

Тип статьи: научная  
УДК 629.3.014  
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-3-85-91

## НАГРУЖЕННОСТЬ ВЕДУЩИХ КОЛЕС ТРАКТОРА В СОСТАВЕ КОМБИНИРОВАННОГО АГРЕГАТА

*Александр Николаевич Беляев*<sup>1</sup>, *Татьяна Владимировна Тришина*<sup>2</sup>,  
*Дмитрий Николаевич Афоничев*<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup> Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,  
г. Воронеж, Российская Федерация

<sup>1</sup>aifkm\_belyaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9195-7091>

<sup>2</sup>t.v.trishina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9976-979X>

<sup>3</sup>dmafonichev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

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

**Реферат.** *Нагруженность ведущих колес трактора в составе комбинированного агрегата исследовали. В качестве объекта исследования использовался энергонасыщенный универсально-пропашной трактор интегральной схемы класса 2 с ведущими сдвоенными колесами одинакового размера, выполняющий технологическую операцию в междурядьях пропашных культур в составе навесного широкозахватного комбинированного агрегата КРШ-8,1+НП-5,4+ЛТЗ-155+КРШ-8,1. Для определения выходных нагрузочных характеристик использовался метод тензометрирования, в качестве первичного источника сигнала применялись проволочные тензорезисторы на бумажной основе, а для оценки кинематических параметров – индуктивные бесконтактные датчики акселерометров и путеизмерительного колеса. Результаты обработки большого количества осциллограмм показали, что с увеличением поступательной скорости движения трактора суммарное тяговое усилие культиваторов также возрастает. Причина - повышение частот динамических воздействий сопротивления почвы на рабочие органы навесного оборудования и микропрофиля опорной поверхности на колеса трактора, причем, чем выше скорость, тем интенсивнее растет тяговое усилие. Установлено, что рост суммарного тягового усилия культиваторов приводит к возрастанию крутящего момента на колесах трактора, причем заднее навесное устройство и задний мост нагружаются больше передних на 15...20 %. По величине крутящего момента оцениваются тягово-энергетические показатели работы трактора в составе агрегата, и определяется коэффициент использования мощности двигателя. По значению мощности, затраченной на преодоление тягового усилия со стороны рабочего оборудования при выполнении той или иной технологической операции, можно оптимизировать комбинированный агрегат, как по скоростным, так и нагрузочным режимам. Получена зависимость коэффициента буксования колес от тягового усилия, которая позволяет не только определить величину и интенсивность буксования колес трактора, но и оценить тягово-сцепные свойства почвы, определяющие тяговые возможности сельскохозяйственного колесного трактора.*

**Ключевые слова:** колесный трактор, машинно-тракторный агрегат, ведущее колесо, крутящий момент, тяговое усилие, буксование, скорость движения.

## LOADING OF THE TRACTOR'S DRIVING WHEELS AS PART OF THE COMBINED UNIT

*Alexander Belyaev*<sup>1</sup>, *Tatiana Trishina*<sup>2</sup>, *Dmitry Afonichev*<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup> Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,  
Voronezh, Russian Federation

<sup>1</sup>aifkm\_belyaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9195-7091>

<sup>2</sup>t.v.trishina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9976-979X>

<sup>3</sup>dmafonichev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

**Abstract.** *The load on the driving wheels of the tractor as part of the combined unit was studied. Energy-saturated universal row-crop integrated circuit tractor of class 2 with driving twin wheels of the same size, performing a technological operation in the inter-rows of row crops as part of a mounted wide-cut combined unit KRSh-8.1+NP-5.4+LTZ-155+KRSh-8.1 was used as a research object. The strain gauge method was used to determine the output load characteristics; paper-based wire strain gauges were used as the primary signal source, and inductive non-contact accelerometer and track-measuring wheel sensors were used to evaluate kinematic parameters. The results of processing a large number of oscillograms showed that with an increase in the forward speed of the tractor, the total traction force of the cultivators also increases. The reason is an increase in the frequency of dynamic effects of soil resistance on the working parts of mounted equipment and the microprofile of the supporting surface on the tractor wheels, and the higher the speed, the more intense the traction force increases. It has been established that an increase in the total traction force of cultivators leads to an increase in torque on the wheels of the tractor, with the rear linkage and rear axle being loaded more than the front ones by 15...20%. Based on the torque value, the traction and energy performance of the tractor as part of the unit is assessed, and the engine power utilization factor is determined. Based on the amount of power expended to overcome the traction force from the working equipment when performing a particular technological operation, it is possible to optimize the combined unit, both in terms of speed and load modes. The dependence of the wheel slip coefficient on traction force was obtained, which allows not only to determine the magnitude and intensity of tractor wheel slip, but also to evaluate the traction properties of the soil, which determine the traction capabilities of an agricultural wheeled tractor.*

**Keywords:** *wheeled tractor, machine-tractor unit, driving wheel, torque, traction, slipping, speed of movement.*

**Для цитирования:** Беляев А.Н., Тришина Т.В., Афоничев Д.Н. Нагруженность ведущих колес трактора в составе комбинированного агрегата // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 69, № 3. С. 85-91. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-85-91>.

**For citation:** Belyaev A.N., Trishina T.V., Afonichev D.N. Loading of tractor driving wheels as part of a combined unit. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia: 2024; 69(3): 85-91. (In Russ.)* <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-85-91>.

**Введение.** Реализуемый двигателем трактора крутящий момент передается через трансмиссию на его ведущие колеса. Как правило, машинно-тракторные агрегаты (МТА) работают в условиях неустановившейся внешней нагрузки, то есть сила сопротивления качению колес  $P_f$  и сила тяги – крюковое усилие  $P_{кр}$  переменны во времени, это вызывает буксование колес и колебания вращающихся масс двигателя и трансмиссии, повышает интенсивность изменения и величины нагрузок не только на их детали и узлы, но и на почву. Поэтому оценку величин крутящих моментов  $M_{кр}$  на колесах трактора в составе МТА необходимо проводить с учетом их неравномерности и некоторой периодичности, свойственной тому или иному технологическому процессу [1], в отличие от принятых допущений о постоянстве крутящего момента двигателя при определении крутящих моментов на ведущих колесах [2, 3], что приводит к не корректным результатам.

Известные эмпирические зависимости для описания кривой буксования колес трактора  $\delta$  включают в себя, как правило, многочисленные опытные коэффициенты, что является причиной их ограниченного применения, так как они не являются достаточно надежными [2, 4].

Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы является экспериментальная оценка влияния внешних эксплуатационных факторов на формирование и изменение нагруженности ведущих колес трактора при выполнении технологической операции в условиях эксплуатации.

**Материалы и методы.** Использование комбинированных МТА на базе колесных тракторов с большой единичной мощностью позволяет не только повысить производительность, но и

получить более высокие технико-технологические показатели по сравнению с аналогичными машинами меньшего класса, что является перспективным направлением развития сельскохозяйственного производства [5, 6]. Поэтому в качестве объекта экспериментального исследования, на котором была апробирована, с учетом рекомендаций [1, 7, 8], методика испытаний, выбран энергонасыщенный универсально-пропашной трактор интегральной схемы класса 2 со всеми ведущими сдвоенными колесами одинакового размера [5, 8], выполняющий технологическую операцию в междурядьях пропашных культур в составе навесного широкозахватного комбинированного агрегата КРШ-8,1+НП-5,4+ЛТЗ-155+КРШ-8,1 (фронтальная и задняя навеска оборудования) [9]. Для определения выходных нагрузочных характеристик использовался метод тензометрирования, в качестве первичного источника сигнала при котором применялись проволочные тензорезисторы на бумажной основе, а для оценки кинематических параметров – индуктивные бесконтактные датчики акселерометров и путеизмерительного колеса [1, 10].

**Результаты и обсуждение.** Движение колесного сельскохозяйственного трактора при выполнении технологической операции осуществляется за счет взаимодействия движителя с опорной поверхностью, в результате которого вращение колеса преобразуется в поступательное прямолинейное движение машины. Так как качение колес трактора происходит в разных условиях как по особенностям взаимодействия с основанием (передние колеса движутся по рыхлой деформируемой почве, задние – по почве, укатанной передними колесами), так и по характеру реализации силового потенциала двигателя в виду колебаний и асимметрии действия внешней нагрузки со стороны рабочего оборудования, поэтому опытная проверка адекватности теоретических исследований работы колесного движителя трактора в составе МТА является актуальной задачей.

Результаты обработки большого количества осциллограмм, полученных при проведении экспериментов, показали, что с увеличением поступательной скорости движения трактора  $V$  суммарное тяговое усилие культиваторов  $P_{кр}$  также возрастает в виду повышения частот динамических воздействий сопротивления почвы на рабочие органы навесного оборудования и микропрофиля опорной поверхности на колеса трактора (рисунок 1). Причем, чем выше  $V$ , тем интенсивнее растет  $P_{кр}$ . Имеем следующую картину: при  $V=1,19$  м/с –  $P_{кр}=22,38$  кН, при  $V=1,43$  м/с –  $P_{кр}=22,6$  кН, при  $V=1,75$  м/с –  $P_{кр}=24,29$  кН.

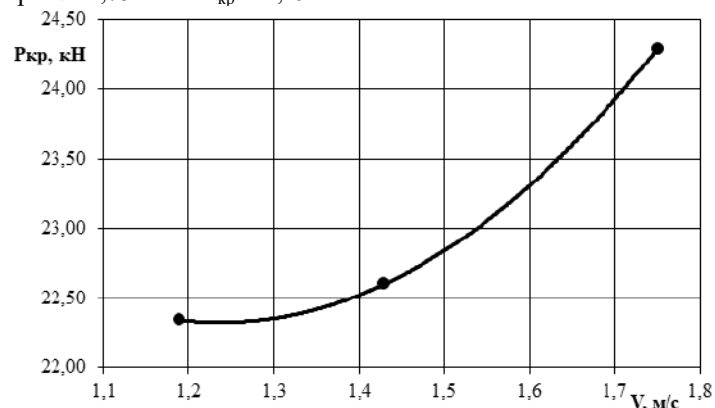


Рисунок 1 – Зависимость тягового усилия  $P_{кр}$  от поступательной скорости движения трактора  $V$

Выбор исследуемого диапазона скоростей поступательного движения  $V$  обусловлен требованиями, предъявляемыми к технологиям возделывания пропашных сельскохозяйственных культур, условиями обеспечения их не повреждения, ограниченными физиологическими возможностями человека при управлении машиной, когда необходимо следить за движением агрегата в междурядьях и успевать реагировать на его отклонения от требуемой траектории, а также снижением уровня воздействия на тракториста колебаний остова трактора [5].

Из-за роста  $P_{кр}$  увеличивается и крутящий момент  $M_{кр}$  на колесах трактора. На рисунке 2 представлена зависимость суммарных крутящих моментов  $M_{кр}$  от суммарной крюковой нагрузки  $P_{кр}$ . Если рассмотреть в разрезе мостов и навесного оборудования, то имеем, например, следующую картину: при  $V=1,43$  м/с по передним и задним навесным устройствам и мостам, соответственно:  $P_{кр.пер}=10,5$  кН,  $P_{кр.зад}=12,1$  кН и  $M_{кр.пер}=9,47$  кН·м,  $M_{кр.зад}=11,98$  кН·м.

По величине крутящего момента оцениваются тягово-энергетические показатели работы трактора в составе агрегата, и определяется коэффициент использования мощности двигателя. По значению мощности, затраченной на преодоление тягового усилия со стороны рабочего оборудования при выполнении той или иной технологической операции можно оптимизировать МТА, как по скоростным, так и нагрузочным режимам.

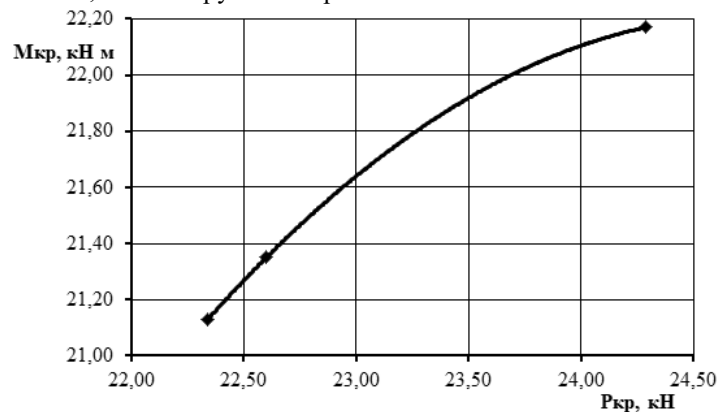


Рисунок 2 – Зависимость крутящих моментов на колесах трактора от тягового усилия навесного оборудования

Как известно [2, 4, 11, 12], при качении деформируемого колеса имеют место деформации грунта и шины, и по мере возрастания крутящих моментов зона сцепления колеса с почвой уменьшается, а зона скольжения растет. Как только момент достигает некоторого значения, все элементы шины в пятне контакта начнут скользить с разной скоростью, возникает процесс буксования – скольжение шины в пятне контакта в сторону противоположную направлению движения. При буксовании уменьшается скорость оси ведущего колеса из-за скольжения шины относительно основания во всех точках контакта в сторону обратную направлению движения. На рисунке 3 приведена кривая буксования – зависимость коэффициента буксования колес трактора  $\delta$  от тягового усилия  $P_{кр}$ .

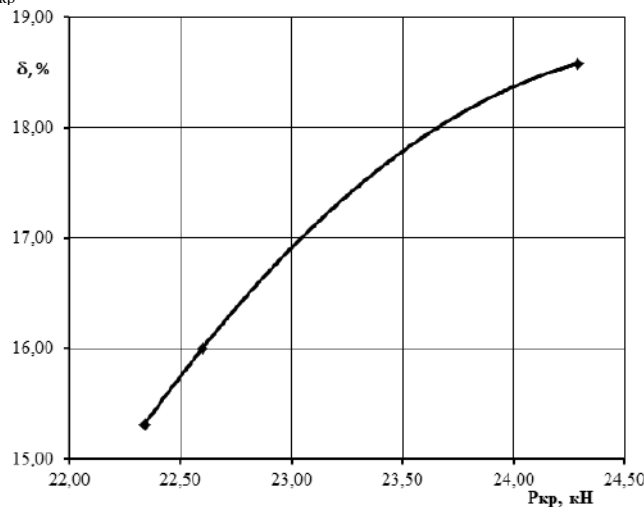


Рисунок 3 – Зависимость буксований колес трактора от тягового усилия навесного оборудования

Зависимость  $\delta = f(P_{кр})$  является наиболее простой, полной и удобной характеристикой оценки тягово-сцепных качеств трактора, например, для однотипных тракторов характеризующей также нормальную и тангенциальную прочность почвы. Кроме того, она учитывает влияние свойств почвы, формы, размеров и свойств сдвигающей поверхности, так как в данном случае в качестве сдвигающей поверхности выступает реальная площадь контакта движителей трактора с почвой.

Для сравнения: при прямолинейном движении в тех же условиях и на тех же скоростных режимах изучаемого МТА в транспортном положении при  $\delta=1...3\%$  получили:  $V=1,43$  м/с,  $V=1,67$  м/с и  $V=2,06$  м/с, а при культивации соответственно:  $V=1,19$  м/с,  $V=1,43$  м/с, и  $V=1,75$  м/с, что является следствием буксования колес в пределах  $15...19\%$  (рисунок 3). При этом в первом случае суммарный крутящий момент на колесах трактора изменяется в пределах  $M_{кр}=8,22...9,8$  кН·м, а во втором –  $M_{кр}=22,13...22,17$  кН·м.

#### **Выводы:**

1. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить функциональные зависимости между кинематическими и динамическими параметрами МТА и выявить причины, влияющие на их величины и характер изменения.

2. Экспериментально установлено, что с увеличением поступательной скорости движения трактора суммарное тяговое усилие культиваторов возрастает из-за повышения частот динамических воздействий сопротивления почвы на рабочие органы навесного оборудования и микропрофиля опорной поверхности на колеса трактора, чем выше скорость, тем интенсивнее растет суммарное тяговое усилие культиваторов.

3. Рост суммарного тягового усилия культиваторов приводит к возрастанию крутящего момента на колесах трактора, причем заднее навесное устройство и задний мост нагружаются больше передних на  $15...20\%$ .

4. Полученные экспериментальные зависимости крутящих моментов на колесах трактора от поступательной скорости движения и от силы тяги на крюке позволяют оценить энергоэффективность трактора и степень загрузки двигателя в реальных условиях эксплуатации.

5. Возрастание тягового усилия вызывает повышение коэффициента буксования колес трактора и как следствие – снижение скорости. Приведенная зависимость коэффициента буксования колес от тягового усилия позволяет не только определить величину и интенсивность буксования колес трактора, но и оценить тягово-сцепные свойства почвы, определяющие тяговые возможности сельскохозяйственного колесного трактора.

#### **Список источников**

1. Беляев А.Н. Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колесных тракторов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Беляев. Мичуринск-наукоград, 2019. 440 с.

2. Скотников В.А., Маценский А.А., Солонский А.С. Основа теории и расчет трактора и автомобиля. М.: Агропромиздат, 1986. 383 с.

3. Беляев А.Н., Афоничев Д.Н., Тришина Т.В. Распределение крутящих моментов по колесам трактора // Наука в Центральной России. 2022. № 2(56). С. 16–22. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-2-16-22.

4. Гуськов В.В, Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др. Тракторы: теория. М.: Машиностроение, 1988. 374 с.

5. Виноградов К.Н., Дурманов А.С., Киселев Н.И. и др. Обоснование параметров и конструкции универсально-пропашного трактора повышенной эффективности. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1978. 164 с.

6. Дурманов А.С., Коцарь Ю.А., Головащенко Г.А., Плужников С.В. Тракторы РТМ-160 и РТМ-160У. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание. Саратов: Научная книга, 2006. 352 с.

7. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных. М.: Колос, 1973. 194 с.

8. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Сельхозиздат, 1985. 352 с.

9. Агротехнические требования к 8-, 12-, 18-рядным культиваторам-растениепитателям для подготовки почвы к посеву и междурядной обработке низкостебельных пропашных культур. Сб. агротехнических требований на тракторы и сельхозмашины. Т. 30. М.: Машиностроение, 1982. С. 96–100.

10. Макаров Р.А., Ренский А.Б., Боркунский Г.Х., Этингоф М.И. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.

11. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

12. Беляев А.Н., Тришина Т.В., Афоничев Д.Н. Анализ боковых реакций почвы на колесах трактора при повороте [Электронный ресурс] // Resources and Technology. 2022. № 3, Т.19. С. 44–56. <URL: <https://rt.petrstu.ru/journal/article.php?id=6363>>. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6363.

### References

1. Belyaev A.N. Improving the efficiency of machine-tractor units based on integrated universal-rowed wheeled tractors: dis. ... Doctor of Technical Sciences: 05.20.01 / A.N. Belyaev. Michurinsk-naukograd, 2019. 440 p. (In Russ.)

2. Skotnikov V.A., Mashenskiy A.A., Solonsky A.S. The basis of theory and calculation of a tractor and a car. M.: Agropromizdat, 1986. 383 p. (In Russ.)

3. Belyaev A.N., Afonichev D.N., Trishina T.V. Distribution of torques on tractor wheels // *Nauka v Central'noj Rossii = Science in the Central Russia*. 2022. No. 2(56). pp. 16-22. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-2-16-22. (In Russ.)

4. Guskov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E. et al. Tractors: theory. M.: Mechanical engineering, 1988. 374 p. (In Russ.)

5. Vinogradov K.N., Durmanov A.S., Kiselyov N.I. and others. Substantiation of the parameters and design of a universal-tilled tractor of increased efficiency. Voronezh: Publishing House of the Voronezh State University, 1978. 164 p. (In Russ.)

6. Durmanov A.S., Kotsar Yu.A., Golovashchenko G.A., Pluzhnikov S.V. Tractors RTM-160 and RTM-160U. Construction, operation and maintenance. Saratov: Scientific book, 2006. 352 p. (In Russ.)

7. Vedenyapin G.V. General methodology of experimental research and processing of experimental data. M.: Kolos, 1973. 194 p. (In Russ.)

8. Dospikhov B.A. Methodology of field experience. M.: Agricultural publishing house, 1985. 352 p. (In Russ.)

9. Agrotechnical requirements for 8-, 12-, 18-row cultivators-plant feeders for preparing the soil for sowing and row-to-row processing of low-stemmed row crops. Collection of agrotechnical requirements for tractors and agricultural machinery. Vol. 30. M.: Mashinostroenie, 1982. pp. 96-100. (In Russ.)

10. Makarov R.A., Rensky A.B., Borkunsky G.H., Etingof M.I. Tensometry in mechanical engineering. Reference manual. M.: Mechanical engineering, 1975. 288 p. (In Russ.)

11. Smirnov G.A. Theory of motion of wheeled vehicles. 2nd ed., additional and revised. M.: Mashinostroenie, 1990. 352 p. (In Russ.)

12. Belyaev A.N., Trishina T.V., Afonichev D.N. Analysis of lateral soil reactions on tractor wheels when turning [Electronic resource] // Resources and Technology. 2022. No. 3, Vol. 19. pp. 44-56. <URL: <https://rt.petrstu.ru/journal/article.php?id=6363>>. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6363. (In Russ.)

### Информация об авторах

А. Н. Беляев – доктор технических наук, доцент; Т. В. Тришина – кандидат технических наук, доцент; Д. Н. Афоничев – доктор технических наук, профессор.

### Information about the authors

A. Belyaev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; T. Trishina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; D. Afonichev – Doctor of Technical Sciences, Professor.

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

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

*The authors declare no conflict of interest.*

Поступила в редакцию (Received): 10.05.2024      Принята к публикации (Accepted): 21.06.2024