

## ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АПК TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR AGROINDUSTRIAL COMPLEX

Научная статья

УДК 631.372

doi : 10.34655/bgsha.2023.70.1.018

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ КОЛЕС ТРАКТОРА НА ПОЧВУ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ

Сергей Сергеевич Калашников<sup>1</sup>, Сергей Федотович Калашников<sup>2</sup>,  
Даба Нимаевич Раднаев<sup>3</sup>, Виктор Алексеевич Петров<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова,  
Улан-Удэ, Россия

<sup>1,2</sup>goodron@yandex.ru

<sup>3</sup>daba01@mail.ru

<sup>4</sup>www.colin.ru@mail.ru

**Аннотация.** В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства мобильные энергетические средства за счет многократного воздействия на почву приводят к переуплотнению почвы и снижению ее плодородия. При осуществлении основных технологических операций почва выступает в роли несущего основания для колес тракторов, оказывающих на нее высокое механическое воздействие. Увеличение удельного давления на почву ведет к разрешению ее структуры, накоплению уплотняющих деформаций, в результате чего нарушаются водный, воздушный, биохимический режимы, усиливается склонность к возникновению эрозийного разрушения, угнетается развитие почвенной микро- и макрофауны, снижается ее плодородие. Для проведения исследований, связанных с вопросом переуплотнения почвы, были спроектированы и изготовлены тензометрические мембраны, способные измерять давление колес трактора на почву. В работе предлагается измерение удельных давлений колес трактора класса 50 кН на почву при помощи тензометрических мембран, устанавливаемых непосредственно на шине колеса, а также предлагается метод определения коэффициента сопротивления качению тракторного колеса, который можно использовать одновременно с измерением удельного давления колеса на почву при помощи тензомембран. Предложенная методика, в отличие от существующих методик, исключает нарушение почвенного слоя перед проходом трактора, поэтому погрешность измерений удельных давлений значительно снижается. В результате проведенных полевых испытаний был получен образец осциллограммы, позволяющий определить такие показатели взаимодействия колеса с почвой, как максимальные удельные давления, длину и время контакта. Используя полученные в работе зависимости, можно подобрать оптимальное значение давления воздуха в шине с точки зрения минимальных затрат на качение. Например, для шины типа ФД-12 при качении по стерне это давление равно 0,11 МПа.

**Ключевые слова:** переуплотнение почвы, трактор, движитель, удельное давление, давление в шинах, сопротивление качению.

Original article

## METHOD OF MEASURING SPECIFIC PRESSURES OF TRACTOR WHEELS ON THE SOIL AND DETERMINATION OF ROLLING RESISTANCE COEFFICIENT

Sergey S. Kalashnikov<sup>1</sup>, Sergey F. Kalashnikov<sup>2</sup>, Daba N. Radnaev<sup>3</sup>, Viktor A. Petrov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov, Ulan-Ude, Russia

<sup>1,2</sup>goodron@yandex.ru

<sup>3</sup>daba01@mail.ru

<sup>4</sup>www.colin.ru@mail.ru

**Abstract.** *Under the intensification of agricultural production, mobile energy devices, due to repeated impact on soil, lead to soil overconsolidation and decrease of its fertility. During the performing of the main technological operations, soil acts as a bearing base for the wheels of tractors that have a high mechanical effect on it. The increase of the specific pressure on the soil leads to the destruction of its structure, the accumulation of compacting deformations, as the result of which the water, air, and biochemical regimes are disturbed, the tendency to erosive destruction increases, the development of soil micro- and macrofauna is inhibited, and its fertility decreases. To conduct research related to the issue of soil reconsolidation, strain-gauge membranes, capable of measuring the pressure of the tractor wheels on the soil, were designed and manufactured. The article provides the measurement of the specific pressure of tractor wheels of the class 50 kN on the soil using strain-gauge membranes installed directly on a tyre of a wheel, as well as the method for determining the coefficient of rolling resistance of the tractor wheel, which can be used simultaneously with the measurement of the specific pressure of the wheel on the soil using strain membranes. The proposed method, in contrast to existing methods, eliminates the violation of the soil layer before the passage of the tractor, so the measurement error of specific pressures is significantly reduced. As the result of the field tests, a sample of the oscillogram was obtained, which makes it possible to determine such indicators of the interaction of the wheel with the soil, such as maximum specific pressures, length and contact time. Using the dependences obtained in the work, it is possible to select the optimal value of the air pressure in the tyre in terms of the minimum efforts on rolling. For example, for a tyre of the FD-12 type, when rolling along the stubble, this pressure is 0.11 MPa.*

**Keywords:** soil overconsolidation, tractor, mover, specific pressure, tyre pressure, rolling resistance.

**Введение.** В связи с возрастающей интенсификацией сельскохозяйственного производства машинно-тракторный парк нашей страны с каждым годом пополняется все более мощными энергонасыщенными тракторами. Однако, повышение мощности трактора неизбежно приводит к увеличению его массы и удельных давлений ходовой системы на почву. Увеличение удельного давления на почву ведет к разрушению ее структуры, накоплению уплотняющих деформаций, в результате чего нарушаются водный, воздушный, биохимический режимы, усиливается склонность к возникновению эрозийного разрушения, угнетается развитие почвенной микро- и макрофауны, снижается ее

плодородие [1, 2]. Обработка такой почвы с каждым годом требует все больших энергозатрат.

Для успешного решения проблемы снижения уплотняющего воздействия ходовых систем тракторов на почву возникает необходимость проведения комплексных исследований во всех почвенно-климатических зонах страны. Для почв Республики Бурятия, которые характеризуются высокой твердостью и пониженной влажностью [3, 4], этот вопрос практически не изучен.

В связи с этим, **цель** данной работы – разработка методик измерения удельных давлений движителей тракторов на почву и определение коэффициента со-

противления качению для решения проблемы переуплотнения почвы.

**Условия, объекты и методы исследований.** Одним из основных показателей, оценивающих степень воздействия ходовой системы трактора на почву, является удельное давление [5, 6]. Измерение удельного давления связано с применением достаточно сложной измерительной аппаратуры.

Нами предлагается измерение удельных давлений колес трактора класса 50 кН на почву при помощи тензометрических мембран, устанавливаемых непосредственно на шине колеса. Основой датчика является мембрана, изготовленная из стали 40Х (рис. 1).

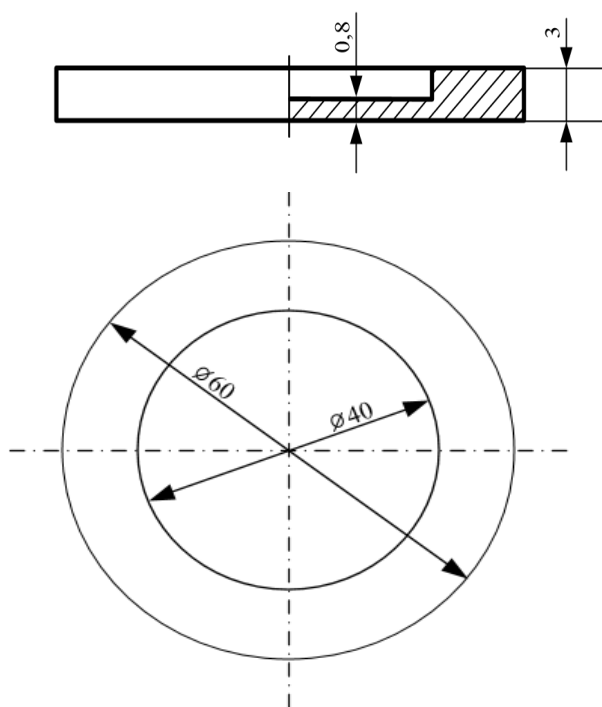


Рисунок 1. Мембрана

Расчетным путем определены необходимый размер мембраны и места наклейки тензорезисторов. Как показывают расчеты, чтобы иметь на мембране два активных тензорезистора, необходимо наклеить один из них в центре мембраны (он будет работать на растяжение), а другой – на расстоянии  $0,628 \cdot r$  от центра (он будет работать на сжатие), где  $r$  – радиус мембраны. Тензорезисторы соединяют по полумостовой схеме и герметизируют клеем БФ-2, нанесенным в три слоя. Для

установки тензомембран на шину в ней вырезают углубления, в которые при помощи клея 88 НП клеивают стальные кольца-основания с резьбовыми отверстиями. Тензомембраны приворачивают к кольцам основаниям. Провода от тензорезисторов укладывают в резиновые трубки, которые через канавку, прорезанную в тыльной стороне протектора, выводят к токосъемнику.

Известно, что касательная сила тяги, развиваемая ведущим колесом трактора, расходуется на преодоление тягового сопротивления и сопротивления качению [7].

$$P_k = P_{kp} + P_f, \quad (1)$$

где  $P_k$  – касательная сила тяги, кН;

$P_{kp}$  – тяговое сопротивление, кН;

$P_f$  – сопротивление качению, кН.

Потери на качение оценивают силой сопротивления качению и коэффициентом сопротивления качению

$$P_f = G \cdot f, \quad (2)$$

где  $G$  – вертикальная нагрузка на колесо, кН;  $f$  – коэффициент сопротивления качению.

Сопротивление качению колеса определяют методом свободного выбега (инерционным методом), т. е. измерением времени и пройденного колесом пути с заданной скоростью до полной его остановки или методом непосредственного замера поглощаемой колесом энергии (методом динамометрирования) [7, 8, 9]. Однако эти методы довольно сложны технически, требуют определенных условий и больших затрат времени, особенно при качении по деформируемой поверхности.

Нами предлагается метод определения коэффициента сопротивления качению тракторного колеса, который можно использовать одновременно с измерением удельного давления колеса на почву при помощи тензомембран.

При качении колеса передние элементы шины, вступающие в контакт с опорной поверхностью, нагружаются и деформируются, а задние разгружаются и восстанавливают свою форму. Из-за трения внутри шины и в почве часть энергии, затраченной на их деформацию, обратно не

возвращается и переходит в тепло, которое рассеивается в окружающем пространстве. Поэтому площадь эпюры нормальных реакций, действующих на катящееся колесо, в передней части больше,

чем в задней (рис. 2). Это приводит к смещению равнодействующей  $R$  эпюры вперед от вертикальной оси колеса по ходу движения на величину  $a$ , которая называется плечом трения качения.

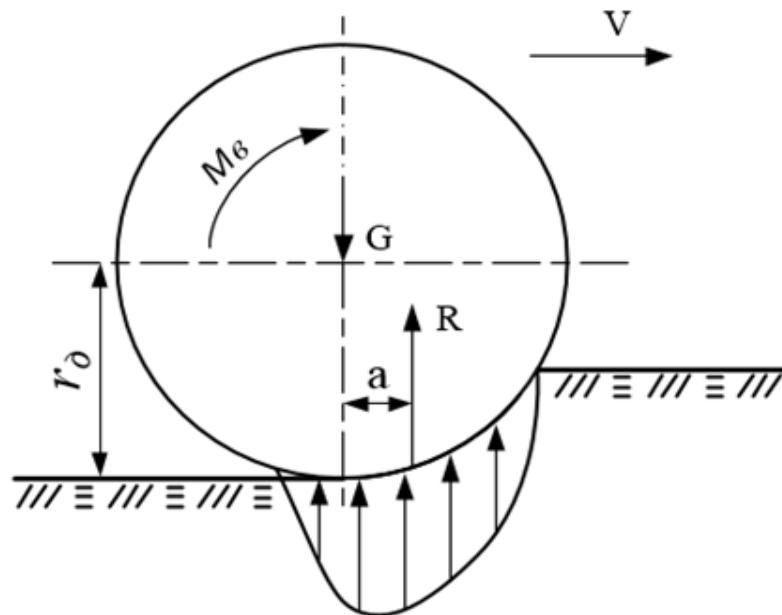


Рисунок 2. Эпюра нормальных давлений под ведущим колесом трактора

Коэффициент сопротивления качению можно определить по следующему выражению [8]:

$$f = \frac{a}{r_d}, \quad (3)$$

где  $r_d$  – динамический радиус качения колеса, м;  $a$  – плечо трения качения, м.

Поскольку при относительно малых скоростях движения, что характерно для трактора, динамический радиус мало отличается от статистического, его легко измерить. Для измерения плеча трения качения нами изготовлен индукционный преобразователь, работающий совместно с тензомембраной.

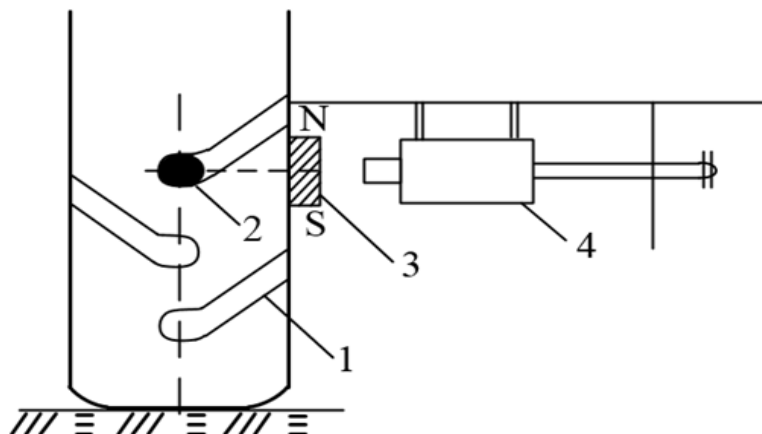


Рисунок 3. Схема установки индукционного преобразователя  
1 – колесо трактора; 2 – тензомембрана; 3 – постоянный магнит; 4 – катушка индуктивности с датчиком

Постоянный магнит 3 устанавливается на обод колеса строго на одной линии

с центром тензомембраны 2 и вращается вместе с колесом 1. Катушка индуктив-

ности со считывающим датчиком 4 закрепляется неподвижно вблизи обода колеса и соединяется с персональным компьютером (ПК), установленном в кабине трактора (рис. 3).

При прохождении постоянного магнита вблизи катушки в последней наводится э. д. с. индукции, а это приводит к срабатыванию датчика, установленного на катушке индуктивности и передается на ПК с установленным программным обеспечением, фиксирующем данные в виде осциллограммы.

Экспериментальные исследования

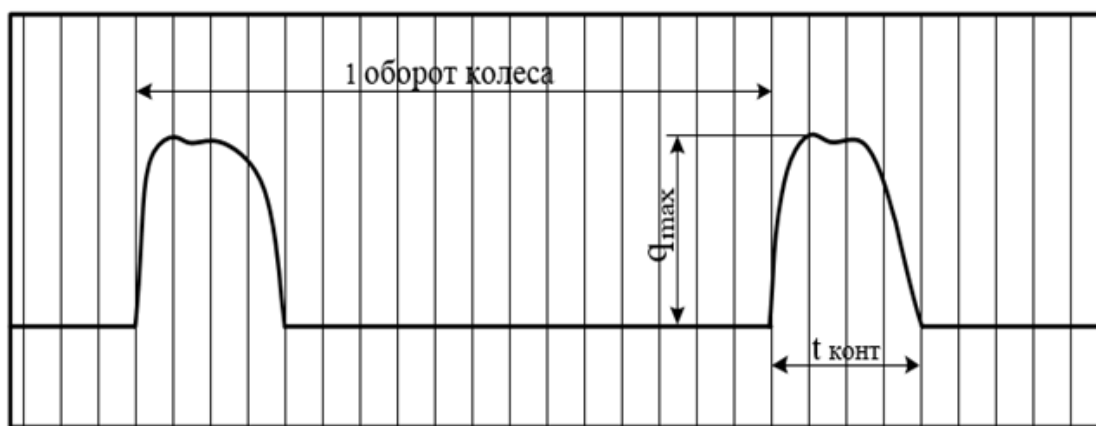


Рисунок 4. Образец осциллограммы с записью работы тензомембраны  $q_{\max}$  – максимальные удельные давления;  $t_{\text{конт}}$  – время контакта

На рисунке 4 приведен образец осциллограммы, полученной при полевых испытаниях. Как видно из рисунка, запись позволяет определить такие показатели взаимодействия колеса с почвой как максимальные удельные давления, длину и время контакта, применяемые для оценки уровня воздействия ходовой системы на почву.

Таким образом, предложенная методика измерения удельных давлений является вполне приемлемой для исследования процессов взаимодействия двигателей трактора класса 50 кН с почвой. Данная методика, в отличие от существующей методики «месдоз», исключает нарушение почвенного слоя перед проходом трактора, поэтому погрешность измерений удельных давлений значительно снижается.

При соответствующем изменении размеров мембран их можно применять для измерения удельных давлений ходовой

проводились с шиной модели ФД-12 в условиях УНПП «Агротех» на стерневом фоне при влажности почвы 8... 12% и скорости движения 1,8... 2 м/с.

Опыты выполнялись при пяти фиксированных значениях величины внутришинного давления воздуха.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Тарировка и полевые испытания показали, что тензомембраны имеют линейную характеристику, хорошую стабильность и достаточно высокую точность. Суммарная погрешность измерения не превышает 4%.

системы на почву колесного трактора или сельхозмашины любой марки.

Как показали лабораторные испытания, результаты которых изображены на рисунке 5, центр колеса находится в точке К осциллограммы.

Таким образом, расстояние от точки К до центра эпюры давления является плечом трения качения.

Результаты исследований по определению коэффициента сопротивления качению изображены на рисунке 6.

Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что и по характеру зависимости, и по величине они мало отличаются от результатов исследований других авторов [6, 8, 9].

Используя полученную зависимость, можно подобрать оптимальное значение давления воздуха в шине с точки зрения минимальных затрат на качение. Например, для шины типа ФД-12 при качении по

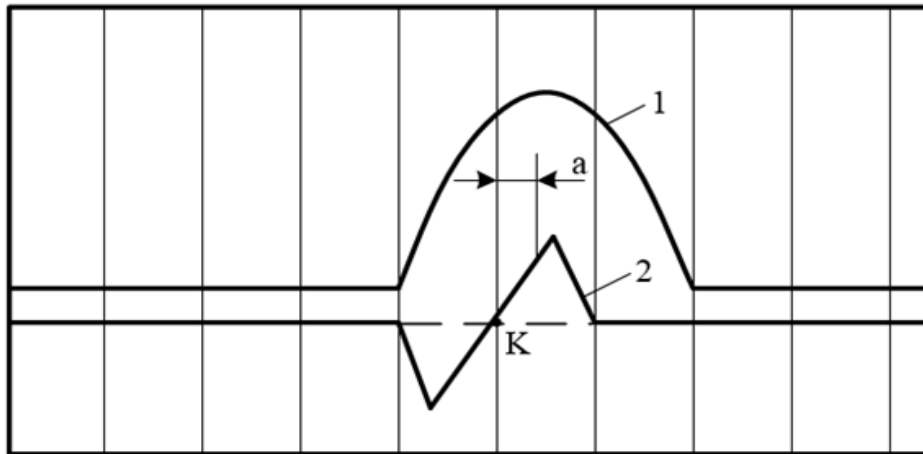


Рисунок 5. Пример оциллограммы с записью нормального давления колеса на почву (1) и положения центра колеса (2)

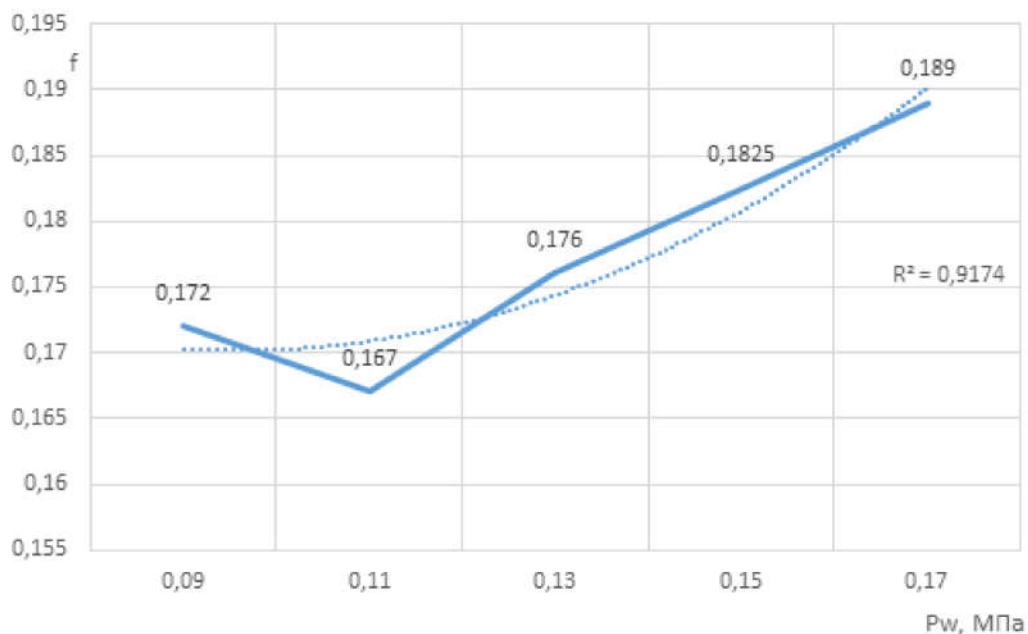


Рисунок 6. Зависимость коэффициента сопротивления качению колеса ( $f$ ) от давления воздуха в шине ( $P_w$ ).

стерне это давление равно 0,11 МПа.

**Заключение.** Предложенная методика для измерения удельных давлений является приемлемой для проведения исследований процессов взаимодействия движителя трактора с почвой. В отличие от существующих данная методика исключает нарушение почвенного слоя перед проходом трактора, поэтому снижается погрешность измерений удельных давлений.

Разработана методика определения коэффициента сопротивления качению тракторного колеса, который можно использовать одновременно с измерением удельного давления колеса на почву при

помощи тензометрических мембран, устанавливаемых непосредственно на шине колеса.

#### Список источников

1. Влияние ходовых систем тракторов на плодородие каштановых почв Бурятии / С.С. Калашников, Д.Н. Раднаев, А.С. Пехутов [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2022. № 6. С. 109-112. doi : 10.31857/2500-2082/2022/6/109-112. EDN : KDFEEE.

2. Калашников С.С., Пехутов А.С., Балданов М.Б. Оптимальное давление в шинах ходовых систем колесных тракторов // Устойчивое развитие сельских территорий и

аграрного производства на современном этапе : материалы международной научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки. Улан-Удэ, 07–11 февраля 2022 года. Улан-Удэ: Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова, 2022. С. 403-408. EDN : ISBRZU.

3. Научные основы склонового земледелия Бурятии : монография / А.П. Батудаев, О.А. Алтаева, Е.Э. Куклина, В.М. Коршунов. Улан-Удэ : Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова, 2014. 172 с. EDN : URGDML.

4. Особенности земледельческих территорий и научные рекомендации по агрономии / А.П. Батудаев, В.А. Соболев, М.Б. Батуева [и др.] // Рациональное использование почвенных и растительных ресурсов в экстремальных природных условиях : материалы научно-практической конференции, посвященной 70-летию агрономического факультета ФГБОУ ВО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова», Улан-Удэ, 17 июня 2022 года / под общей редакцией О.М. Цыбиковой. Улан-Удэ: Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова, 2022. С. 10-15. EDN : FUZRHV.

5. Ксеневиц И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. Москва : Агропромиздат, 1985. 304 с.

6. Бочаров Н.Ф. Транспортные средства на эластичных движителях. Москва : Машиностроение, 1974. 208 с.

7. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. Москва : Машиностроение, 1981. С. 51.

8. Анализ методов определения коэффициента сопротивления качению колёс автомобиля / В.И. Клименко, С.Н. Шуклинов, Д.Н. Леонтьев, А.В. Губин // Автомобильный транспорт. 2020. № 46. С. 33-39. doi : 10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.33. EDN : YQXDTR.

9. О физике процессов определяющих величину коэффициента сопротивления качению колеса автомобиля / Н.В. Сунцов, В.А. Макаров, А.Н. Сунцов, А.Н. Ефименко // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. 2011. № 2. С. 78-81. EDN : ONTPMB.

10. Теория автомобиля: Конспект лекций / А.Ш. Хусаинов, В.В. Селифонов. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 121 с.

## References

1. Kalashnikov S.S., Radnaev D.N., Pexutov A.S. [et al.] Influence of tractors undercarriage on the fertility of chestnut soils in Buryatia. *Vestnik of the Russian agricultural science*. 2022;6:109-112. doi : 10.31857/2500-2082/2022/6/109-112 (In Russ.)

2. Kalashnikov S.S., Pekhutov A.S., Baldanov M.B. Optimum trailing tire pressure wheeled tractors. *Sustainable development of rural areas and agricultural production at the present stage. Proc. of the Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the Day of Russian Science*. Ulan-Ude, February 07–11, 2022. Pp. 403-408 (In Russ.)

3. Batudaev A.P., Altaeva O.A., Kuklina E.E., Korshunov V.M. Scientific foundations of slope farming in Buryatia : Monograph. Ulan-Ude : Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov, 2014. 172 p. (In Russ.)

4. Batudaev A.P., Sobolev V.A., Bатуева M.B. [et al.]. Features of agricultural territories and scientific recommendations on agronomy. *Rational use of soil and plant resources in extreme natural conditions: Proc. of the Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 70th anniversary of the Agronomy Faculty of the Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov*. Ulan-Ude, June 17, 2022. Ulan-Ude, 2022. Pp. 10-15 (In Russ.)

5. Ksenevich I.P., Skotnikov V.A., Lyasko M.I. Running system – soil – harvest. Moscow. Agropromizdat, 1985. 304 p. (In Russ.)

6. Bocharov N.F. Vehicles on elastic movers. Moscow. Mashinostroenie, 1974. 208 p. (In Russ.)

7. Smirnov G.A. The theory of movement of wheeled vehicles. Moscow. Mashinostroenie, 1981. P. 51.

8. Klimenko V.I., Shuklinov S.N., Leontiev D.N., Gubin A.V. Analysis of methods for determining the coefficient of rolling resistance of vehicle wheels. *Automobile transport*. 2020;46:33-39. doi : 10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.33 (In Russ.)

9. Suntsov N.V., Makarov V.A., Suntsov A.N., Efimenko A. N. On the physics of processes that determine the value of the coefficient of rolling resistance of a car wheel. *Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2011;2:78-81 (In Russ.)

10. Khusainov A.Sh., Selifonov V.V. Theory of the car: Synopsis lecture. Ulyanovsk: UIGTU, 2008. 121 с. (In Russ.)

### Информация об авторах

**Сергей Сергеевич Калашников** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация сельскохозяйственных процессов»;

**Сергей Федотович Калашников** – старший преподаватель кафедры «Технический сервис в АПК и общеинженерные дисциплины»;

**Даба Нимаевич Раднаев** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механизация сельскохозяйственных процессов»;

**Виктор Алексеевич Петров** – аспирант кафедры «Механизация сельскохозяйственных процессов».

### Information about the authors

**Sergey S. Kalashnikov** – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Chair of Mechanization of Agricultural Processes;

**Sergey F. Kalashnikov** – senior lecturer, Chair of Technical service in the agro-industrial complex and general engineering disciplines;

**Daba N. Radnaev** – Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor, Chair of Mechanization of Agricultural Processes;

**Viktor A. Petrov** – post graduate student, Chair of Mechanization of Agricultural Processes.

Статья поступила в редакцию 02.02.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2023; принята к публикации 02.03.2023.

The article was submitted 02.02.2023; approved after reviewing 20.02.2023; accepted for publication 02.03.2023.