

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.372

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_1_34

Методика оценки тягово-сцепных свойств трехосного полноприводного трактора и влияния его колебаний, воздействующих на оператора

Андрей Викторович Ворохобин^{1✉}, Юрий Федорович Устинов², Владимир Алексеевич Жулай³

¹Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия

^{2, 3}Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

¹dogruzka@rambler.ru✉

Аннотация. В настоящее время в связи с ростом энергонасыщенности сельскохозяйственных тракторов происходит повышение уровня колебаний, которые передаются от крюковой нагрузки на ведущие колеса и остова и негативно воздействуют на оператора транспортного средства. При этом тяговые свойства трактора снижаются, а условия работы оператора ухудшаются. Вследствие этого большой интерес представляет изучение вопроса о целесообразности производства трехосных полноприводных сельскохозяйственных тракторов. Для этой цели сотрудники Федерального научного агроинженерного центра ВИМ провели испытания трактора МТЗ с дополнительным ведущим мостом. Оборудование трактора МТЗ с дополнительным мостом позволяет третьему мосту копировать поверхность почвы в продольном и поперечном направлениях. Тяговые испытания проводились на поле, подготовленном под посев, стерне и снежной целине. Результаты исследований на вышеуказанных фонах показали, что тяговые свойства трактора МТЗ с дополнительным мостом удалось повысить соответственно на 58, 63 и 70%. Лучшие результаты показал опытный трехосный полноприводный трактор при догрузке третьего моста балластом 500 кг. Предложена методика оценки эффективности добавления третьего моста с учетом коэффициента использования сцепного веса, в основе которой лежит определение удельного показателя сравнения сцепных свойств тракторов, представляющего собой отношение буксования движителей соответственно двухосного и трехосного трактора для одного и того же значения коэффициента использования сцепного веса. Полученный удельный показатель позволяет сравнивать сцепные свойства тракторов с разным количеством ведущих осей без выравнивания их сцепных весов. Различия между экспериментальными и расчетными значениями удельных показателей сцепных свойств находятся в пределах 2–3%. Кроме того, установлено, что дополнительный третий мост гасит до 15–20% колебаний, передающихся от крюковой нагрузки на ведущие колеса и остова, а также оператора транспортного средства.

Ключевые слова: трактор, дополнительный ведущий мост, буксование, тягово-сцепные свойства, сцепной вес, вертикальные колебания

Для цитирования: Ворохобин А.В., Устинов Ю.Ф., Жулай В.А. Методика оценки тягово-сцепных свойств трехосного полноприводного трактора и влияния его колебаний, воздействующих на оператора // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 1(72). С. 34–39. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_34–39.

TECHNOLOGIES AND MECHANICAL MEANS IN AGRICULTURE (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Methodology for assessing traction and coupling capacity of a three-axle all-wheel drive tractor and the impact of its vibrations on the operator

Andrey V. Vorokhobin^{1✉}, Yuriy F. Ustinov², Vladimir A. Zhulai³

¹Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

^{2, 3}Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

¹dogruzka@rambler.ru✉

Abstract. Currently, due to the increase in the energy saturation of agricultural tractors, the level of vibrations is also increasing. These vibrations are transmitted from the hook bar assembly to the driving wheels and the frame and negatively affect the vehicle operator. At the same time, the tractor's traction capacity decreases, and the operator's working conditions become worse. As a result, it is of great interest to study the feasibility of producing three-axle all-wheel drive agricultural tractors. For this purpose, researchers of Federal Scientific Agroengineering Center VIM tested the MTZ tractor with an additional drive axle. Due to adding extra bridge into the MTZ tractor the third bridge copy the soil surface in the longitudinal and transverse directions. Traction tests were carried out on a field prepared

for sowing, on a stubble field and virgin snow. Study findings on the above backgrounds showed that the traction capacity of the MTZ tractor with an additional bridge increased by 58, 63 and 70%, respectively. Performance indicators of three-axle all-wheel drive tractor were the best when the third bridge was loaded with 500 kg ballast. A method is proposed for estimation of efficiency of the third bridge, taking into account the coefficient of use of hitch weight, which is based on the determination of the specific indicator for comparing the coupling capacity of tractors, which is the ratio of the slipping of the movers of a two-axle and three-axle tractors, respectively, for the same value of the coefficient of use of the hitch weight. The obtained specific indicator makes it possible to compare the coupling capacity of tractors with different number of driving axles without leveling their hitch weights. Differences between experimental and calculated values of specific indicators of coupling capacity are in the range of 2-3%. It was found that the additional third bridge dampens up to 15-20% of vibrations transmitted from the hook load to the driving wheels and the frame, as well as the vehicle operator.

Keywords: tractor, additional drive axle, slipping, traction and coupling capacity, hitch weight, vertical vibrations

For citation: Vorokhobin A.V., Ustinov Yu.F., Zhulai V.A. Methodology for assessing traction and coupling capacity of a three-axle all-wheel drive tractor and the impact of its vibrations on the operator. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(1):34-39. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_34-39.

Последние годы в мировом тракторостроении отмечен стремительный рост энергонасыщенности сельскохозяйственных тракторов при одновременном изменении количественного соотношения между гусеничными и колесными тракторами в пользу последних [4, 6, 7, 8].

Однако наряду с общеизвестными преимуществами, вытекающими из этого процесса, есть и негативные явления, главными из которых являются недостаточные сцепные свойства для реализации мощности двигателя при работе на пониженных скоростях, даже для тракторов с колесной формулой 4К4. Кроме того, возникают повышенные колебания от крюковой нагрузки, которые передаются на ведущие колеса и остов и негативно воздействуют на оператора транспортного средства. В этой связи представляют большой интерес исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на изучение вопроса о целесообразности применения трехосных полноприводных тракторов [1, 5, 9, 10].

Помимо этого, в настоящее время возникли противоречия между требованиями агротехники и тяговой концепцией трактора.

Для повышения производительности машинно-тракторного агрегата можно использовать следующие способы:

- увеличение ширины захвата сельскохозяйственных машин;
- повышение скорости движения;
- совмещение операций, применение комбинированных агрегатов и др.

При реализации вышеуказанных способов возникают определенные трудности:

- скорость движения зачастую ограничивается агротехническими требованиями;
- применение широкозахватных комбинированных агрегатов приводит к увеличению ширины захвата, удельного сопротивления рабочих машин и уплотнению почвы;
- возможности дальнейшего роста коэффициента использования сцепного веса трактора близки к полному исчерпанию, а увеличение веса машинно-тракторных агрегатов ведет к нарушению требований агротехники.

Все это обуславливает необходимость создания дополнительной движущей силы агрегатов, а также активизации его технологической части. Способами реализации дополнительной движущей силы могут быть:

- использование привода вала отбора мощности (ВОМ) тракторов опорных колес рабочих машин (например, плугов или прицепов);
- применение в технологических машинах рабочих органов – движителей, что обеспечивает снижение удельного сопротивления;
- пристыковка к трактору на жесткой или шарнирной основе дополнительной технологической тележки (дополнительного ведущего моста) с активно приводными колесами через синхронный ВОМ.

Таким образом, исследование эффективности применения дополнительного ведущего моста к тракторам классической компоновочной схемы представляет интерес.

С целью изучения влияния числа ведущих осей на тягово-сцепные показатели тракторов в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ совместно с Минским тракторным заводом разработано специальное приспособление для подсоединения к трактору МТЗ дополнительного ведущего моста [2, 3]. Соединение дополнительного ведущего моста с трактором осуществляется через шарнирное устройство, позволяющее ему копировать поверхность почвы в продольном и поперечном направлениях. К месту крепления коробки передач третьего моста присоединен одноступенчатый редуктор с муфтой свободного хода, обеспечивающий автоматическое включение колес третьего моста в работу при 2–3% буксовании колес второго моста.

Тяговые испытания трактора с дополнительным ведущим мостом в сравнении с трактором без моста проводились на следующих почвенных фонах: поле, подготовленное под посев, стерня и снежная целина. Эксплуатационный сцепной вес опытного трактора без моста был равен 3450 кг, а трехосного трактора-макета – 5300 кг [2, 3]. Лучшие тягово-мощностные показатели макета отмечены на всех фонах при догрузке третьего моста балластом 500 кг.

Рассмотрим методику оценки эффективности использования третьего моста с учетом коэффициента использования сцепного веса. В качестве критерия оценки улучшения сцепных свойств трактора принято относительное увеличение тягового усилия трактора-макета по сравнению с серийным трактором [5]

$$K_p = \frac{P_{кр.н.м}}{P_{кр.н}}, \quad (1)$$

где $P_{кр.н.м}$ – номинальное тяговое усилие трактора-макета;

$P_{кр.н}$ – номинальное тяговое усилие серийного трактора.

Относительное увеличение тягового усилия трактора-макета по сравнению с серийным трактором составило:

- на стерне – 58%;
- на поле, подготовленном под посев, – 63%;
- на снежной целине – 70% [2, 3].

Предлагаемая методика позволяет сравнивать значения суммарного улучшения тяговых показателей трактора-макета с показателями серийного образца, так как это улучшение достигнуто не только за счет установки третьего ведущего моста, но и за счет значительного увеличения сцепного веса. Кроме того, выявлено, что на 15–20% снижаются колебания, которые передаются на ведущие колеса и остов трактора и негативно воздействуют на оператора.

Для определения степени улучшения тягово-сцепных свойств и снижения вертикальных колебаний, действующих на оператора, от применения третьего ведущего моста необходимо сравнивать кривые буксования трехосного трактора-макета и серийного трактора, построенные не в функции силы тяги, а в функции коэффициента использования сцепного веса [5]

$$\varphi_{кр} = \frac{P_{кр}}{G_{сц}}, \quad (2)$$

где $P_{кр}$ – тяговое усилие трактора;

$G_{сц}$ – сцепной вес трактора.

Для сравнения тягово-сцепных свойств трехосного и двухосного полноприводных тракторов рассмотрим следующее выражение для определения тягового усилия трактора, предложенного в работе [5]:

$$P_{кр} = F\tau_{max} \left(1 - \frac{k}{\delta l} \left(1 - e^{-\frac{\delta l}{k}} \right) \right), \quad (3)$$

где F – площадь контакта движителей с грунтом;

l – длина контакта движителей с грунтом;

τ_{max} – максимальное касательное напряжение сдвига;

e – основание натурального логарифма;

K – постоянная, характеризующая изменение формы характеристики сдвига.

Раскладывая показательную функцию в ряд Тейлора и ограничиваясь первыми тремя членами разложения, получим

$$P_{кр} = \frac{\delta Fl\tau_{max}}{2K}. \quad (4)$$

Считая опорную поверхность колеса прямоугольником с длиной l и шириной b , найдем, что $F = 2bl$. С учетом этого выражение (4) принимает следующий вид:

$$\varphi_{кр} = \frac{\delta\tau_{max} bl^2}{KG_{ц}}. \quad (5)$$

Улучшение сцепных свойств от введения третьего ведущего моста можно оценить отношением тангенсов углов наклона прямолинейных участков зависимостей $\delta = f(\varphi_{кр})$ соответственно для двухосного и трехосного тракторов

$$\psi = \frac{\operatorname{tg}\alpha_2}{\operatorname{tg}\alpha_3} = \frac{\delta_2}{\delta_3}, \quad (6)$$

где ψ – удельный показатель сравнения сцепных свойств;

δ_2 и δ_3 – буксование движителей соответственно двухосного и трехосного тракторов для одного и того же значения $\varphi_{кр}$ на прямоугольном участке зависимостей $\delta = f(\varphi_{кр})$ (в дальнейшем индекс 2 относится к двухосному трактору, а индекс 3 – к трехосному).

Для произвольно взятого значения $\varphi_{кр}$ на прямолинейном участке кривой $\delta = f(\varphi_{кр})$ можно записать с учетом выражения (5):

$$\frac{\delta_2 b_2 l_2^2}{G_{ц 2}} = \frac{\delta_3 b_3 l_3^2}{G_{ц 3}}. \quad (7)$$

Принимая ширину шин b одинаковой для всех колес, получим

$$\psi = \frac{\delta_2}{\delta_3} = \frac{l_3^2 G_{ц 2}}{l_2^2 G_{ц 3}} \approx 2,25 \frac{G_{ц 2}}{G_{ц 3}}. \quad (8)$$

Для варианта использования трактора на стерне удельный показатель сравнения сцепных свойств, подсчитанный по формуле (8), будет равен 1,46.

$$\psi = 2,25 \cdot \frac{3450}{5300} = 1,46.$$

Значения удельных показателей сравнения сцепных свойств трактора от введения третьего моста при работе на различных почвенных фонах приведены в таблице.

Расчетные значения удельных показателей сравнения сцепных свойств трактора от введения третьего моста

Почвенный фон	Удельный показатель сравнения сцепных свойств
Поле, подготовленное под посев	1,41
Стерня	1,46
Снежная целина	1,53

Различия между экспериментальными и расчетными значениями удельных показателей сравнения сцепных свойств составляют 2–3%, т. е. находятся в пределах погрешности эксперимента, что позволяет считать сходимость удовлетворительной.

В пределах прямолинейного участка кривой буксования можно с достаточной для практики точностью прогнозировать сцепные свойства трехосного трактора по данным тяговой характеристики двухосного трактора, если известны их сцепные веса, а шины однотипны. Рассмотренный удельный показатель позволяет сравнивать сцепные свойства тракторов с разным количеством ведущих осей без выравнивания их сцепных весов.

Таким образом, на основании результатов исследований можно сделать вывод, что за счет демпфирующих свойств дополнительного третьего моста вертикальные колебания от крюковой нагрузки, передающиеся на ведущие колеса и остов и негативно воздействующие на оператора транспортного средства, снижаются на 15–20%.

Список источников

1. Занько Н.Г., Малаян К.Р., Русак О.Н. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 667 с.
2. Кабаков Н.С., Чурсин Л.И., Рожков Е.С. Тяговые показатели трактора МТЗ-52 с приставным ведущим мостом // Тракторы и сельхозмашины. 1970. № 11. С. 39–40.
3. Кабаков Н.С., Чурсин Л.И. Тяговые показатели трактора-макета с тремя ведущими мостами в зимних условиях // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1970. № 12. С. 13–14.
4. Кононов А.М. О реализации тяги и проходимости универсальных энергонасыщенных тракторов класса 1.4 // Тракторы и сельхозмашины. 1974. № 6. С. 1–3.
5. Поливаев О.И., Ворохобин А.В. Теория тракторов и автомобилей: учебник. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 232 с.
6. Поливаев О.И., Иванов В.П. Повышение тягово-динамических свойств МЭС за счет совершенствования приводов ведущих колес: монография. Москва: Русайнс, 2021. 184 с.
7. Поливаев О.И., Костиков О.М., Ворохобин А.В., Ведринский О.С. Конструкция тракторов и автомобилей: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 282 с.
8. Поливаев О.И., Костиков О.М. Испытание сельскохозяйственной техники и энергосиловых установок: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2017. 280 с.
9. Синяков В.Г. Оценка условий труда операторов на тракторах // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1991. № 10. С. 23–25.
10. Халфин М.А., Халфин С.М. Условия труда на сельскохозяйственных тракторах // Техника и оборудование для села. 1990. № 10. С. 3–5.

References

1. Zan'ko N.G., Malayan K.R., Rusak O.N. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Uchebnik dlya vuzov [Life safety. Textbook for higher education]. Saint Petersburg: Lan' Press; 2012. 667 p. (In Russ.).
2. Kabakov N.S., Chursin L.I., Rozhkov E.S. Tyagovye pokazateli traktora MTZ-52 s pristavnym vedushchim mostom [Traction indicators of the MTZ-52 tractor with an attached drive axle]. *Traktory i sel'khoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 1970;11:39-40. (In Russ.).
3. Kabakov N.S., Chursin L.I. Tyagovye pokazateli traktora-maketa s tremya vedushchimi mostami v zimnikh usloviyakh [Traction characteristics of a model tractor with three driving axles in winter conditions]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya socialisticheskogo sel'skogo khozyajstva = Agricultural Engineering and Farm Electrification*. 1970;12:13-14. (In Russ.).
4. Kononov A.M. O realizatsii tyagi i prokhozimosti universal'nykh energonasyschennykh traktorov klassa 1.4 [On the realization of traction and flotation of universal energy-saturated 1.4 class tractors]. *Traktory i sel'khoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 1974;6:1-3. (In Russ.).
5. Polivaev O.I., Vorokhobin A.V. Teoriya traktorov i avtomobilej. Uchebnik [Theory of tractors and automobiles. Textbook]. Saint Petersburg: Lan' Press; 2021. 232 p. (In Russ.).
6. Polivaev O.I., Ivanov V.P. Povyshenie tyagovo-dinamicheskikh svojstv MES za schet sovershenstvovaniya privodov vedushchikh koles: monografiya [Increasing traction-dynamic properties of the mobile energy unit (MEU) by improving the drive wheels. Monograph. Moscow: Rusains Press; 2021. 184 p. (In Russ.).
7. Polivaev O.I., Kostikov O.M., Vorokhobin A.V., Vedrinsky O.S. Konstruktsiya traktorov i avtomobilej. Uchebnoe posobie [Construction of tractors and cars. Study guide]. Saint Petersburg: Lan' Press; 2020. 282 p. (In Russ.).
8. Polivaev O.I., Kostikov O.M. Ispytanie sel'skokhozyajstvennoj tekhniki i energo-silovykh ustanovok. Uchebnoe posobie [Testing of agricultural machinery and energy power plants. Study guide]. Saint Petersburg: Lan' Press; 2017. 280 p. (In Russ.).
9. Sinyakov V.G. Otsenka uslovij truda operatorov na traktorakh [Assessment of the working conditions of operators of tractors]. *Traktory i sel'khoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*. 1991;10:23-25. (In Russ.).
10. Khalfin M.A., Khalfin S.M. Usloviya truda na sel'skokhozyajstvennykh traktorakh [Working conditions of agricultural tractors]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 1990;10:3-5. (In Russ.).

Информация об авторах

A.V. Ворохобин – кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dogruzka@rambler.ru.

Ю.Ф. Устинов – доктор технических наук, профессор кафедры строительной техники и инженерной механики им. профессора Н.А. Ульянова ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ustinov@vgasu.vrn.ru.

В.А. Жулай – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой строительной техники и инженерной механики им. профессора Н.А. Ульянова ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», zhulai@vgasu.vrn.ru.

Information about the authors

A.V. Vorokhobin, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dogruzka@rambler.ru.

Yu.F. Ustinov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Construction Equipment and Engineering Mechanics named after Professor N.A. Ulyanov, Voronezh State Technical University, Ustinov@vgasu.vrn.ru.

V.A. Zhulai, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Dept. of Construction Equipment and Engineering Mechanics named after Professor N.A. Ulyanov, Voronezh State Technical University, zhulai@vgasu.vrn.ru.

Статья поступила в редакцию 16.02.2022; одобрена после рецензирования 21.03.2022; принята к публикации 26.03.2022.

The article was submitted 16.02.2022; approved after revision 21.03.2022; accepted for publication 26.03.2022.

© Ворохобин А.В., Устинов Ю.Ф., Жулай В.А., 2022