



## Обеспечение устойчивости транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения при торможении на шинах сверхнизкого давления

У. Ш. Вахидов, А. А. Куркин, Л. С. Левшунов,  
Ю. И. Молев\*, Д. Н. Прошин, А. В. Согин  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический  
университет им. Р. Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород,  
Российская Федерация)

\*moleff@yandex.ru

**Введение.** Повышение эффективности сельскохозяйственных работ, перемещение людей и грузов в условиях бездорожья невозможно без создания новой, высокоэффективной внедорожной техники, обладающей низким давлением на опорную поверхность. Универсальность применения данной техники накладывает на ее конструкцию дополнительные ограничения, связанные с обеспечением безопасности движения на дорогах общего пользования. Так, для обеспечения необходимой эффективности торможения при применении колес увеличенного диаметра требуются изменения в конструкции тормозных механизмов, так как для развития стандартного тормозного усилия, в соответствии с техническим регламентом о безопасности колесных транспортных средств, на колесах увеличенного диаметра нужно развитие большего тормозного момента.

**Материалы и методы.** В статье предложена модель расчета параметров торможения транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, оснащенных колесами сверхнизкого давления. Модель отличается от применяемых ранее тем, что выходным параметром в ней является не эффективность торможения, а разница во времени возникновения блокировки передней и задней осей.

**Результаты исследования.** Выполнение условия опережающей блокировки передней оси обеспечивает устойчивость движения трактора при экстренном торможении, что положительным образом сказывается на безопасности дорожного движения. Полученные результаты позволяют утверждать, что для обеспечения безопасности движения данной техники, оснащенной шинами сверхнизкого давления по дорогам общего пользования, необходимо, чтобы соотношение расстояния от центра масс до передней оси было как минимум не меньше, чем расстояние от центра масс до опорной поверхности движения.

**Обсуждение и заключение.** Предложенная математическая модель показала свою адекватность. Полученные зависимости позволяют обосновать разные технические решения для обеспечения безопасности дорожного движения транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, оснащенных шинами сверхнизкого давления. Так, предельно допустимая величина высоты центра масс может быть принята равной 90 % от расстояния от расположения центра масс транспортно-технологической машины сельскохозяйственного назначения до его передней (управляемой) оси.

**Ключевые слова:** безопасность движения, торможение, устойчивость, центр масс, занос, транспортно-технологические машины сельскохозяйственного назначения, колеса сверхнизкого давления

**Финансирование:** исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Обеспечение устойчивости транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения при торможении на шинах сверхнизкого давления / У. Ш. Вахидов, А. А. Куркин, Л. С. Левшунув [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.609-623](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.609-623) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 609–623.

*Original article*

## Ensuring the Stability of Agricultural Transport and Technological Machines Equipped with Ultra-Low Pressure Tires during Braking

U. Sh. Vakhidov, A. A. Kurkin, L. S. Levshunov,

Iu. I. Molev\*, D. N. Proshin, A. V. Sogin

*Nizhny Novgorod State Technical University*

*(Nizhny Novgorod, Russian Federation)*

\**moleff@yandex.ru*

**Introduction.** Improving the efficiency of agricultural operations and off-road logistics require new highly efficient non-road machinery with low pressure on road surface. The versatility of the use of this machinery imposes additional requirements on its design, including those related to road traffic safety on public roads. Changes in brake design are required to ensure safe braking performance when larger diameter wheels are used for the reason that to produce standard braking force according to the technical regulations for the safety of wheeled vehicles, requires more braking torque when using larger diameter wheels.

**Materials and Methods.** The article proposes a model for calculating the braking parameters of transport and technological agricultural machines equipped with ultra-low pressure wheels. The model differs from those used earlier in that its output parameter is not the braking efficiency, but the time difference between the front and rear axle locks.

**Results.** Fulfilling the condition of the front axle advance locking ensures the stability of the tractor motion during emergency braking that has a positive effect on road traffic safety. The results of the study suggest that to ensure the safe motion of the machines equipped with ultra-low pressure tires on public roads, it is necessary that the ratio of the distance from the center of mass to the front axle is at least not less than the distance from the center of mass to the road surface.

**Discussion and Conclusion.** The proposed mathematical model has shown its adequacy. The obtained mathematical dependencies allow us to justify different technical solutions for ensuring safe road movement of transport and technological agricultural machines equipped with ultra-low pressure tires. Thus, the maximum permissible height of the center of mass can be assumed to be equal to 90% of the distance from the location of the center of mass of an agricultural transport and technological machine to its front (controlled) axis.

**Keywords:** traffic safety, braking, stability, center of mass, skid, agricultural transport and technological machines, ultra-low pressure wheels

**Funding:** The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: Project “Creation of high-tech production of GAZelle Next vehicles with new electronic architecture of electronic systems” under Agreement No. 075-11-2019-027 of 29 November 2019 (Resolution of the Government of the Russian Federation No. 218 of 9 April 2010).

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Vakhidov U.Sh., Kurkin A.A., Levshunov L.S., et al. Ensuring the Stability of Agricultural Transport and Technological Machines Equipped with Ultra-Low Pressure Tires during Braking. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):609-623. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.609-623>

## Введение

В настоящее время автомобили и тракторы на шинах сверхнизкого давления с увеличенными диаметрами колес находят широкое применение в агропромышленном комплексе на всей территории Российской Федерации. Указанная техника, согласно требованиям руководства по эксплуатации, может применяться и на дорогах общего пользования (при условии движения со скоростью не более 70 км/ч), то есть с точки зрения безопасности дорожного движения должна соответствовать требованиям Технического регламента о безопасности колесных транспортных средств, в том числе требованиям по обеспечению устойчивости движения транспортного средства при торможении (условиям отсутствия заноса)<sup>1</sup>. Также транспортно-технологические машины сельскохозяйственного назначения должны соответствовать требованиям ГОСТа 12.2.019-86, согласно которым тормозные системы данной техники должны обеспечивать удельную тормозную силу на сухом асфальте не меньшую чем 0,46<sup>2</sup>.

Следует отметить, что в транспортном потоке автомобильных дорог общего пользования доля рассматриваемой

техники невелика и не превышает 0,01 %. В таких условиях составить репрезентативную выборку причин возникновения различных аварий не представляется возможным. Исходя из открытых источников информации, можно утверждать, что ДТП с указанной техникой имеют место быть (рис. 1 и 2), причем часть из них связана с недостаточной эффективностью торможения, в том числе и на обледенелой дороге, а часть – с потерей устойчивости при экстренном торможении [1; 2].

Таким образом, научные исследования, связанные с обеспечением устойчивости сельскохозяйственных машин при движении по дорогам общего пользования, являются актуальной научной задачей, особенно в свете того, что навесное оборудование, устанавливаемое на них, вследствие большей габаритной ширины приводит к выезду на встречную полосу при малейшем отклонении от прямолинейного движения.

## Обзор литературы

В настоящее время проводятся многочисленные исследования по оценке влияния различных конструктивных факторов транспортно-технологических машин на безопасность дорожного дви-

<sup>1</sup> ТР ТС 018/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (с изменениями на 21 июня 2019 года); ГОСТ Р 41.13-99 (Правила ЕЭК ООН № 13). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения.

<sup>2</sup> ГОСТ 12.2.019-86. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности (с Изменениями № 1-8).



Р и с. 1. ДТП с транспортным средством на колесах со сверхнизким давлением, обусловленное недостаточной эффективностью торможения<sup>3</sup>

F i g. 1. Road accident with a vehicle equipped with ultra-low pressure, due to low braking efficiency



Р и с. 2. Типичное ДТП, связанное с потерей управляемости комбайна при экстренном торможении на автомобильной дороге<sup>4</sup>

F i g. 2. Road accident caused by the combine harvester control loss during emergency braking on the highway

<sup>3</sup> Авария дня. Водитель вездехода «Трэкол» устроил ДТП [Электронный ресурс]. URL: <https://fishki.net/auto/2449168-avarija-dnja-voditely-vezdehoda-trjekol-ustroil-v-dtp.html> (дата обращения: 26.10.2020).

<sup>4</sup> Комбайн – горячие посты [Электронный ресурс]. URL: <https://fishki.net/tag/kombajn/hot/> (дата обращения: 26.10.2020).

жения. При этом сложилась устойчивая методика проведения исследования – сначала статистическими методами определяется степень влияния того или иного параметра транспортного средства на безопасность дорожного движения, а потом с использованием методов математического моделирования демонстрируется возможность изменения параметров движения и изменения аварийности на дорогах [3]. Наиболее полно статистические методы оценки влияния изменения технического состояния транспортных средств на безопасность дорожного движения показаны в работах иностранных авторов [4; 5]. Также дана статистическая оценка аварийности именно внедорожных машин [6–8]. В другом исследовании приведены результаты статистического исследования, связанного с движением транспортных и технологических средств именно по сельским дорогам, где вероятность попадания в ДТП сельскохозяйственной техники особенно велика [9]. Авторами установлено, что более 30 % ДТП связано именно с недостаточной эффективностью торможения: выезд за габариты полосы движения (недостаток устойчивости) имел место в 5 % ДТП, а на скользких покрытиях до 15 % [3].

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в настоящее время достаточно полно изучена и широко применяется теория математической статистики для определения степени влияния того или иного параметра транспортных и технологических средств на безопасность дорожного движения. При этом установлено, что одним из основополагающих факторов, влияющих на аварийность колесных тракторов, является эффективность торможения и устойчивость машины при данном режиме движения. В настоящее время основным направлением научных исследований, направленным на обеспечение безопасности дорожного движения, является

широкое применение электронных систем, таких как ABS, ESP и пр. [10–13]. Отсутствие технической возможности установки электронных систем на транспортно-технологические машины сельскохозяйственного назначения на шинах сверхнизкого давления диктует необходимость проведения исследования работы тормозной системы без каких-либо электронных систем помощи водителю [14]. При этом данная система должна обеспечивать как необходимую эффективность торможения, так и устойчивость движения машины в режиме проскальзывания колес по поверхности дороги. Следует учитывать, что внедорожные шины (даже в условиях создания более высокого давления при движении по дорогам общего пользования) обладают повышенным износом, приводящим к неравномерности взаимодействия колес с дорогой, а также, кроме обеспечения значительного клиренса, приводят к увеличению высоты центра масс машины [15; 16]. При этом вопросам возникновения заноса транспортных и технологических машин в указанных специфических условиях взаимодействия не уделяется должного внимания [17]. Наиболее близкой к описываемому процессу является работа В. Ванцевича, однако в ней изменение траектории движения на шинах низкого давления изучается с точки зрения бортового поворота, а не экстренного торможения [18–20].

### Материалы и методы

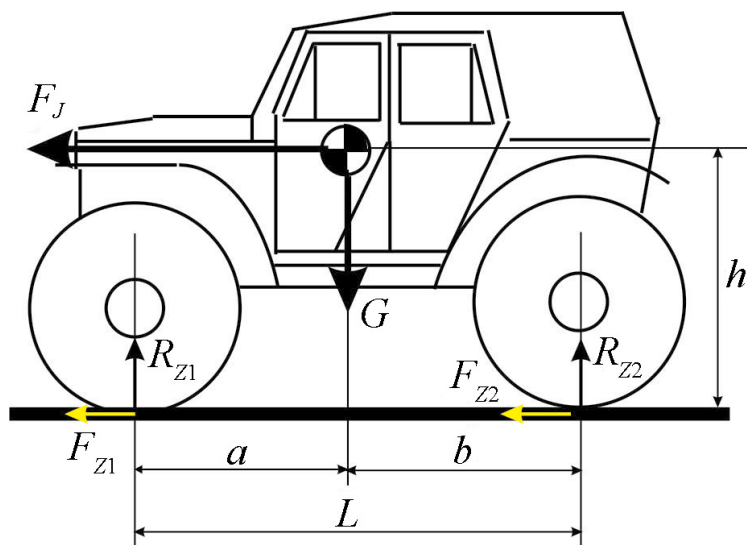
Согласно теории движения колесных транспортных средств они будут устойчивыми на дороге, если блокировка колес задней оси будет происходить позже, чем на передней [10; 21]. В современных конструкциях таких машин данный порядок изменения тормозных схем при экстренном торможении реализуется либо с использованием регулятора тормозных схем, либо программно при помощи блока управления ABS [11; 12; 21]. Следует отметить, что применение штатных узлов и деталей серийно



выпускаемых автомобилей для производства транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения на шинах сверхнизкого давления кроме положительного эффекта, выраженного в снижении себестоимости продукции, имеет и отрицательную сторону, к которой относится отсутствие технической возможности внести изменения как в конструкцию регулятора тормозных сил, так и в блок управления ABS. Поэтому все конструкции тормозной системы современных машин с шинами сверхнизкого давления подразумевают отсутствие механизмов, регулирующих изменение тормозного усилия по осям, что отрицательно ска-

зывается на эффективности торможения и устойчивости таких автомобилей [10; 17; 21]. Схема сил, действующих на транспортно-технологическую машину сельскохозяйственного назначения на колесах сверхнизкого давления при экстренном торможении, проиллюстрирована на рисунке 3.

Величина сцепного веса для разных типов транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения и условий загрузки различна. Так, для нерегулируемой тормозной системы, характерной для применения на технике, оснащенной колесами сверхнизкого давления, ее значение может быть найдено из условия<sup>5</sup>:



Р и с. 3. Силы, действующие на транспортно-технологическую машину сельскохозяйственного назначения при торможении:  $G$  – вес автомобиля;  $R_{Z1}$  – нормальная реакция дороги на передней оси;  $R_{Z2}$  – нормальная реакция дороги на задней оси;  $F_{Z1}$  – тормозная сила, действующая на переднюю ось;  $F_{Z2}$  – тормозная сила, действующая на заднюю ось;  $F_J$  – сила инерции трактора;  $L$  – колесная база трактора;  $h$  – высота центра тяжести трактора;  $a$  – расстояние от центра масс до передней оси;  $b$  – расстояние от центра масс до задней оси

Fig. 3. Forces acting on the vehicle when braking:  $G$  – vehicle weight;  $R_{Z1}$  – normal road response on the front axle;  $R_{Z2}$  – normal reaction of the road on the rear axle;  $F_{Z1}$  – braking force acting on the front axle;  $F_{Z2}$  – braking force acting on the rear axle;  $F_J$  – inertial force of the vehicle;  $L$  – wheelbase of the vehicle;  $h$  – height of the tractor's center of gravity;  $a$  – distance from the center of mass to the front axle;  $b$  – distance from the center of mass to the rear axle

<sup>5</sup> Соцков Д. А. Повышение активной безопасности автотранспортных средств при торможении: дисс. ... д-ра техн. наук. Владимир, 1988. 547 с.

$$m(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \frac{h}{b}(\phi_0 - \phi)}, & \text{где } \phi < \phi_0 \\ \frac{1}{1 + \frac{h}{a}(\phi_0 + \phi)}, & \text{где } \phi > \phi_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\phi_0$  – коэффициент сцепления, при котором происходит одновременная блокировка колес передней и задней осей, определяемый из уравнения:

$$\phi_0 = \frac{\frac{a}{L}(1+k) - k}{\frac{h}{L}(1+k)} = \frac{a(1+k) - k}{h(1+k)} = \frac{a}{h} - \frac{k}{1+k}, \quad (2)$$

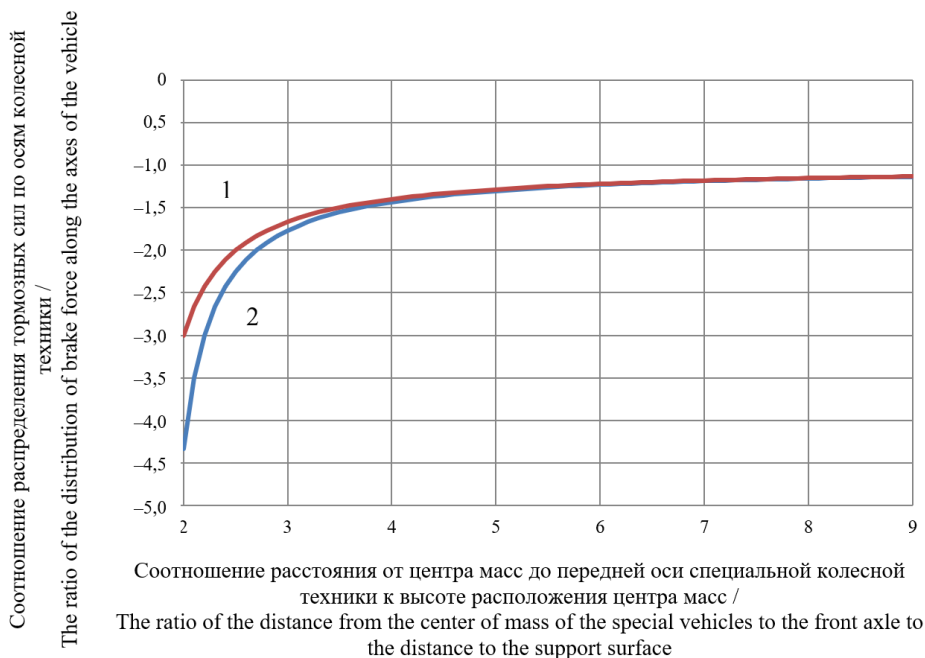
откуда:

$$\begin{aligned} \frac{k}{1+k} &= \frac{a}{h} - \phi_0 \rightarrow k = \frac{a}{h} - \phi_0 + \frac{a}{h}k - \phi_0k \rightarrow \\ \rightarrow k(1 + \phi_0 - \frac{a}{h}) &= \frac{a}{h} - \phi_0 \rightarrow k = \frac{\frac{a}{h} - \phi_0}{1 - (\frac{a}{h} - \phi_0)}, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $k$  – соотношение тормозных сил по осям автомобиля. Решение уравнения (4) показано на рисунке 4.

Тогда максимальная эффективность торможения на дороге с сухим асфальтовым покрытием определяется как:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma} &= F_{Z1} + F_{Z2} = 0,46mg = \\ &= 0,46(R_{Z1} + R_{Z2}) = R_{Z1}\phi + R_{Z2}k\phi, \end{aligned}$$



Р и с. 4. Необходимое соотношение тормозных сил по осям транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, обеспечивающих его устойчивое движение во время торможения в условиях отсутствия регулятора тормозных сил: 1 – для коэффициента сцепления, при котором происходит блокировка задних колес, равного 0,7; 2 – для коэффициента сцепления, при котором происходит блокировка задних колес, равного 0,5

Fig. 4. The required ratio of braking forces along the vehicle wheel axes, ensuring its steady movement during braking in the absence of a brake force controller:  
1 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.7;  
2 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.5

откуда:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma} &= F_{Z1} + F_{Z2} = 0,46mg = \\ &= 0,46(R_{Z1} + R_{Z2}) = R_{Z1}\phi + R_{Z2}k\phi = \\ &= mg\phi\left(\frac{a}{L} + \left(1 - \frac{a}{L}\right)k\right), \end{aligned}$$

то есть:

$$\frac{\frac{a}{h} - \phi_0}{1 - (\frac{a}{h} - \phi_0)} > \frac{0,66L - a}{L - a},$$

где  $\phi$  – коэффициент сцепления на сухом асфальте, равный 0,7 [3]. Решение полученных зависимостей показано на рисунке 4.

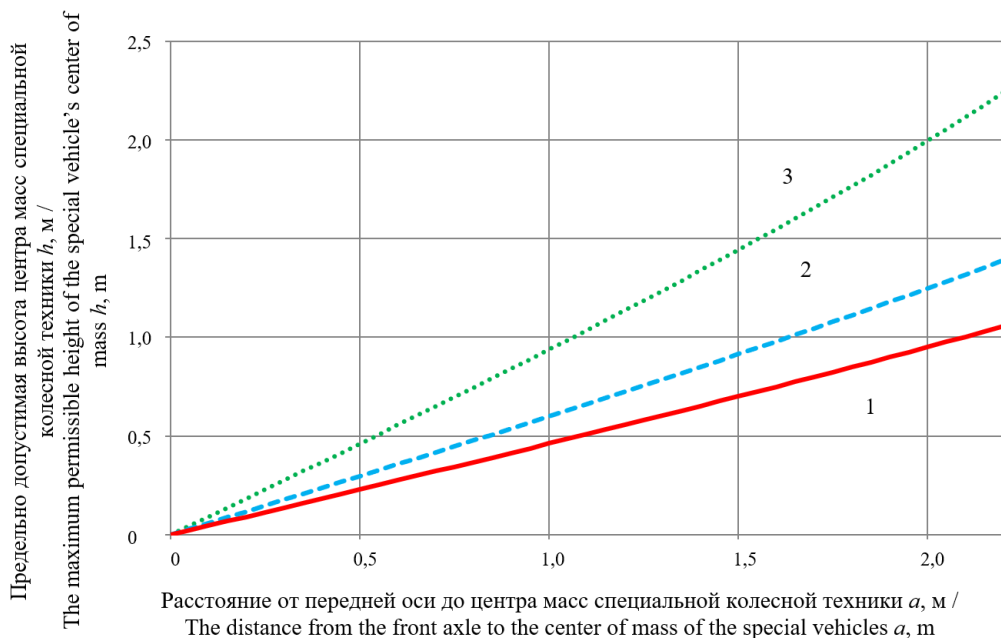
Тогда:

$$h < \frac{a}{\frac{0,66L - a}{1,66L - 2a} + \phi_0}.$$

Решение данной зависимости показано на рисунке 5.

### Результаты исследования

Полученные зависимости были проверены на специальной технике «Кержак» завода ООО «Трансмаш» (г. Нижний Новгород). Изменение центра тяжести достигалось загрузкой балластом грузовой платформы. Измерение его положения фиксировалось с использованием напольных автомо-



Р и с. 5. Предельно допустимая высота центра масс транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения на шинах сверхнизкого давления, обеспечивающая устойчивость машины и эффективность торможения на дорогах общего пользования: 1 – для опережающей блокировки задней оси при коэффициенте сцепления колеса с дорогой, равном 0,7; 2 – для опережающей блокировки задней оси при коэффициенте сцепления колеса с дорогой, равном 0,6; 3 – для опережающей блокировки задней оси при коэффициенте сцепления колеса с дорогой, равном 0,5

Fig. 5. Maximum permissible height of the agricultural machine mass center, ensuring the stability of the machine and the effectiveness of braking on public roads: 1 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.7; 2 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.6; 3 – for the coefficient of adhesion at which the rear wheels are locked equal to 0.5



бильных весов. Фиксация блокировки одной из осей проводилась визуально и с использованием высокоскоростной видеозаписи, исключающей возможность возникновения стробоскопического эффекта. Суммарная величина эффективного замедления трактора фиксировалась при помощи прибора «Эффект-2М».

Изменение соотношения тормозных сил по осям специальной техники достигалось уменьшением проходного сечения в тормозном контуре задней оси. Проведенные исследования показали высокую сходимость экспериментальных и теоретических данных. Максимальная погрешность получаемых результатов, необусловленная неравномерным износом шин, отклонением в прямолинейности установки управляемых колес, динамическими колебаниями трактора и обусловленная работой подвески и продольным градиентом величины сцепления колес с дорогой, превышала 10 %.

Экстраполируя полученные данные на сельскохозяйственную технику «Трэкол-Агро», можно утверждать, что смещение центра масс трактора назад за счет рабочего оборудования положительно сказывается на эффективности и устойчивости указанной техники. При этом опережающее влияние расстояния до центра масс от передней оси, по сравнению с высотой расположения центра масс, позволяет повысить эффективность торможения не только при комплектации трактора штанговым опрыскивателем, но и при комплектации разбрасывателем минеральных удобрений.

Полученные данные однозначно свидетельствуют о том, что для обеспечения эффективности торможения транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, оснащенных шинами сверхнизкого давления на дорогах общего пользования, требования по состоянию которых определяются нормативными документами, необхо-

димо, чтобы соотношение расстояния от центра масс до передней оси было как минимум больше, чем расстояние от центра масс до опорной поверхности. Для специализированных машин «Трэкол-Агро», центр масс которых расположен на высоте 1,0–1,5 метра, данное требование означает, что во время движения по трассе баки с технологическими жидкостями должны быть заполнены, а его тормозную систему следует отрегулировать таким образом, чтобы тормозное усилие на задней оси составляло 45 % от тормозного усилия на передней оси. Вопросы управляемости трактора при данных параметрах будут рассмотрены в дальнейших исследованиях.

### **Обсуждение и заключение**

Установлено, что основными техническими причинами возникновения ДТП транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения, оснащенных шинами низкого давления на дорогах общего пользования, являются недостаточная эффективность торможения, потеря устойчивости движения и слабая управляемость исследуемой техники, обусловленная высоким расположением центра масс. Проведенный анализ нормативных требований к указанной технике, а также результатов теоретических и экспериментальных исследований позволил решить вопрос об обеспечении требований к безопасности путем определения соотношения между величинами тормозных усилий на передней и задней осях машин, оснащенных шинами со сверхнизким давлением. Установлено, что для обеспечения устойчивости исследуемой техники при экстренном торможении расстояние от центра масс до передней оси должно быть больше высоты расположения центра масс. Экспериментально подтверждено, что с учетом неравномерного износа шин, отклонения в прямолинейности установки управляемых колес, динамических колебаний трактора, обуслов-

ленных работой подвески, а также продольным градиентом величины сцепления колес с дорогой, предельно допустимая величина высоты центра масс может быть принята равной 90 % от расстояния от расположения центра масс транспортно-технологической машины сельскохозяйственного назначения до его передней (управляемой) оси.

Полученные зависимости могут быть использованы как при разработке новых конструкций транспортно-технологических машин сельскохозяйственного назначения на шинах

с низким давлением (анализ существующей сельскохозяйственной техники на шинах сверхнизкого давления типа «Трэкол-Агро» показывает необходимость увеличения колесной базы с 3 до 4 метров со смещением центра тяжести к задней оси), так и при эксплуатации указанной техники, в том числе путем корректировки заполнения объемов технологическими материалами (минеральными удобрениями) для обеспечения безопасности движения указанных тракторов по автомобильным дорогам общего пользования [22–24].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Injuries Related to Off-Road Vehicles in Canada / W. Vanlaar, H. McAteer, S. Brown [et al.]. – DOI 10.1016/j.aap.2014.12.006 // Accident Analysis and Prevention. – 2016. – Vol. 75. – Pp. 264–271. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457514003856?via%3Dihub> (дата обращения: 26.10.2020).
2. Denning, G. All-Terrain Vehicle Fatalities on Paved Roads, Unpaved Roads, and Off-Road: Evidence for Informed Roadway Safety Warnings and Legislation / G. Denning, C. Jennissen. – DOI 10.1080/15389588.2015.1057280 // Traffic Injury Prevention. – 2016. – Vol. 17, Issue 4. – Pp. 406–412. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15389588.2015.1057280> (дата обращения: 26.10.2020).
3. Методика определения степени влияния дорожных условий и конструктивных особенностей автомобилей на безопасность дорожного движения / И. А. Ерасов, Н. А. Колесниченко, Ю. И. Молев [и др.] // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 4 (51). – С. 82–88. – URL: <http://orel-univer.ru/science/journal/mtitm/archive> (дата обращения: 26.10.2020). – Рез. англ.
4. Acar, E. Increasing Automobile Crash Response Metamodel Accuracy through Adjusted Cross Validation Error Based on Outlier Analysis / E. Acar. – DOI 10.1080/13588265.2014.977839 // International Journal of Crashworthiness. – 2015. – № 2. – Pp. 107–122. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13588265.2014.977839> (дата обращения: 26.10.2020).
5. Ahmed, A. Errors in Accident Data, Its Types, Causes and Methods of Rectification-Analysis of the Literature / A. Ahmed, A. F. M. Sadullah, A. S. Yahya. – DOI 10.1016/j.aap.2017.07.018 // Accident Analysis and Prevention. – 2019. – Vol. 130. – Pp. 3–21. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457517302531?via%3Dihub> (дата обращения: 26.10.2020).
6. All-Terrain Vehicle Safety Knowledge, Riding Behaviors and Crash Experience of Farm Progress Show Attendees / Ch. Jennissen, K. K. Harland, K. Wetjen [et al.]. – DOI 10.1016/j.jsr.2016.12.001 // Journal of Safety Research. – 2017. – Vol. 60. – Pp. 71–78. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022437516305023?via%3Dihub> (дата обращения: 26.10.2020).
7. Denning, G. All-Terrain Vehicles (ATVs) on the Road: A Serious Traffic Safety and Public Health Concern / G. Denning, C. Jennissen, K. Harland [et al.]. – DOI 10.1080/15389588.2012.675110 // Traffic Injury Prevention. – 2013. – Vol. 14, Issue 1. – Pp. 78–85. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15389588.2012.675110> (дата обращения: 26.10.2020).
8. More Fatal All-Terrain Vehicle Crashes Occur on the Roadway Than Off: Increased Risk-Taking Characterises Roadway Fatalities / G. Denning, K. Harland, D. Ellis, Ch. A. Jennissen. – DOI 10.1136/injuryprev-2012-040548 // Injury Prevention. – 2013. – Vol. 19, Issue 4. – Pp. 250–256. – URL: <https://injuryprevention.bmj.com/content/19/4/250> (дата обращения: 26.10.2020).



9. The Application of Reliability Reallocation Model in Traffic Safety Analysis on Rural Roads / S. Bačkalić, D. Jovanović, T. Bačkalić [et al.]. – DOI [10.21307/tp.2019.14.1.11](https://doi.org/10.21307/tp.2019.14.1.11) // Transport Problems. – 2019. – Vol. 14, Issue 1. – Pp. 115–125. – URL: [https://www.exeley.com/transport\\_problems/doi/10.21307/tp.2019.14.1.11](https://www.exeley.com/transport_problems/doi/10.21307/tp.2019.14.1.11) (дата обращения: 26.10.2020).
10. Dynamic Simulation of Brake Pedal Force Effect on Heavy Vehicle Braking Distance under Wet Road Conditions / M. Zamzamzadeh, A. A. Saifizul, R. Ramli, M. F. Soong. – DOI [10.15282/IJAME.13.3.2016.2.0292](https://doi.org/10.15282/IJAME.13.3.2016.2.0292) // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 13, Issue 3. – Pp. 3555–3563. – URL: [http://ijame.ump.edu.my/images/Volume\\_13\\_Issue\\_3\\_2016/2\\_Zamzamzadeh%20et%20al.pdf](http://ijame.ump.edu.my/images/Volume_13_Issue_3_2016/2_Zamzamzadeh%20et%20al.pdf) (дата обращения: 26.10.2020).
11. Aksjonov, A. Design and Simulation of the Robust ABS and ESP Fuzzy Logic Controller on the Complex Braking Maneuvers / A. Aksjonov, K. Augsburg, V. Vodovozov. – DOI [10.3390/app6120382](https://doi.org/10.3390/app6120382) // Applied Sciences. – 2016. – Vol. 6, Issue 12. – Pp. 382. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/6/12/382> (дата обращения: 26.10.2020).
12. Wang, J.-Ch. Hydraulic Anti-Lock Braking Control Strategy of a Vehicle Based on a Modified Optimal Sliding Mode Control Method / J.-Ch. Wang, R. He. – DOI [10.1177/0954407018820445](https://doi.org/10.1177/0954407018820445) // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2019. – Vol. 233, Issue 12. – Pp. 3185–3198. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954407018820445> (дата обращения: 26.10.2020).
13. Liu, P.-F. Dynamic Performance of Heavy-Haul Combined Train Applying Emergency Braking on Straight Line / P.-F. Liu, K.-Y. Wang. – DOI [10.1007/s11771-017-3597-3](https://doi.org/10.1007/s11771-017-3597-3) // Journal of Central South University. – 2017. – Vol. 24. – Pp. 1898–1903. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11771-017-3597-3> (дата обращения: 26.10.2020).
14. Fowler, G. F. All-Terrain Vehicle (ATV) Handling and Control, Analysis of Objective Data / G. F. Fowler, R. Larson. – DOI [10.4271/2017-01-1557](https://doi.org/10.4271/2017-01-1557) // SAE International Journal of Vehicle Dynamics Stability and NVH. – 2017. – Vol. 1, Issue 2. – Pp. 204–219. – URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2017-01-1557> (дата обращения: 26.10.2020).
15. Evaluation of Vehicle Braking Performance on Wet Pavement Surface Using an Integrated Tire-Vehicle Modeling Approach / X. Liu, Q. Cao, H. Wang [et al.]. – DOI [10.1177/0361198119832886](https://doi.org/10.1177/0361198119832886) // Transportation Research Record. – 2019. – Vol. 2673, Issue 3. – Pp. 295–307. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198119832886> (дата обращения: 26.10.2020).
16. Mirzaeinejad, H. Enhancement of Vehicle Braking Performance on Split-M Roads Using Optimal Integrated Control of Steering and Braking Systems / H. Mirzaeinejad, M. Mirzaei, R. Kazemi. – DOI [10.1177/1464419315617332](https://doi.org/10.1177/1464419315617332) // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics. – 2016. – Vol. 230, Issue 4. – Pp. 401–415. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1464419315617332> (дата обращения: 26.10.2020).
17. Ni, J. Dynamic Modelling and Experimental Validation of a Skid-Steered Vehicle in the Pivotal Steering Condition / J. Ni, J. Hu. – DOI [10.1177/0954407016652760](https://doi.org/10.1177/0954407016652760) // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2017. – Vol. 231, Issue 2. – Pp. 225–240. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954407016652760> (дата обращения: 26.10.2020).
18. Gray, J. P. Agile Tire Slippage Dynamics for Radical Enhancement of Vehicle Mobility / J. P. Gray, V. Vantsevich, J. Paldan. – DOI [10.1016/j.jterra.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.jterra.2016.01.002) // Journal of Terramechanics. – 2016. – Vol. 65. – Pp. 14–37. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489816000045?via%3Dihub> (дата обращения: 26.10.2020).
19. Vlachova, A. V. The Skidding Modelling of an Apparatus with Turned Front Wheels / A. V. Vlachova, A. P. Novoderov. – DOI [10.3103/S0025654419010023](https://doi.org/10.3103/S0025654419010023) // Mechanics of Solids. – 2019. – Vol. 54. – Pp. 19–38. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS0025654419010023> (дата обращения: 26.10.2020).
20. Dynamic Modeling and Experimental Validation of Skid-Steered Wheeled Vehicles with Low-Pressure Pneumatic Tires on Soft Terrain / Sh. Tang, Sh. Yuan, X. Li, J. Zhou. – DOI [10.1177/0954407019847302](https://doi.org/10.1177/0954407019847302) // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of

Automobile Engineering. – 2019. – Vol. 234, Issue 2–3. – Pp 840–856. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954407019847302> (дата обращения: 26.10.2020).

21. **Vantsevich, V. V.** Road and Off-Road Vehicle System Dynamics. Understanding the Future From the Past / V. V. Vantsevich. – DOI 10.1080/00423114.2014.984726 // Vehicle System Dynamics. – 2015. – № 2. – Pp. 137–153. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00423114.2014.984726> (дата обращения: 26.10.2020).

22. **Кузнецов, Ю. П.** К вопросу о влиянии величины колесной базы автомобиля на его управляемость / Ю. П. Кузнецов, Ю. И. Молев, М. Г. Черевастов // Мир транспорта и технологических машин. – 2019. – № 3 (66). – С. 9–11. – URL: <http://oreluniver.ru/public/file/archive/MT32019.pdf> (дата обращения: 26.10.2020). – Рез. англ.

23. Indirect Quality Estimates of the Vehicle Movement Response to the Control Step Input / Y. Molev, M. Cherevastov, I. Erasov, L. S. Levshunov. – DOI 10.1088/1742-6596/1177/1/012029 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1177/1/012029> (дата обращения: 26.10.2020).

24. The Impact of Changing the Type of Understeer on Vehicle Handling / Y. Molev, M. Cherevastov, A. Sogin [et al.]. – DOI 10.1088/1757-899X/386/1/012026 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 386. – 7 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/386/1/012026> (дата обращения: 26.10.2020).

*Поступила 11.05.2020; принята к публикации 10.07.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Вахидов Умар Шахидович**, заведующий кафедрой строительных и дорожных машин ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: AAG-8584-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4109-8406>, Scopus ID: 55794612500, umar-vahidov@mail.ru

**Куркин Андрей Александрович**, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор физико-математических наук, профессор, Researcher ID: A-1972-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3828-6406>, Scopus ID: 70034466660, aakurkin@gmail.com

**Левшунов Лев Сергеевич**, доцент кафедры строительных и дорожных машин ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат технических наук, Scopus ID: 57208467666, wlev.lev@yandex.ru

**Молев Юрий Игоревич**, профессор кафедры строительных и дорожных машин ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: AAG-8501-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0429-4590>, Scopus ID: 57203352368, moleff@yandex.ru

**Прошин Димитрий Николаевич**, старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8620-157X>, Scopus ID: 57214464141, proshdn@mail.ru

**Согин Александр Васильевич**, профессор кафедры строительных и дорожных машин ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4384-1136>, Scopus ID: 57203352293, sapropel-nn@mail.ru



*Заявленный вклад соавторов:*

У. Ш. Вахидов – анализ математических моделей, проведение теоретических расчетов, формирование выводов; А. А. Куркин – научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов; Л. С. Левшунов – корректировка литературного анализа, доработка текста, корректировка выводов; Ю. И. Молев – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; Д. Н. Прошин – проведение экспериментальной части исследований, корректировка текста, корректировка выводов; А. В. Согин – анализ научных источников, доработка текста, обсуждение результатов.

**Благодарности:** экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Vanlaar W., McAteer H., Brown S., et al. Injuries Related to Off-Road Vehicles in Canada. *Accident Analysis and Prevention*. 2016; 75:264-271. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.12.006>
2. Denning G., Jennissen C. All-Terrain Vehicle Fatalities on Paved Roads, Unpaved Roads, and Off-Road: Evidence for Informed Roadway Safety Warnings and Legislation. *Traffic Injury Prevention*. 2016; 17(4):406-412. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1057280>
3. Yerasov I.A., Kolesnichenko N.A., Molev Yu.I., et al. Method for Determining the Degree of Influence of Road Terms and Conditions Design Features Car on Road Safety. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* = World Transport and Technological Machinery. 2015; (4):82-88. Available at: <http://oreluniver.ru/science/journal/mtitm/archive> (accessed 26.10.2020). (In Russ.)
4. Acar E. Increasing Automobile Crash Response Metamodel Accuracy through Adjusted Cross Validation Error Based on Outlier Analysis. *International Journal of Crashworthiness*. 2015; (2):107-122. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/13588265.2014.977839>
5. Ahmed A., Sadullah A.F.M., Yahya A.S. Errors in Accident Data, Its Types, Causes and Methods of Rectification-Analysis of the Literature. *Accident Analysis and Prevention*. 2019; 130:3-21. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.07.018>
6. Jennissen Ch., Harland K.K., Wetjen K., et al. All-Terrain Vehicle Safety Knowledge, Riding Behaviors and Crash Experience of Farm Progress Show Attendees. *Journal of Safety Research*. 2017; 60:71-78. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2016.12.001>
7. Denning G., Jennissen C., Harland K., et al. All-Terrain Vehicles (ATVs) on the Road: A Serious Traffic Safety and Public Health Concern. *Traffic Injury Prevention*. 2013; 14(1):78-85. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15389588.2012.675110>
8. Denning G., Harland K., Ellis D., et al. More Fatal All-Terrain Vehicle Crashes Occur on the Roadway Than Off: Increased Risk-Taking Characterises Roadway Fatalities. *Injury Prevention*. 2013; 19(4):250-256. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1136/injuryprev-2012-040548>
9. Bačkalić S., Jovanović D., Bačkalić T., et al. The Application of Reliability Reallocation Model in Traffic Safety Analysis on Rural Roads. *Transport Problems*. 2019; 14(1):115-125. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21307/tp.2019.14.1.11>
10. Zamzamzadeh M., Saifizul A.A., Ramli R., et al. Dynamic Simulation of Brake Pedal Force Effect on Heavy Vehicle Braking Distance under Wet Road Conditions. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2016; 13(3):3555-3563. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15282/IJAME.13.3.2016.2.0292>
11. Aksjonov A., Augsburg K., Vodovozov V. Design and Simulation of the Robust ABS and ESP Fuzzy Logic Controller on the Complex Braking Maneuvers. *Applied Sciences*. 2016; 6(12):382. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app6120382>



12. Wang J.-Ch., He R. Hydraulic Anti-Lock Braking Control Strategy of a Vehicle Based on a Modified Optimal Sliding Mode Control Method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019; 233(12):3185-3198. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407018820445>
13. Liu P.-F., Wang K.-Y. Dynamic Performance of Heavy-Haul Combined Train Applying Emergency Braking on Straight Line. *Journal of Central South University*. 2017; 24:1898-1903. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3597-3>
14. Fowler G.F., Larson R. All-Terrain Vehicle (ATV) Handling and Control, Analysis of Objective Data. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics Stability and NVH*. 2017; 1(2):204-219. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4271/2017-01-1557>
15. Liu X., Cao Q., Wang H., et al. Evaluation of Vehicle Braking Performance on Wet Pavement Surface Using an Integrated Tire-Vehicle Modeling Approach. *Transportation Research Record*. 2019; 2673(3):295-307. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198119832886>
16. Mirzaeinejad H., Mirzaei M., Kazemi R. Enhancement of Vehicle Braking Performance on Split-M Roads Using Optimal Integrated Control of Steering and Braking Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*. 2016; 230(4):401-415. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/1464419315617332>
17. Ni J., Hu J. Dynamic Modelling and Experimental Validation of a Skid-Steered Vehicle in the Pivotal Steering Condition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2017; 231(2):225-240. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407016652760>
18. Gray J.P., Vantsevich V., Paldan J. Agile Tire Slippage Dynamics for Radical Enhancement of Vehicle Mobility. *Journal of Terramechanics*. 2016; 65:14-37. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2016.01.002>
19. Vlahkova A.V., Novoderov A.P. The Skidding Modelling of an Apparatus with Turned Front Wheels. *Mechanics of Solids*. 2019; 54:19-38. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S0025654419010023>
20. Tang Sh., Yuan Sh., Li X., et al. Dynamic Modeling and Experimental Validation of Skid-Steered Wheeled Vehicles with Low-Pressure Pneumatic Tires on Soft Terrain. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019; 234(2-3):840-856. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407019847302>
21. Vantsevich V.V. Road and Off-Road Vehicle System Dynamics. Understanding the Future From the Past. *Vehicle System Dynamics*. 2015; (2):137-153. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.984726>
22. Kuznetsov Yu.P., Molev Yu.I., Cherevastov M.G. To the Question about the Influence of the Size of Wheelbase of the Car on Its Handling. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* = World of Transport and Technological Machines. 2019; (3):9-11. Available at: <http://oreluniver.ru/public/file/archive/MT32019.pdf> (accessed 26.10.2020). (In Russ.)
23. Molev Y., Cherevastov M., Erasov I., et al. Indirect Quality Estimates of the Vehicle Movement Response to the Control Step Input. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012029>
24. Molev Y., Cherevastov M., Sogin A., et al. The Impact of Changing the Type of Understeer on Vehicle Handling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 386. 7 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/386/1/012026>

*Received 11.05.2020; revised 10.07.2020; published online 30.12.2020*

*About the authors:*

**Umar Sh. Vakhidov**, Head of the Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: AAG-8584-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4109-8406>, Scopus ID: 55794612500, [umar-vahidov@mail.ru](mailto:umar-vahidov@mail.ru)





**Andrey A. Kurkin**, Vice-Rector for Science and Research, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Researcher ID: A-1972-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3828-6406>, Scopus ID: 7003446660, [aakurkin@gmail.com](mailto:aakurkin@gmail.com)

**Lev S. Levshunov**, Associate Professor of Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Scopus ID: 57208467666, [wlev.lev@yandex.ru](mailto:wlev.lev@yandex.ru)

**Iuri I. Molev**, Professor of Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: AAG-8501-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0429-4590>, Scopus ID: 57203352368, [moleff@yandex.ru](mailto:moleff@yandex.ru)

**Dmitriy N. Proshin**, Senior Lecturer of Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8620-157X>, Scopus ID: 57214464141, [proshdn@mail.ru](mailto:proshdn@mail.ru)

**Aleksandr V. Sogin**, Professor of Chair of Construction and Road Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minin St., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4384-1136>, Scopus ID: 57203352293, [sapropel-nn@mail.ru](mailto:sapropel-nn@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

U. Sh. Vakhidov – analysis of mathematical models, theoretical calculations, drawing the conclusions; A. A. Kurkin – scientific guidance, analysis of research results, improvement of text, correction of conclusions; L. S. Levshunov – correction of literary analysis, improvement of text, correction of conclusions; Iu. I. Molev – formation of the main concept, goals and objectives of the research, making calculations, preparation of the text, formation of conclusions; D. N. Proshin – conducting the experimental part of the research, text correction, correction of conclusions; A. V. Sogin – analysis of scientific sources, improvement of the text, discussion of results.

**Acknowledgments:** Experimental studies were carried out using the equipment of the Transport Systems Center for Collective Use of the Nizhny Novgorod State Technical University.

*All authors have read and approved the final manuscript.*