом участке поворота переменны и поступательная скорость движения машины, и угол поворота ее управляемых колес. Однако именно здесь формируется вид и характер изменения траектории на участке установившегося поворота, где стабилизируются указанные кинематические характеристики. Исследования движения эластичного колеса по деформируемому основанию при входе в поворот не проводилось. Теоретически полученные результаты без учета бокового увода и скольжения колес [13, 14] дают лишь возможность проводить оценку и сравнение различных типов колесных машин с изменением конструктивных и эксплуатационных параметров на стадии проектирования и имеют при этом достаточно большие расхождения с экспериментальными [1, 3, 8].

Анализ графиков изменения во времени частот вращения колес и крутящих моментов на колесах трактора при экспериментальном изучении криволинейного движения показал: характер их протекания

свидетельствует об ужесточении динамических процессов, что существенно ухудшает управляемость и устойчивость, вызывает боковое скольжение машины, способствует срыву почвенного слоя¹. Это также подтверждает вывод о том, что единый механико-математический аппарат для описания процесса качения каждого колеса в данном случае применять некорректно.

Элементы кругового беспетлевого поворота присутствуют в любом способе движения колесной машины. В связи с этим именно он является предметом настоящих исследований при выполнении его водителем в условиях реальной эксплуатации в отличие от методик испытаний при движении по заданной разметкой траектории и с закрепленным рулевым управлением [15].

Для определения координат точек действительной кривой траектории движения на опытных полях УНТЦ «Агротехнология» Воронежского ГАУ проведены экспериментальные исследования криволинейного движения универсально-пропашного колесного трактора класса 2 ЛТЗ-155 со всеми управляемыми и ведущими колесами и навесного машинно-тракторного агрегата на его базе. Предварительная подготовка почвы к испытаниям заключалась в выборе с помощью нивелира ровного, без явно выраженного микрорельефа горизонтального участка, который обрабатывали с целью получения свойств поверхности, соответствующего фону «поле, подготовленное под посев». Тип почвы – выщелоченный чернозем; ее исходные физико-механические характеристики определены контрольными замерами на основном участке поля и на поворотных полосах (см. таблицу).

Сущность предлагаемой методики заключается в следующем. Трактор или навесной агрегат на его базе устанавливали на выбранном участке поля. Отдельные повороты-заезды осуществлялись после разгона по прямой с последующим равномерным вращением рулевого колеса до упора направляющих колес (вправо или влево) – участок

«вход в поворот». Затем на участке установленного поворота происходило движение по дуге окружности постоянной кривизны с тем, чтобы продольная ось трактора повернулась на угол 180 град. от первоначального положения на участке разгона и вращением рулевого колеса в обратную сторону (выход из поворота) с целью выхода на прямолинейное движение.

Поворот как влево, так и вправо позволяет получить наиболее достоверные результаты, так как учитывает кинематическое отличие правого и левого поворотов трактора, а также продольный и поперечный уклон поля. Варьировались поступательная скорость движения трактора и угловая скорость поворота управляемых колес. Испытания проводили для одиночного трактора и навесного МТА различной комплектации.

В процессе испытаний регистрировали и записывали на ленту осциллографа следующие параметры: время опыта, частоту вращения путеизмерительного колеса, углы

Показатели влажности, твердости и плотности почвы опытного участка
Indicators of moisture, hardness and density of the soil

Показатель	На поворотной полосе	На основном массиве
<i>Влажность почвы (W, %) в слоях, см</i>		
0–10	15,5	18,4
10–20	19,9	22,3
20–30	20,5	22,4
<i>Плотность почвы (ρ, г/см³) в слоях, см</i>		
0–10	1,103	0,961
10–20	1,241	1,052
20–30	1,485	1,328
0–30	1,276	1,114
<i>Твердость почвы (T, МПа) на глубине, см</i>		
5	0,64	0,60
10	0,79	0,82
15	0,92	0,86
20	1,14	1,10
25	1,54	1,33
0–25	1,006	0,942

¹Беляев А.Н. Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колесных тракторов: дис. ... д-ра техн. наук. Мичуринск-наукоград, 2019. 440 с.

поворотов колес, курсовой угол движения, путь, поступательную скорость движения.

Мгновенный радиус кривизны траектории кинематического центра трактора определялся по выражению

$$R_i = \frac{l_{\text{tpi}}}{\beta_i},$$

где l_{tpi} – путь за время поворота остова трактора на курсовой угол β_i , м.

По текущим значениям l_{tpi} , R_i , β_i расчетом определялись абсциссы x_i и ординаты y_i траектории кинематического центра трактора.

В качестве усиливающей аппаратуры использованы преобразователь ПФ-6, в качестве преобразующей для регистрации сигналов – осциллограф К-12-22. Определение пути, пройденного агрегатом за время опыта, производили путеизмерительным колесом, оборудованным индукционным датчиком. Курсовой угол поворота продольной оси трактора измеряли с помощью аппаратуры, в состав которой входили гиropolукомпас ГПК-52 с преобразователем питающего напряжения ПАГ-125 и пульт управления ПУ-25. Углы поворота направляющих колес оценивали реохордными датчиками, установленными на ступицах переднего и заднего колеса трактора. Продолжительность опытов контролировали по меткам, оставленным на ленте осциллографа электродами ЭЧ-62.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Один из вариантов экспериментально полученных абсцисс (x) и ординат (y) кругового беспетлевого поворота при поступательной скорости движения $v = 1,67$ м/с, угловой скорости поворота передних управляемых колес $\omega_1 = 0,28$ 1/с, колее $B = 1,8$ м, продольной базе $L = 2,6$ м для одиночного трактора приведены на рис. 1, где точками отмечены собственно экспериментальные значения x и y траектории кривой поворота, а цифрой 1 обозначена кривая, являющаяся результатом нелинейной аппроксимации функцией

явного вида указанных экспериментальных данных^{2,3} с погрешностью $2 \cdot 10^{-3}$ м [12, 16]

$$y(x) = 4,75x^{0,27} - 0,06x^2 + 0,3x. \quad (1)$$

Следует отметить, что экспериментальные точки приведены для участка входа в поворот и части участка установившегося поворота, хотя экспериментальные исследования по определению траектории выполнялись на всех этапах поворота, но на рис. 1 точками отмечены результаты до поворота остова машины на 90 град. от исходной прямой траектории движения, так как для оставшихся правых участков считаем кривую траектории поворота идентичной соответствующим левым участкам.

Радиус кривизны любой кривой, имеющий вид (см. сноску 3)

$$\rho(x) = [1 + y'(x)^2]^{1,5} / y''(x), \quad (2)$$

для функции траектории (1) вычисляется согласно выражению (см. сноску 2)

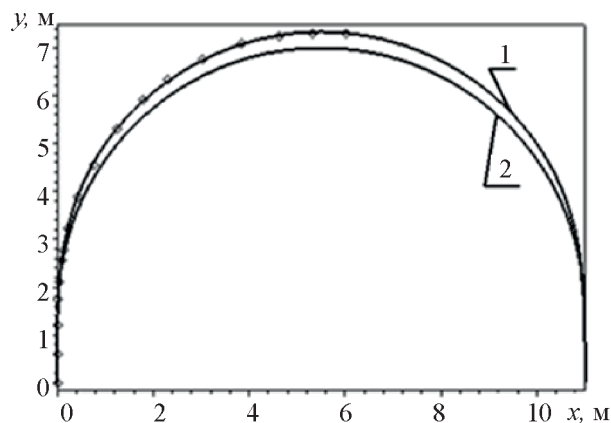


Рис. 1. Траектории поворота трактора:

◇ – экспериментальные точки траектории поворота;
1 – график аппроксимирующей функции экспериментальных точек траектории поворота;
2 – график теоретической функции траектории поворота

Fig. 1. Tractor turning trajectories:

◇ – experimental points of the turning trajectory;
1 – graph of the approximating function of the experimental points of the turning trajectory;
2 – graph of the theoretical function of the turning trajectory

²Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. М.: ДМК-Пресс, 2011. 800 с.

³Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры. М.: ДМК-Пресс, 2009. 1264 с.

$$\rho(x) = [1 + (1,282/x^{0,73} - 0,12x + 0,3)^2]^{1,5} / (-0,936/x^{1,73} - 0,12), \quad (3)$$

график которого изображен на рис. 2.

Средний радиус кривизны функции согласно (2) вычисляется по формуле (см. сноску 3)

$$\rho_{sr} = \frac{1}{l} \int_0^l \rho(x) dx, \quad (4)$$

где l – длина участка осреднения.

При анализе функции (1) с учетом (3) и (4) получен ее средний радиус кривизны $\rho = 5,48$ м (см. рис. 2).

Для описания теоретической кривой траектории, соответствующей идентичным исходно-начальным параметрам экспериментальным условиям, используем кусочно-гладкую функцию $y = f(x)$ вида (см. сноску 2)

$$f(x) = \begin{cases} p(v)x^q, & x \leq x_Q, \\ \sqrt{R_T^2 - \left(x - x_Q - \frac{R_T p(v) q \cdot x_Q^{q-1}}{\sqrt{1 + (p(v) q \cdot x_Q^{q-1})^2}} \right)^2} + p(v) \cdot x_Q^q - \frac{R_T}{\sqrt{1 + (p(v) q \cdot x_Q^{q-1})^2}}, & x > x_Q, \end{cases} \quad (5)$$

где p и q – вполне определенные постоянные, $0 < q < 1$; v – поступательная скорость движения машины, м/с; R_T – теоретический минимальный радиус поворота, м; x – текущая абсцисса кривой траектории поворота, м; x_Q – абсцисса кривой траектории поворо-

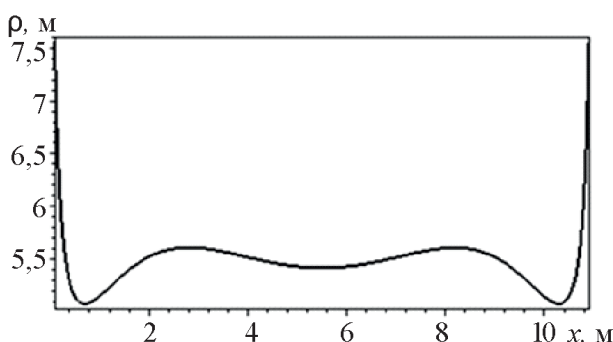


Рис. 2. График радиуса кривизны аппроксимирующей функции экспериментальных точек траектории поворота

Fig. 2. Graph of the radius of curvature of the approximating function of the experimental points of the rotation trajectory

та, соответствующая концу участка входа в поворот, м.

Ввиду бокового увода и скольжения трактора теоретическая кривая (4) располагается ниже опытных точек и их функции.

Теоретическая функция (см. рис. 1, кривая 2) подвергается корректировке, заключающейся в том, что ординаты ее точек на участке входа в поворот сдвигаются на некоторую положительную величину, и на это же значение увеличивается теоретический минимальный радиус установившегося участка поворота.

Так как указанное смещение для рассматриваемого случая составляет 0,4 м, то функция (5) примет следующий вид (см. сноску 2)

$$y(x) = \begin{cases} 4,45 \cdot x^{0,333} + 0,4, & x > 0,25 \\ \sqrt{29,8 - (x - 5,25)^2} + 1,9, & x > 0,25 \end{cases} \quad (6)$$

При этом установлено, что величина сдвига практически равна разнице между экспериментальным минимальным радиусом поворота – 5,48 м (см. рис. 2) и теоретическим минимальным радиусом поворота – 5,061 м. График функции (6) практически совпал с кривой 1 на рис. 1 ввиду того, что действительный теоретический и экспериментальный радиусы поворота отличаются на 0,019 м, или 0,35%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имея теоретическую траекторию движения и величину бокового отклонения (сдвига) с очень высокой степенью точности получаем действительную, близкую к фактической траекторию, определив экспериментально лишь величину действительного минимального радиуса поворота. При этом для получения действительной аналитической траектории и апробации предлагаемой методики определения бокового отклонения колесной машины необходимо вычислить величину бокового сдвига, которая является разностью между действительным минимальным и теоретическим минимальным радиусами поворота. Поскольку при этом

выявлены некоторые закономерности зависимости величин бокового отклонения от скорости движения, то вполне вероятно его получение аналитическим путем, что является предметом отдельных исследований.

С помощью аналитической действительной траектории возможно исследовать движение колесной машины по заданной траектории с использованием формул прямого расчета, что является более простой и менее трудоемкой операцией в сравнении с математическим моделированием сложного и неоднозначного процесса [2, 6, 7]. В результате математического моделирования также приходится делать множество упрощений и допущений, что снижает точность результатов и нередко приводит к адекватным решениям лишь в частных случаях.

Так как устойчивость движения большинства колесных машин определяет качество выполняемых технологических операций, то для обеспечения оптимальных критериев протекания процесса необходимо определение диапазонов скоростей их движения. Проведенные исследования позволяют также разработать метод расчета, способствующий повышению качества технологического процесса как путем улучшения конструкций машин, так и путем выбора оптимальных эксплуатационных характеристик. В результате исследования движения по известной траектории возможно установить для различных условий и разных колесных машин ограничения на величины возможных внешних возмущений и изменений внутренних свойств системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трояновская И.П.* Механика криволинейного движения тракторных агрегатов: монография. Челябинск: Издательство Челябинского ГАУ. 2009. 152 с.
2. *Носков Н.К., Трояновская И.П., Титов С.А.* Математическая модель силового взаимодействия колеса с грунтом при повороте машины // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2017. Т. 17. № 3. С. 5–15. DOI: 10.14529/engin170301.
3. *Трояновская И.П.* Анализ развития теорий поворота колесных машин // Вестник машиностроения. 2010. № 1. С. 92–96.
4. *Вольская Н.С., Игнатушин А.П.* Модель поворота многоосной колесной машины на грунте // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2005. № 4. С. 81–91.
5. *Жилейкин М.М.* Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твердым опорным основанием // Известия высших учебных заведений. Сер. «Машиностроение». 2021. № 10. С. 3–15.
6. *Носков Н.К., Позин Б.М., Трояновская И.П.* Математическая модель бокового увода трактора // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. № 1 (31). С. 35–39.
7. *Шухман С.Б., Соловьев В.И.* Математическая модель криволинейного движения колеса по грунту // Известия высших учебных заведений. Сер. «Машиностроение». 2012. № 8. С. 24–31.
8. *Трояновская И.П.* Ошибки при описании силового взаимодействия колеса с грунтом на повороте // Автомобильная промышленность. 2009. № 8. С. 17–19.
9. *Жилейкин М.М.* Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твердым опорным основанием // Известия высших учебных заведений. Сер. «Машиностроение». 2021. № 10. С. 3–15.
10. *Жилейкин М.М., Скотников Г.И.* Разработка принципов повышения устойчивости движения многосвязных тракторных поездов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2015. № 10. С. 19–23.
11. *Жилейкин М.М., Шинкаренко В.А.* Качественный анализ методов повышения управляемости и устойчивости колесных машин // Известия высших учебных заведений. Сер. «Машиностроение». 2015. № 1. С. 42–48.
12. *Беляев А.Н., Шацкий В.П., Тришина Т.В., Шередекин В.В., Высоцкая И.А.* Оценка эффективности применения комбинированного способа поворота трактора // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13. № 2 (65). С. 39–48. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.2.39.
13. *Гладов Г.И.* Параметры криволинейного движения специальных транспортных средств // Автомобильная промышленность. 2017. № 5. С. 22–23.
14. *Шумилин А.В., Володин А.Н.* Метод определения характеристик поворота транспортного средства на недеформируемом осно-

- вании // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1993. № 8. С. 17–19.
15. Амосов А.Г. Алгоритм построения геометрии движения специальных транспортных средств // Программные системы и вычислительные методы. 2019. № 4. С. 20–29. DOI: 10.7256/2454-0714/2019/4/30842.
16. Сиротин П.В., Жилейкин М.М. Исследование динамики движения зерно- и кормоуборочных комбайнов методами математического и имитационного моделирования // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2019. № 1. С. 53–59.
- ## REFERENCES
1. Troyanovskaya I.P. Mechanics of curvilinear motion of tractor units. Chelyabinsk: Chelyabinsk State Agrarian University Publishers. 2009. 152 p. (In Russian).
 2. Noskov N.K., Troyanovskaya I.P., Titov S.A. Mathematical model of force interactions wheel ground when the machine turns. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 5–15. (In Russian). DOI: 10.14529/engin170301.
 3. Troyanovskaya I.P. Analysis of development of swivel theory of the wheel machines. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 2010, no. 1, pp. 92–96. (In Russian).
 4. Vol'skaya N.S., Ignatushin A.P. Model of multi-axle wheeled vehicle turning on the ground. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Mashinostroyeniye» = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2005, no. 4, pp. 81–91. (In Russian).
 5. Zhileikin M.M. Research of self-oscillating processes in the zone of interaction of an elastic tire with a solid support base. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ser. «Mashinostroyeniye» = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10, pp. 3–15. (In Russian).
 6. Noskov N.K., Pozin B.M., Troyanovskaya I.P. Mathematical model of the lateral traction of the tractor. *Izvestiya MGTU «MAMI» = Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2017, no. 1 (31), pp. 35–39. (In Russian).
 7. Shukhman S.B., Solov'ev V.I. Mathematical model of curvilinear motion of wheels on the ground. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ser. «Mashinostroyeniye» = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2012, no. 8, pp. 24–31. (In Russian).
 8. Troyanovskaya I.P. Errors in the description of the force interaction of the wheel with the ground on a turn. *Avtomobil'naya promyshlennost' = Car Industry*, 2009, no. 8, pp. 17–19. (In Russian).
 9. Zhileikin M.M. Research of self-oscillating processes in the zone of interaction of an elastic tire with a solid support base. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ser. «Mashinostroyeniye» = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10, pp. 3–15. (In Russian).
 10. Zhileikin M.M., Skotnikov G.I. Development of principles for improvement of motion stability of multi-unit tractor trains. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*, 2015, no. 10, pp. 19–23. (In Russian).
 11. Zhileikin M.M., Shinkarenko V.A. Qualitative analysis of the methods of improving the controllability and stability of wheeled vehicles. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ser. «Mashinostroyeniye» = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2015, no. 1, pp. 42–48. (In Russian).
 12. Belyaev A.N., V.P. Shatskii, T.V. Trishina, Sheredekin V.V., Vysotskaya I.A. Assessment of feasibility of the combined method of the tractor steering motion. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*, 2020, vol. 13, no. 2 (65), pp. 39–48. (In Russian). DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.2.39.
 13. Gladov G.I. Parameters of curvilinear movement of special vehicles. *Avtomobil'naya promyshlennost' = Car industry*, 2017, no. 5, pp. 22–23. (In Russian).
 14. Shumilin A.V., Volodin A.N. Method for determining the characteristics of vehicle turning on a non-deformable base. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*, 1993, no. 8, pp. 17–19. (In Russian).
 15. Amosov A.G. Algorithm for constructing the geometry of movement of special vehicles. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody = Software systems and computational methods*, 2019, no. 4, pp. 20–29. (In Russian). DOI: 10.7256/2454-0714/2019/4/30842.
 16. Sirotnin P.V., Zhileikin M.M. Research of dynamics of movement of grain and forage harvesters by methods of mathematical and imitating modeling. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*, 2019, no. 1, pp. 53–59. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Беляев А.Н.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой; **адрес для переписки:** Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, 1; e-mail: aifkm_belyaev@mail.ru

Шацкий В.П., доктор технических наук, заведующий кафедрой

Гулевский В.А., доктор технических наук, профессор

Тришина Т.В., кандидат технических наук, доцент

AUTHOR INFORMATION

✉ **Alexandr N. Belyaev**, Doctor of Science in Engineering, Department Head; **address:** 1, Michurina St., Voronezh, 394087, Russia; e-mail: aifkm_belyaev@mail.ru

Vladimir P. Shatsky, Doctor of Science in Engineering, Department Head

Vyacheslav A. Gulevsky, Doctor of Science in Engineering, Professor

Tatyana V. Trishina, Candidate of Science in Engineering, Associate Professor

Дата поступления статьи / Received by the editors 25.04.2022

Дата принятия к публикации / Accepted for publication 26.07.2022

Дата публикации / Published 26.09.2022