

УДК 621.879

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-320-329>

EDN: OQYCTB

Научная статья



## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВОРОТА ДОРОЖНОГО КАТКА

М. Н. Артеменко<sup>1</sup>, П. А. Корчагин<sup>2</sup>, И. А. Тетерина<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Сотое военное представительство, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),  
г. Омск, Россия

suhov1425@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0596-3888>,

korchagin\_pa@mail.ru, <http://orcid.org/0000-001-8936-5679>,

iateterina@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8012-8511>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В основе создания и совершенствования роботизированных строительно-дорожных машин и комплексов лежат методы математического моделирования, использование которых правомерно как при разработке самих машин, так и математических моделей, описывающих процессы поворота и определяющих движение машины по заданной траектории.

**Методы исследования.** В статье представлена обобщенная расчетная схема поворота дорожного трехосного катка, отражающего его основные геометрические и кинематические характеристики. На основе расчетной схемы составлена математическая модель поворота катка. В результате разработанной математической модели в программном продукте MATLAB построен программный код, который лег в основу теоретических исследований, позволивших в полной мере изучить влияние конструктивных и эксплуатационных параметров машины на траекторию движения и точность позиционирования.

**Результаты.** Получены расчетные зависимости, позволяющие определить влияние таких параметров, как скорость движения дорожного катка, угловая скорость поворота вальца на дистанцию перестроения на параллельный курс и на величину смещения поворотного вальца, то есть на траекторию движения и точность позиционирования строительно-дорожной машины.

**Обсуждение и заключение.** На основе расчетной схемы составлена математическая модель поворота катка, в результате которой проведены исследования, направленные на изучение влияния конструктивных и эксплуатационных параметров машины на траекторию движения дорожного катка и точность его позиционирования на строительной площадке при выполнении технологических операций.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дорожный каток, дорога, управление курсом, навигация, беспилотный автомобиль, модель поворота.

Статья поступила в редакцию 04.03.2022; одобрена после рецензирования 22.03.2022; принята к публикации 10.06.2022.

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: Артеменко М. Н. Результаты теоретических исследований математической модели поворота дорожного катка / М. Н. Артеменко, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 3(85). С. 320-329. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-320-329>

© Артеменко М. Н., Корчагин П. А., Тетерина И. А., 2022



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-320-329>

EDN: OQYCTB

Original article

## THEORETICAL STUDIES RESULTS FOR A MATHEMATICAL MODEL OF A ROAD ROLLER TURN

Maxim N. Artemenko<sup>1</sup>, Pavel A. Korchagin<sup>2</sup>, Irina A. Teterina<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>100<sup>th</sup> Military Representation, Omsk, Russia

<sup>2</sup>Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

suhov1425@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0596-3888>,

korchagin\_pa@mail.ru, <http://orcid.org/0000-001-8936-5679>,

iateterina@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8012-8511>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** At the heart of the creation and improvement of robotic road construction machines and complexes are mathematical modelling methods, the use of which is justified both in the development of the machines themselves and mathematical models that describe the turning processes and determine the movement of the machine along a given trajectory.

**The method of research.** The article presents a generalized design scheme for the rotation of a three-axle road roller, which reflects its main geometric and kinematic characteristics. On the basis of the design scheme, a mathematical model of the rotation of the skating rink was compiled. As a result of the developed mathematical model, a program code was built in the MATLAB software product, which formed the basis of theoretical studies that made it possible to fully study the influence of the design and operational parameters of the machine on the motion trajectory and positioning accuracy.

**Results.** The calculated dependencies have been obtained to determine the influence of such parameters as the speed of the road roller, the angular speed of the drum rotation on the distance of rebuilding on a parallel course and on the displacement of the rotary drum, that is, on the trajectory and positioning accuracy of the road-building machine.

**Conclusion.** On the basis of the design scheme, a mathematical model of the rotation of the roller was compiled, as a result of which studies were carried out aimed at studying the influence of the design and operational parameters of the machine on the trajectory of the road roller and the accuracy of its positioning on the construction site when performing technological operations.

**KEYWORDS:** road roller, road, course management, navigation, unmanned vehicle, turn model.

The article was submitted 04.03.2022; approved after reviewing 22.03.2022; accepted for publication 10.06.2022.

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: Artemenko M. N., Korchagin P. A., Teterina I. A. Theoretical studies results for a mathematical model of a road roller turn. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (3): 320-329. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-320-329>

© Artemenko M. N., Korchagin P. A., Teterina I. A., 2022



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

## ВВЕДЕНИЕ

Модернизация производства, как и внедрение новых технологий в производственные процессы, подразумевает их массовую роботизацию. Экономическая эффективность этого процесса давно подтверждена опытом ведущих промышленно развитых стран, таких как Южная Корея, США, Япония, Великобритания [1].

Одним из направлений роботизации дорожного строительства является создание роботизированных строительно-дорожных машин. В качестве положительных моментов в работе предусматривается увеличение производительности, повышение качества работ и снижение эксплуатационных расходов.

К работам по строительству дорожного полотна, как и к качеству их выполнения, предъявляются высокие требования. Причем все виды рабочих операций, выполняемых строительно-дорожной техникой, жестко обусловлены технологиями строительства дорожных оснований и закреплены в нормативно-технической документации. Как правило, эти требования сводятся к выполнению и повторению типовых прямолинейных и (или) криволинейных движений, проходов по одному и тому же маршруту, по параллельным, пересекающимся или замкнутым маршрутам в строго ограниченных условиях строительной площадки<sup>1</sup> [2].

В качестве примера можно привести технологические операции дорожных катков по уплотнению асфальтобетонных смесей, когда высокое качество работ достигается исключительно за счет строго регламентированного количества проходов [3, 4]. На рисунке 1 представлена челночная схема с неоднократным проходом по одному маршруту и общий вид дорожного катка ДУ-107.

Выполнение таких технологических операций связано с трудностями из-за отсутствия встроенных в машину систем управления. Для функционирования таких систем необходимы адекватные математические модели как самих дорожно-строительных машин, так и процессов их поворота [5].

Практические задачи, связанные с выбором оптимальных конструктивных и эксплуатационных параметров, оказывающих существенное влияние на траекторию движения и точность позиционирования машины в ходе выполнения технологических операций, не решаются аналитическим путем. Этим обусловлена необходимость проведения численного моделирования, которое подразумевает создание математической модели движения изучаемой системы, в том числе модели поворота машины и дальнейшее ее исследование с использованием численных методов, которые можно реализовать на компьютере<sup>1</sup> [4].

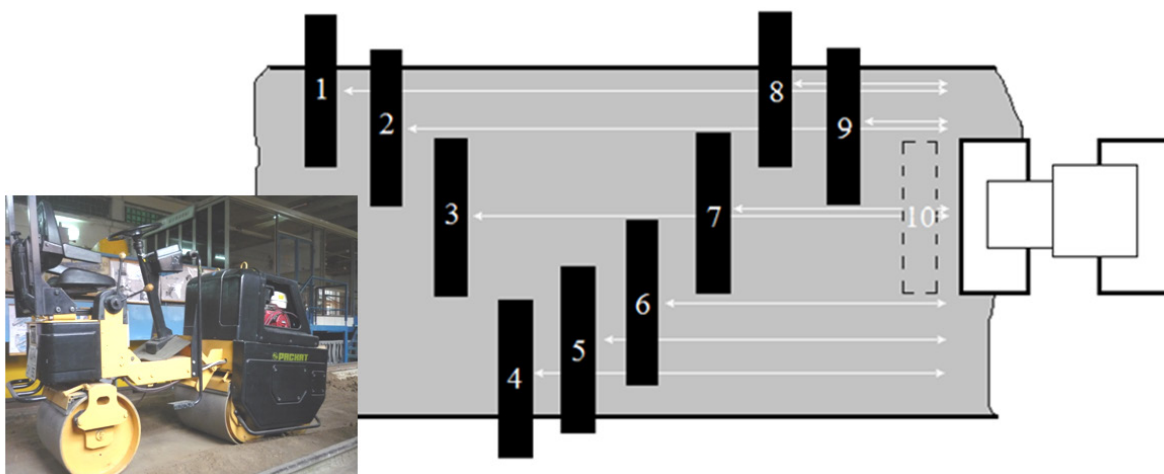


Рисунок 1 – Схема движения катка при выполнении работ по уплотнению асфальтобетонной смеси [2]

Figure 1 – Movement scheme of the road roller during the work for compaction of asphalt concrete mix [2]

<sup>1</sup> Денисова Л. А., Мещеряков В. А., Карабцов Р. Д. Разработка системы управления: моделирование, оптимизация и анализ устойчивости // IV Международная научно-техническая конференция: Проблемы машиноведения. 2020. С. 319–326.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

При криволинейном движении мобильных машин можно выделить два режима поворота: с большими радиусами и большими скоростями движения – он характеризует управляемость; с малыми радиусами и невысокими скоростями движения – он характеризует маневренность. Первый режим характерен для строительных и коммунальных машин, созданных на базе грузовых автомобилей. Для дорожных катков целесообразно рассматривать только второй режим поворота [6, 7].

При составлении математической модели поворота катка были приняты следующие допущения:

1. Ввиду малой рабочей скорости движения (менее 1 м/с) режим характеризуется отсутствием центробежной силы, отсутствием или крайне незначительным боковым ускорением. Такой процесс можно рассматривать как статический<sup>2</sup> [8].

2. Вальцы машины недеформируемые, абсолютно жесткие. Таким образом, отсутствуют боковые уводы опорных поверхностей вальцов.

3. Люфты в шарнирах отсутствуют.

4. Элементы конструкции представлены как абсолютно жесткие тела.

5. Система голономна и стационарна.

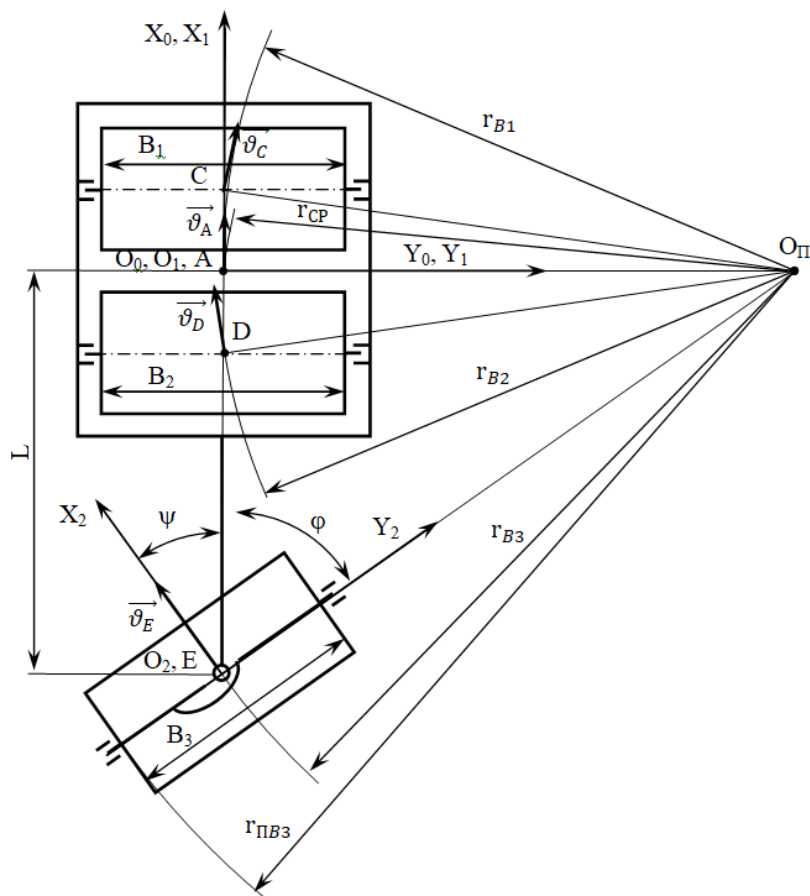


Рисунок 2 – Расчетная схема поворота катка  
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Calculation scheme for a road roller turn  
Source: compiled by the authors.

<sup>2</sup> Артемьев К. А., Алексеев Т. В., Белокрылов В. Г. и др. Дорожные машины: в 2-х частях. Ч. II. Машины для устройства дорожных покрытий. М.: Машиностроение, 1982. 396 с.

На рисунке 2 представлена расчетная схема поворота катка. Криволинейное движение дорожного катка как механической системы может быть определено траекторией движения центра масс первого звена – точки А.

Направление скорости точки А будет совпадать с направлением продольной оси машины  $O_1X_1$  и будет равно

$$v_A = (v_C + v_D)/2. \quad (1)$$

Точка  $O_{II}$  пересечения перпендикуляров к направлениям скоростей точек  $\vec{v}_A$  и  $\vec{v}_E$  является мгновенным центром поворота [9].

Особенностью поворота трехосного катка (с расстановкой по базе: два передних неповоротных вальца и один поворотный задний валец) является расположение  $O_{II}$  на продолжении оси, перпендикулярной центру межосевого интервала неповоротных вальцов на продольной оси машины.

Центр масс первого звена, точка  $O_1$  движется по окружности радиусом  $r_{CP}$ , точка  $O_2$  – по окружности радиусом  $r_{B3}$ . Радиусы поворота первого и второго неповоротного вальцов обозначены как  $r_{B1}$  и  $r_{B2}$  соответственно.

Средний радиус поворота неповоротных вальцов равен

$$r_{CP} = Ltg\psi, \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние между точками  $O_1$  и  $O_2$ .

Поскольку  $\psi = 90^\circ - \varphi$ , то средний радиус поворота может быть найден, как

$$r_{CP} = Lctg\varphi, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол поворота оси  $O_2X_2$  относительно оси  $O_1X_1$ .

Радиус поворота поворотного вальца  $r_{B3}$  будет равен

$$r_{B3} = \frac{L}{\cos\varphi} = \frac{L}{\sin\psi}. \quad (4)$$

Максимальный радиус смещения поворотного вальца равен

$$r_{B3} = r_{B3} + 0,5B_3, \quad (5)$$

где  $B_3$  – ширина поворотного вальца.

Подставим выражение (4) в формулу (5) и получим

$$r_{B3} = \frac{L}{\cos\varphi} + 0,5B_3 = \frac{L}{\sin\psi} + 0,5B_3. \quad (6)$$

Траектория движения точек С и D, лежащих на осях неповоротных вальцов, может быть определена по теореме Пифагора

$$r_{B1} = \sqrt{(AC^2 + (L \cdot tg\psi)^2)}; \quad (7)$$

$$r_{B2} = \sqrt{(AD^2 + (L \cdot tg\psi)^2)}. \quad (8)$$

Угол поворота поворотного вальца зависит от угла поворота руля и может быть определен как

$$\varphi_{PK} = \frac{\psi}{U_{PK}}, \quad (9)$$

где  $U_{PK}$  – передаточное отношение рулевого механизма катка.

Математическая модель поворота катка, составленная на основе представленной расчетной схемы, была реализована в программном продукте MATLAB. Программный продукт обладает большим набором встроенных функций для расчета и анализа различного рода данных и благодаря пакетам расширения дает возможность проводить математическое моделирование<sup>3</sup> [10].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретические исследования направлены на получение характеристик о траектории перестроения катка при движении с постоянной скоростью и в случае перестроения при трогании с места. Цель исследования заключалась в определении зависимости влияния скорости движения дорожного катка и угловой скорости поворота вальца на дистанцию перестроения, а также выявлении влияния угловой скорости вальца на его смещение при перестроении на параллельный курс.

На рисунке 3 представлена траектория движения переднего (А) и заднего (В) вальцов для двух вариантов: 1 – перестроение при движении машины с постоянной скоростью; 2 – перестроение при трогании машины с места.

Сравнительный анализ зависимости траектории движения для перестроения при движении машины с постоянной скоростью и перестроения при трогании машины с места позволяет сделать вывод, что величина дис-

<sup>3</sup> Андрейченко Д. К., Чусов Ю. В., Кононов В. В. Основы работы в системе Matlab. Саратов. 2012. 110 с.



танции перестроения на параллельный курс ( $x'_n$ ) и величина смещения поворотного вальца при перестроении ( $\Delta y$ ) зависят от начальной скорости движения дорожного катка [11, 12].

В результате анализа нормативных документов, определяющих правила технологии уплотнения дорожных покрытий и устанавливающих, во избежание сдвига уплотняемого материала, недопустимость резких поворотов и перестроений, был установлен диапазон скорости поворота вальца ( $\dot{\varphi}$ ), обеспечивающий работу системы управления и выполнение поставленных задач. Угловая скорость

поворота поворотного вальца, не допускающая сдвиг уплотняемого материала, должна лежать в диапазоне 6–18 град/с. Именно этот диапазон использовался при исследовании влияния скорости поворота поворотного вальца на величину дистанции перестроения ( $x'_n$ ) и величину смещения поворотного вальца ( $\Delta y$ ).

На рисунках 4 и 5 представлены графики, отражающие зависимость траектории движения машины и, как следствие, значение длины дистанции перестроения ( $x'_n$ ) уплотняющего катка и величины смещения поворотного вальца от угловой скорости поворота вальца.

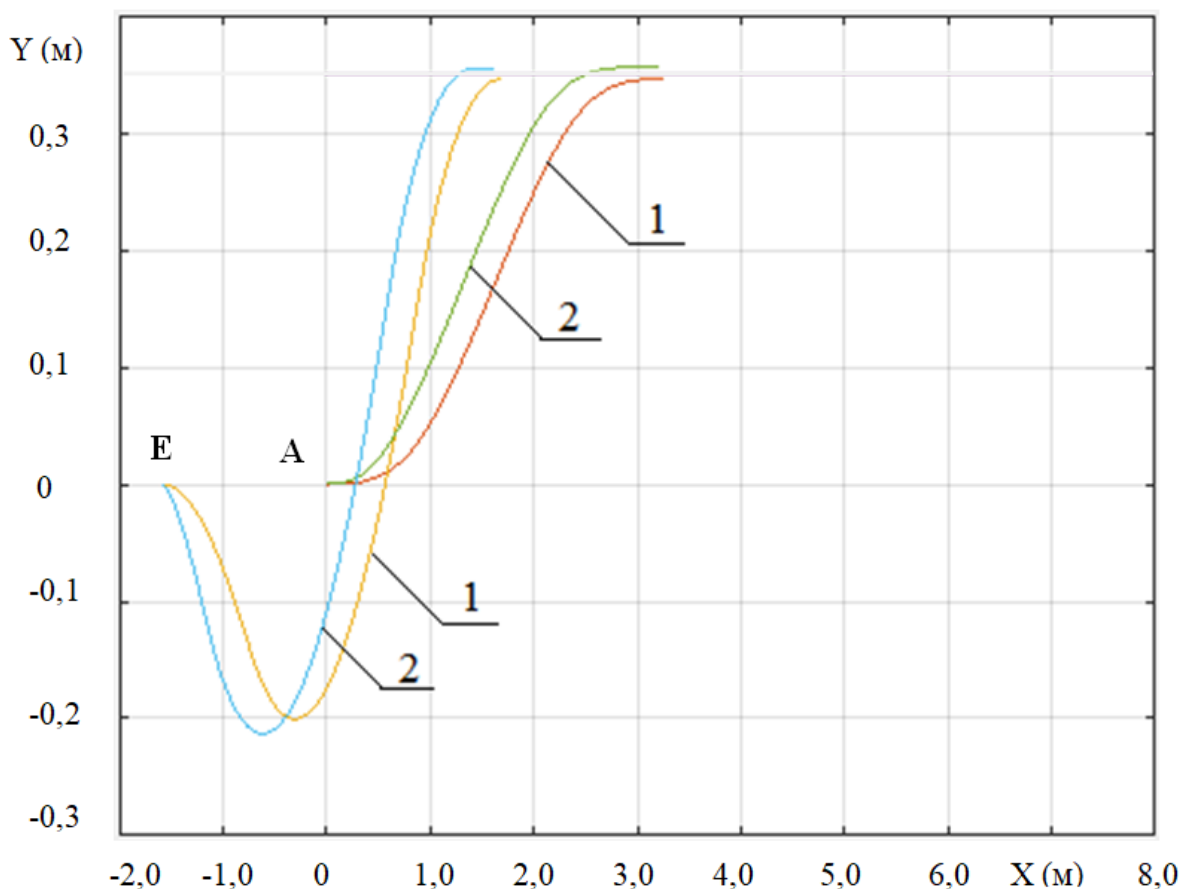


Рисунок 3 – Траектория движения переднего и заднего вальцов дорожного катка при перестроении:  
1 – движение с постоянной скоростью;  
2 – при трогании машины с места  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The trajectory of the front and rear rollers of the road roller when changing lanes:  
1 – movement at a constant speed;  
2 – when starting the machine from a place  
Source: compiled by the authors.

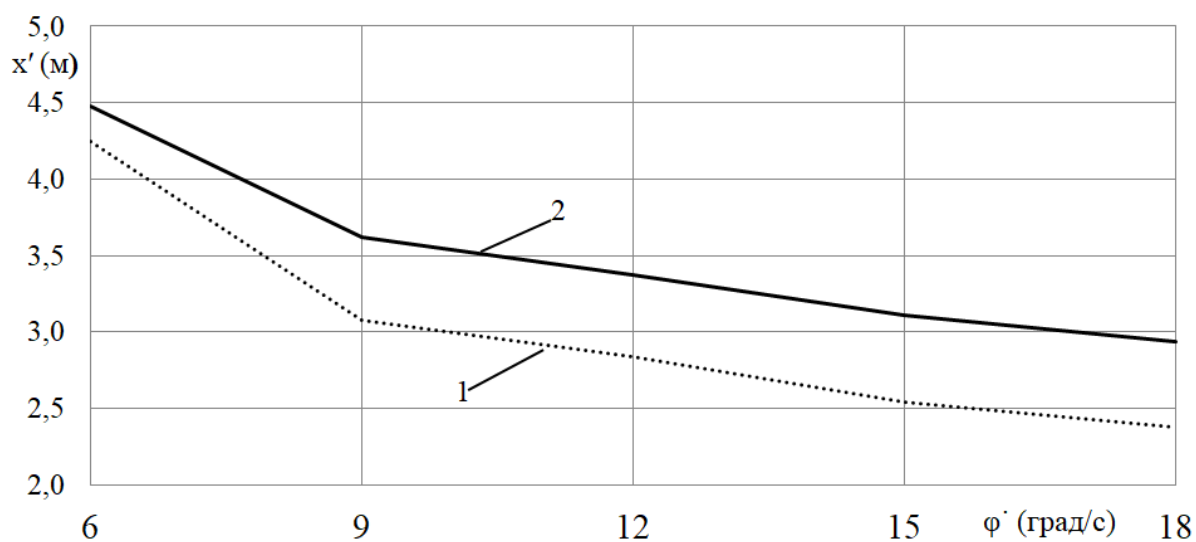


Рисунок 4 – Зависимость дистанции перестроения на параллельный курс от угловой скорости поворота вальца:  
1 – движение с постоянной скоростью; 2 – трогание с места  
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of the distance of rebuilding on a parallel course on the angular speed of the drum rotation:  
1 – movement at a constant speed, 2 – starting off  
Source: compiled by the authors.

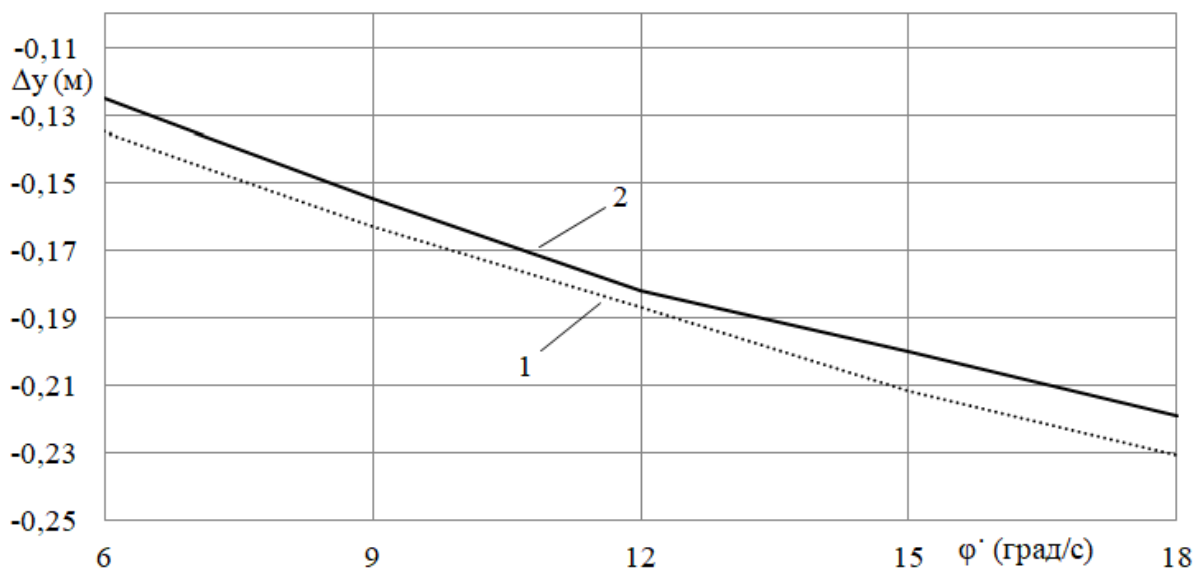


Рисунок 5 – Зависимость смещения поворотного вальца от угловой скорости поворота вальца:  
1 – движение с постоянной скоростью; 2 – трогание с места  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The dependence of the displacement of the rotary roller on the angular velocity drum rotation:  
1 – movement at a constant speed, 2 – starting off  
Source: compiled by the authors.

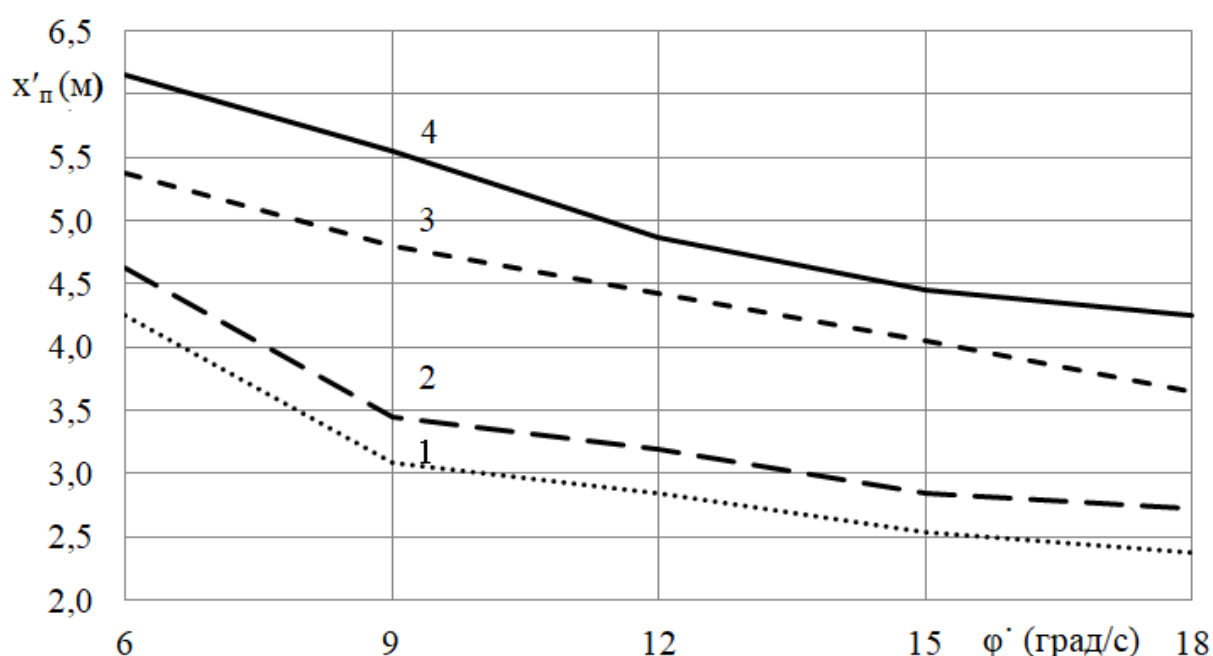


Рисунок 6 – Зависимость дистанции перестроения на параллельный курс от скорости рабочего и транспортного режимов: 1–2 км/ч; 2–3 км/ч; 3–5 км/ч; 4–7 км/ч  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of the distance of rebuilding on a parallel course on the speed of working and transport modes: 1–2 km/h; 2–3 km / h; 3–5 km / h; 4–7 km/h  
Source: compiled by the authors.

Полученные графические зависимости позволили сделать вывод, что на участках 6–9 град/с, 9–12 град/с, 15–18 град/с зависимость дистанции перестроения от угловой скорости поворотного вальца носит линейный характер [13]. Наиболее существенное влияние на дистанцию перестроения оказывает изменение угловой скорости поворотного вальца в диапазоне от 6 до 9 град/с.

В диапазоне 15–18 град/с изменение угловой скорости поворота поворотного вальца оказывает несущественное влияние на дистанцию перестроения. Дистанция перестроения в этом случае уменьшается на 5,3%.

При движении катка с постоянной скоростью, при угловой скорости от 9 до 18 град/с, дистанция перестроения машины на параллельный курс в среднем на 5,5% больше, чем при трогании с места.

На рисунке 6 представлены зависимости дистанции перестроения на параллельный курс ( $x'_п$ ) от скорости рабочего и транспортного режимов  $V$ .

На графике наглядно видна прослеживаемая прямая зависимость траектории движе-

ния машины, дистанции перестроения от скорости движения машины и скорости поворота поворотного вальца. [14, 15]. Так, при уменьшении скорости движения дорожного катка  $V$  при равных значениях скорости поворота вальца происходит сокращение дистанции перестроения на параллельный курс  $x'_п$ . При равных значениях скорости движения дорожного катка  $V$  увеличение значений скорости поворота вальца также приводит к сокращению дистанции перестроения на параллельный курс  $x'_п$ .

## ВЫВОД

На основе составленной математической модели поворота дорожного катка были проведены теоретические исследования, которые позволили изучить влияние эксплуатационных параметров (скорость движения дорожного катка и угловая скорость поворота вальца) на дистанцию перестроения на параллельный курс и величину смещения поворотного вальца, то есть на траекторию движения и точность позиционирования машины [16, 17].



В результате проведенных исследований сделан вывод о целесообразности выбора угловой скорости поворота поворотного вальца до 15 град/с. Дальнейшее увеличение угловой скорости поворота вальца несущественно уменьшает дистанцию перестроения, но может привести к сдвигу уплотняемого материала.

Кроме этого, был сделан вывод, что для сокращения дистанции перестроения оптимальным является режим движения дорожного катка с наименьшей скоростью, но с наибольшей скоростью поворота поворотного вальца.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пелевин Е. Е., Цудиков М. Б. Экономическая эффективность роботизации различных типов производства // *Juvenis scientia. Экономические науки*. 2017. № 6. С. 13–17.
2. Савельев С. В., Пермьяков В. Б., Михеев В. В., Потеряев И. К. Инновационные решения для повышения эффективности дорожно-строительной уплотняющей техники // *Мир транспорта и технологических машин*. 2017. № 2 (57). С. 51–59.
3. Савельев С. В., Потеряев И. К. Исследования эффективности уплотняющей техники для строительства автомобильных дорог // *Строительные и дорожные машины*. 2021. № 2. С. 44–48.
4. Захаренко А. В., Пермьяков В. Б., Карпухин И. В. Определение требуемого числа проходов дорожного катка // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2004. № 5 (545). С. 90–92.
5. Сухарев Р. Ю. Математические модели процессов поворота колесных дорожно-строительных машин // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2021. № 3. С. 259–269.
6. Korchagin P. A., Teterina I. A., Korchagina E. A. Road roller operator's vibroprotection system improvement. *Journal of Physics: Conference Series* 2021. 1791 (1), ст. 012012. DOI 10.1088/1742-6596/1791/1/012012
7. Sukharev R. Yu. Trajectory plotting algorithm for a self-driving road grader // *Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Automatics and Energy. ICAE 2021*. 2021. С. 012181.
8. Emelyanov R. T., Prokopen A. P., Vasiliev Y. V., Perebeynos D. I., Novruzov V. S. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1889(4), 042059. DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.
9. Носков Н. К., Трояновская И. П., Титов С. А. Математическая модель силового взаимодействия колеса с грунтом при повороте машины // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2017. Т. 17. № 3. С. 5–15.
10. Руппель Е. Ю., Корчагин П. А., Тетерина И. А., Корчагина Е. А. Математическое описание дорожного вибрационного катка // *Строительные и дорожные машины*. 2020. № 10. С. 1–17.
11. Denisova L. A., Meshcheryakov V. A. Control systems design: the technology of simulation and optimization. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. С. 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032011
12. Stawowiak M., Kuczaj M. Problematics of Reliability of Road Rollers. *Management Systems in Production Engineering*. 2018. 26 (2). pp. 124–128. DOI 10.2478/mspe-2018-0020
13. Tong X., Siwei C., Dong W. Ti W., Yang X., Weigong Z. A Novel Path Planning Method for Articulated Road Roller Using Support Vector Machine and Longest Accessible Path with Course Correction. *IEEE Access*. 2019. 7, 8932491. pp. 182784–182795 DOI 10.1109/ACCESS.2019.2959346
14. Каразин В. И., Хисамов А. В. Разработка систем автопилотирования транспортными средствами // *Теория механизмов и машин*. 2019. Т. 17, № 4 (44). С. 149–157.
15. Артеменко М. Н., Корчагин П. А., Тетерина И. А. Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. Опыт отечественных и зарубежных производителей // *Вестник СибАДИ*. 2019; 16(4):416–430. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-4-416-430>.
16. Кондаков С. В., Харлапанов Д. В., Вансович Е. И. Достоверность моделей описания сопротивления повороту быстроходной гусеничной машины // *Вестник машиностроения*. 2015. № 10. С. 3–7.
17. Титов С. А., Трояновская И. П., Носков Н. К. Обобщенная модель стационарного поворота произвольного транспортного средства // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2017. Т. 17, № 4. С. 38–47.

### REFERENCES

1. Pelevin E. E., Cudikov M. B. Jekonomicheskaja jeffektivnost' robotizacii razlichnyh tipov proizvodstva // *Juvenis scientia. Jekonomicheskie nauki*. 2017; 6: 13-17. (In Russ.)
2. Savel'ev S. V., Permjakov V. B., Miheev V. V., Poterjaev I. K. Innovacionnye reshenija dlja povyshenija jeffektivnosti dorozhno-stroitel'noj uplotnjajushhej tehnik // *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2017; 2 (57): 51-59. (In Russ.)
3. Savel'ev S. V., Poteryaev I. K. Issledovaniya effektivnosti uplotnyayushchej tekhniki dlya stroitel'stva avtomobil'nyh dorog // *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2021; 2: 44-48. (In Russ.)
4. Zaharenko A. V., Permyakov V. B., Karpuhin I. V. Opredelenie trebuemogo chisla prohodov dorozhnogo kатka // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2004; 5 (545): 90-92. (In Russ.)
5. Suharev R. Yu. Matematicheskie modeli processov povorota kolesnih dorozhno stroitel'nyh mashin // *Nauchno tehnikeskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021; 3: 259-269. (In Russ.)
6. Korchagin P. A., Teterina I. A., Korchagina E. A. Mathematical model of the road vibrating roller // *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2020; 1(57): 133-139. (In Russ.)

7. Sukharev R. Yu. Trajectory plotting algorithm for a self-driving road grader // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 012181. DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012181. (In Russ.)

8. Emelyanov R. T., Prokopenko, A. P., Vasiliev, Y. V., Perebeynos, D. I., Novruzov, V. S. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1889(4): 042059. DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

9. Noskov N. K., Troyanovskaya I. P., Titov S. A. Matematicheskaya model' silovogo vzaimodejstviya kolesa s gruntom pri povorote mashiny // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*. 2017; 17(3): 5-15.

10. Ruppel E. Yu., Korchagin P. A., Teterina I. A., Korchagina E. A. Matematicheskoe opisanie dorozhno-gibracionnogo katka // *Stroitelnie i dorojnie mashini*. 2020; 10: 11-17 (In Russ.)

11. Denisova L. A., Meshcheryakov V. A. Control systems design: the technology of simulation and optimization // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032011 (In Russ.)

12. Stawowiak, M., Kuczaj, M. Problematics of Reliability of Road Rollers // *Management Systems in Production Engineering*. 2018; 26 (2): 124-128. DOI 10.2478/mspe-2018-0020

13. Tong X., Siwei C., Dong W. Ti W., Yang X., Weigong Z. A Novel Path Planning Method for Articulated Road Roller Using Support Vector Machine and Longest Accessible Path with Course Correction // *IEEE Access*. 2019; 7(8932491): 182784-182795. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2959346

14. Karazin V. I., Hisamov A. V. Razrabotka sistem avtopilotirovaniya transportnymi sredstvami // *Teoriya mekhanizmov i mashin*. 2019; 17. 4 (44): 149-157. (In Russ.)

15. Artemenko M. N., Korchagin P. A., Teterina I. A. Tendencii razvitiya mobil'nyh bespilotnyh robotizirovannykh kompleksov. Opyt otechestvennykh i zarubezhnykh proizvoditelej // *The Russian Automobile*

*and Highway Industry Journal*. 2019;16(4):416-430. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-4-416-430>

16. Kondakov S. V., Harlapanov D. V., Vansovich E. I. Dostovernost' modelej opisaniya soprotivleniya povorotu bystrohodnoj gusenichnoj mashiny // *Vestnik mashinostroeniya*. 2015; 10: 3-7. (In Russ.)

17. Titov S. A., Troyanovskaya I. P., Noskov N. K. Obobshchennaya model' stacionarnogo povorota proizvol'nogo transportnogo sredstva. // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*. 2017; 17. 4: 38-47. (In Russ.)

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

*Each author has an equal share of contributions to the theoretical sections of the article.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Артеменко Максим Николаевич – инженер.  
Корчагин Павел Александрович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Подъемно-транспортные машины, механика и гидропривод».*

*Тетерина Ирина Алексеевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского управления.*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Maxim N. Artemenko – Engineer, 100th Military Representation.*

*Pavel A. Korchagin – Dr. of Sci., Professor of the Carrying and Lifting Machines, Mechanics and Hydraulic Drive Department.*

*Irina A. Teterina – Cand. of Sci., Senior Researcher of the Research Department.*