

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРАКТОРНО-ТРАНСПОРТНЫХ АГРЕГАТОВ КОРРЕКТИРОВАНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НАГРУЗОК НА КОЛЕСА

---

**Андрей Викторович Ворохобин**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры тракторов и автомобилей

**Оксана Вячеславовна Лещёва**, магистрант кафедры тракторов и автомобилей

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Целью исследования является повышение эффективности использования тракторно-транспортных агрегатов корректированием вертикальных нагрузок на колеса. Объект исследования – тракторно-транспортный агрегат, оборудованный устройством для корректирования вертикальных нагрузок на колеса. Представлены результаты теоретических исследований по повышению производительности тракторно-транспортных агрегатов корректированием вертикальных нагрузок на колеса. Получена зависимость, выражающая функциональную связь между производительностью тракторно-транспортного агрегата и факторами, учитывающими тягово-сцепные свойства трактора и грузоподъемности агрегируемого с трактором прицепа, при котором тракторно-транспортный агрегат будет работать с максимальной производительностью. Для оценки эффективности корректирования вертикальных нагрузок введен коэффициент изменения производительности. Получены графические зависимости производительности тракторно-транспортного агрегата от грузоподъемности при разной степени корректирования вертикальных нагрузок с учетом полной загрузки двигателя трактора (трактор работает на потенциальной тяговой характеристике). Теоретическими расчетами установлено, что увеличение сцепного веса за счет корректирования вертикальных нагрузок приводит к повышению грузоподъемности тракторного прицепа и к увеличению производительности тракторно-транспортного агрегата. Так, выявлено, что при движении колесного трактора 4K4a по стерне с повышенной влажностью увеличение на 20% его сцепного веса снижает буксование ведущих колес на 6% и дает возможность увеличить на 38% грузоподъемность прицепа, что в конечном счете (с учетом снижения на 23% скорости движения тракторно-транспортного агрегата) позволяет повысить производительность на 6%. Похожие результаты получены и на почвенном фоне – грунтовая дорога после дождя. В целом предлагаемая теоретическая модель позволяет определять рациональное значение грузоподъемности тракторного прицепа с учетом корректирования вертикальных нагрузок на колеса тракторно-транспортного агрегата при движении в различных дорожных условиях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трактор, тракторно-транспортный агрегат, грузоподъемность, сцепной вес, вертикальные реакции, корректирование, тягово-сцепные свойства.

The objective of studies was to improve the efficiency of using tractor-transport units by adjusting the vertical loads on wheels. The object of research is a tractor-transport unit equipped with a device for adjusting the vertical loads on wheels. The authors present the results of theoretical studies of improving the performance of tractor-transport units by adjusting the vertical loads on wheels. The authors have obtained a dependence, which expresses the functional relationship between the performance of a tractor-transport unit and the factors accounting for traction characteristics of the tractor and trailer load capacity. This allows determining the load of trailer carried by the tractor that will ensure the maximum performance of the tractor-transport unit in specific traffic conditions. To evaluate the effectiveness of vertical load adjustment the authors adopted a coefficient of performance changes and obtained graphic dependencies of the performance of a tractor-transport unit from carrying capacity at various degrees of vertical load adjustment taking into account the full load of tractor engine (the tractor is operating at a potential traction characteristic). By theoretical calculations it was found that the increase in adhesive weight due to vertical load adjustment leads to the increase in load capacity of tractor trailer and improved performance of the tractor-transport unit. For instance, the authors revealed that when the 4K4a wheeled tractor moved in the stubble with high air humidity, an increase in its adhesive weight by 20% reduced the traction wheel slipping by 6% and allows increasing the carrying capacity of the trailer by 38%, which eventually (taking into account the reduction of movement speed of the tractor-transport unit by 23%) allows improving the performance by 6%.

Similar results were also obtained on the soil background (soil road after rain). In general the proposed theoretical model allows determining the reasonable value of tractor trailer load capacity taking into account the adjustment of vertical loads on the wheels of the tractor-transport unit moving in various road conditions.

**KEY WORDS:** tractor, tractor-transport unit, load capacity, adhesive weight, vertical reactions, adjustment, traction characteristics.

**В**ведение. В современных условиях эксплуатации колесными универсально-пропашными тракторами выполняется не малый объем транспортных работ. По данным ряда исследователей [1, 2], этот объем достигает 60% и более. Производительность тракторно-транспортных агрегатов (ТТА) зависит от многих факторов, а именно: мощность двигателя, почвенно-климатические условия, тягово-сцепные свойства, грузоподъемность прицепа и др.

Все перечисленные факторы взаимосвязаны между собой. Так, например, движение по дорогам с низкой несущей способностью приводит к тому, что из-за повышенного буксования ведущих колес трактора недоиспользуется мощность двигателя, в результате чего возникает необходимость ограничивать грузоподъемность агрегируемого прицепа, а это, в свою очередь, ведет к снижению производительности и топливной экономичности ТТА.

Специфика тракторно-транспортных перевозок состоит в большой номенклатуре грузов, разнообразии дорожно-полевых условий, широких пределах изменения параметров, характеризующих состояние поверхности движения и др. [5].

**Целью исследования** является повышение эффективности использования тракторно-транспортных агрегатов корректированием вертикальных нагрузок на колеса.

**Объект исследования** – тракторно-транспортный агрегат, оборудованный устройством для корректирования вертикальных нагрузок на колеса.

Одно из направлений повышения эффективности использования ТТА, особенно при работе в условиях низкой несущей способности дороги, является корректирование вертикальных нагрузок на колеса [1, 2, 3]. Особенностью такого корректирования является то, что для повышения тягово-сцепных свойств трактора используется вес технологической части машинно-тракторного агрегата (МТА). В частности, в работе [3] приведены результаты исследования тягово-догружающего устройства, которое осуществляет перенос части веса с агрегируемого двухосного прицепа на задние ведущие колеса трактора [4].

Доказана эффективность использования предлагаемого устройства прежде всего в отношении снижения буксования ведущих колес трактора, повышения его действительной скорости и, как следствие, повышения производительности ТТА. Таким образом, производительность транспортного агрегата повышается за счет увеличения скорости движения. Однако учитывая то, что тракторно-транспортные операции зачастую приходится выполнять по полевым неровным дорогам, которые становятся труднопроходимыми в периоды осенне-весенней распутицы, повышение производительности ТТА за счет увеличения скорости движения не всегда возможно. Поэтому следует рассмотреть вариант повышения производительности ТТА за счет увеличения грузоподъемности прицепа. В связи с этим необходимо определить влияние рассматриваемого корректирования вертикальных нагрузок на грузоподъемность прицепа.

Для транспортного агрегата производительность может быть определена как

$$W = M \cdot V_p \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $M$  – масса перевозимого груза, т;

$V_p$  – рабочая скорость движения, км/ч;

$\tau$  – коэффициент использования времени смены.

После преобразований для теоретической производительности ( $\tau = 1$ ) получим

$$W = \frac{N_e \cdot \eta_{\text{тяг}}}{f_{\text{нр}}} \cdot C_W, \quad (2)$$

где  $N_e$  – эффективная мощность двигателя, кВт;

$\eta_{\text{тяг}}$  – тяговый КПД;

$f_{\text{нр}}$  – коэффициент перекаtywания колес прицепа;

$C_W$  – коэффициент размерности, т · км/ кВт · ч.

Известно, что тяговый КПД можно представить как произведение трех составляющих КПД [6]

$$\eta_{\text{тяг}} = \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\delta} \cdot \eta_f, \quad (3)$$

где  $\eta_{\text{тр}}$  – КПД, учитывающий потери в трансмиссии;

$\eta_{\delta}$  – КПД, учитывающий потери на буксование;

$\eta_f$  – КПД, учитывающий потери на перекаtywание.

Проведя ряд преобразований, выражение для тягового КПД можно записать как

$$\eta_{\text{тяг}} = \eta_{\text{тр}} \cdot (1 - \delta) \cdot \frac{G_{\text{нр}} \cdot f_{\text{нр}}}{G_{\text{нр}} \cdot f_{\text{нр}} + G_{\text{тр}} \cdot f_{\text{тр}}}. \quad (4)$$

Для определения коэффициента буксования воспользуемся аналитическим выражением, предложенным в работе [7]

$$\delta = \frac{K \cdot p}{(1 - (1 - K) \cdot p^n)}, \quad (5)$$

где  $p$  – отношение текущего значения  $P_{\text{кр}}$  к значению  $P_{\text{кр. max}}$ , соответствующего полному буксованию двигателя;

$K$  – угловой коэффициент касательной, проведенной из начала координат к кривой буксования;

$n$  – показатель степени.

Величину  $p$  представим как отношение

$$p = \frac{\varphi_{\text{кр}}}{\varphi_{\text{кр. max}}}, \quad (6)$$

где  $\varphi_{\text{кр}}$  – текущее значение коэффициента использования сцепного веса трактора;

$\varphi_{\text{кр. max}}$  – текущее значение коэффициента использования сцепного веса трактора, соответствующее полному буксованию.

Величину  $\varphi_{\text{кр}}$  можно выразить как

$$\varphi_{\text{кр}} = \frac{P_{\text{кр}}}{G_{\text{тр}}}. \quad (7)$$

Таким образом, подставляя выражения (6) и (7) в формулу (5), получим

$$\delta = \frac{k \cdot \left( \frac{P_{\text{кр}}}{\varphi_{\text{кр. max}} \cdot G_{\text{тр}}} \right)}{1 - (1 - k) \cdot \left( \frac{P_{\text{кр}}}{\varphi_{\text{кр. max}} \cdot G_{\text{тр}}} \right)^n}. \quad (8)$$

После преобразования

$$\delta = \frac{A \cdot \left( \frac{P_{кр}}{G_{мп}} \right)}{1 - B \cdot \left( \frac{P_{кр}}{G_{мп}} \right)^C}, \quad (9)$$

где  $A, B, C$  – постоянные коэффициенты для соответствующих почвенных условий. С учетом того, что  $P_{кр} = G_{мп} \cdot f_{мп}$ , имеем

$$\delta = \frac{A \cdot \left( \frac{G_{мп} \cdot f_{мп}}{G_{мп}} \right)}{1 - B \cdot \left( \frac{G_{мп} \cdot f_{мп}}{G_{мп}} \right)^C}. \quad (10)$$

Получаем следующее выражение для определения тягового КПД:

$$\eta_{тяг} = \eta_{мп} \cdot \left( 1 - \frac{A \cdot \left( \frac{G_{мп} \cdot f_{мп}}{G_{мп}} \right)}{1 - B \cdot \left( \frac{G_{мп} \cdot f_{мп}}{G_{мп}} \right)^C} \right) \cdot \frac{G_{мп} \cdot f_{мп}}{G_{мп} \cdot f_{мп} + G_{мп} \cdot f_{мп}}. \quad (11)$$

С учетом выражения (11) получаем формулу для производительности ТГА

$$W = N_e \cdot \eta_{мп} \cdot \left( 1 - \frac{A \cdot \left( \frac{G_{мп} \cdot f_{мп}}{G_{мп}} \right)}{1 - B \cdot \left( \frac{G_{мп} \cdot f_{мп}}{G_{мп}} \right)^C} \right) \cdot \frac{G_{мп} \cdot f_{мп}}{G_{мп} \cdot f_{мп} + G_{мп} \cdot f_{мп}} \cdot \frac{1}{f_{мп}} \cdot C_W. \quad (12)$$

Для определения функциональной зависимости между производительностью ТГА и грузоподъемностью прицепа необходимо найти зависимость между весом прицепа и его грузоподъемностью ( $G_{мп} = f(Q_{мп})$ ).

Эту зависимость получим из технических характеристик различных двухосных прицепов, взятых из каталога сельскохозяйственной техники. На основании аппроксимации этих данных получено следующее выражение:

$$G_{мп} = (a + v \cdot Q_{мп}) \cdot g, \quad (13)$$

где  $a$  и  $v$  – постоянные коэффициенты.

Применительно к различным маркам прицепов (прицепы САРМАТ и др.) эти коэффициенты равны:  $a = 0,2356$ ,  $v = 0,5870$ .

Выражение для производительности представим следующим образом:

$$W = \left( \frac{N_e \cdot \eta_{mp} \cdot (a + v \cdot Q_{np}) \cdot g \cdot f_{np}}{(a + v \cdot Q_{np}) \cdot g \cdot f_{np} + M_{mp} \cdot g \cdot f_{mp}} - \frac{N_e \cdot \eta_{mp} \cdot A \cdot \left( \frac{(a + v \cdot Q_{np}) \cdot g \cdot f_{np}}{M_{mp} \cdot g} \right) \cdot (a + v \cdot Q_{np}) \cdot g \cdot f_{np}}{(1 - B \cdot \left( \frac{(a + v \cdot Q_{np}) \cdot g \cdot f_{np}}{M_{mp} \cdot g} \right)^C) \cdot ((a + v \cdot Q_{np}) \cdot g \cdot f_{np} + M_{mp} \cdot g \cdot f_{mp})} \right) \cdot \frac{1}{f_{np}} \cdot C_W \quad (14)$$

Полученная зависимость представляет собой функциональную связь между производительностью ТТА и факторами, учитывающими тягово-сцепные свойства трактора и грузоподъемность прицепа. Оно позволяет определить для конкретных условий движения значение грузоподъемности агрегируемого с трактором прицепа, при котором ТТА будет работать с максимальной производительностью.

Определим производительность ТТА в разных почвенных условиях, при разной степени корректирования вертикальных нагрузок и при переменной грузоподъемности с учетом работы трактора на потенциальной тяговой характеристике, т.е. при его наибольших тягово-скоростных показателях.

Для оценки эффективности корректирования вертикальных нагрузок примем коэффициент изменения производительности, полученный на основе преобразования уравнения (1)

$$K_W = \frac{W_{Г.Д.}}{W_0} = K_Q \cdot K_V, \quad (15)$$

где  $W_{Г.Д.}$ ,  $W_0$  – производительность ТТА с корректированием и без него;

$K_Q$  – коэффициент, учитывающий изменение грузоподъемности прицепа

$$(K_Q = \frac{Q_{Г.Д.}}{Q_0});$$

$K_V$  – коэффициент, учитывающий изменение скорости движения ТТА

$$(K_V = \frac{V_{Г.Д.}}{V_0});$$

$V_{Г.Д.}$ ,  $Q_{Г.Д.}$ ,  $V_0$ ,  $Q_0$  – скорость движения ТТА и грузоподъемность прицепа при корректировании и без него.

Проведем расчет на примере универсально-пропашного трактора с колесной схемой 4К4а для следующих вариантов изменения сцепного веса:

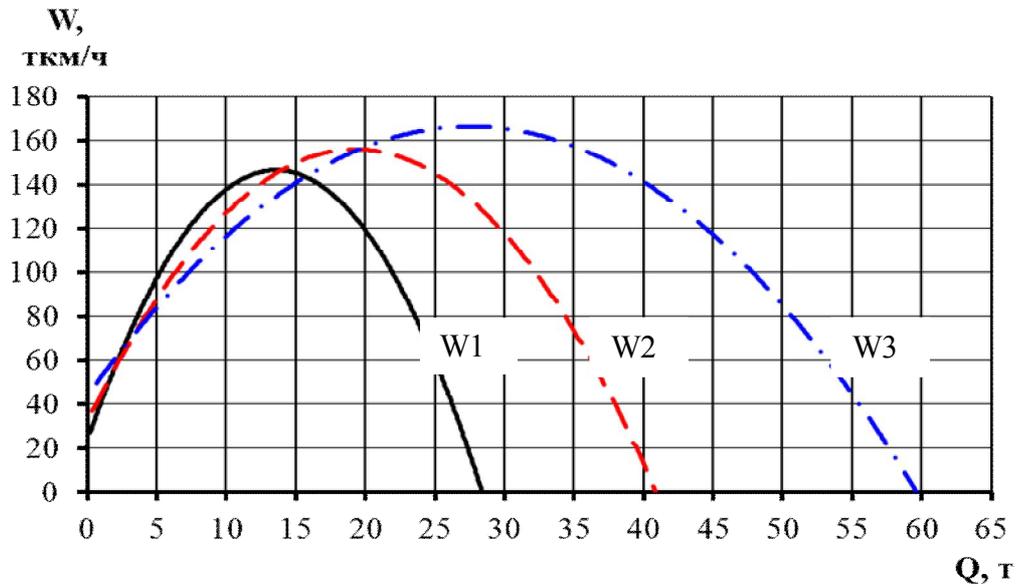
$$G_{сц} = G_{тр.э}; G_{тр.э} \cdot 1,2; G_{тр.э} \cdot 1,4,$$

где  $G_{тр.э}$  – эксплуатационный вес трактора.

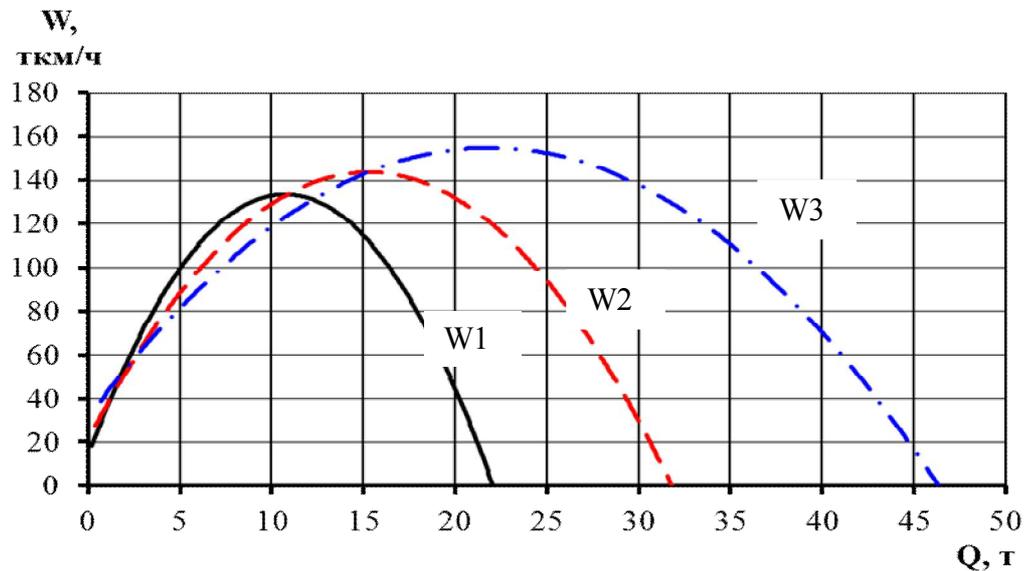
Расчет выполнен для двух почвенных фонов:

- стерня с повышенной влажностью;
- грунтовая дорога после дождя.

Расчетные графики зависимости  $W = f(Q_{np})$ , полученные по уравнению (14) для названных почвенных фонов с учетом полной загрузки двигателя трактора (трактор работает на потенциальной тяговой характеристике), представлены на рисунке.



а



б

**Зависимость производительности ТТА от грузоподъемности прицепа для тракторов с колесной схемой 4К4а при разной степени корректирования вертикальных нагрузок: W1, W2, W3 – производительность соответственно при  $G_{сц} = 33,2; 39,84; 46,48$  кН; а – стерня, б – грунтовая дорога после дождя**

Для каждого из двух рассматриваемых почвенных фонов и разного сцепного веса трактора имеем грузоподъемность, при которой производительность ТТА будет максимальной.

Сводные результаты расчета показателей эффективности корректирования вертикальных нагрузок на колесах трактора 4К4а по критерию максимума производительности представлены в таблице, из данных которой видно, что увеличение сцепного веса за счет корректирования вертикальных нагрузок приводит к повышению грузоподъемности тракторного прицепа и к увеличению производительности ТТА.

Полученные характеристики производительности в функции от грузоподъемности прицепа с экстремальными значениями производительности аналогичны потенциальной тяговой характеристике колесных тракторов [6]. При значениях грузоподъемности выше и

ниже рационального уровня производительность снижается из-за разного соотношения изменения действительной скорости движения ТТА и грузоподъемности. Причем с увеличением сцепного веса трактора имеет место повышение максимальной производительности ( $W_1 < W_2 < W_3 < W_4$ ), что объясняется менее интенсивным снижением скорости, чем приростом грузоподъемности прицепа.

**Сводные результаты расчета показателей эффективности корректирования вертикальных нагрузок на колесах трактора 4К4а**

$W_{ст.}$ Т·км/ч	$W_{г.д.}$ Т·км/ч	Кб <sub>ст.</sub>	Кб <sub>г.д.</sub>	КQ <sub>ст.</sub>	КQ <sub>г.д.</sub>	КV <sub>ст.</sub>	КV <sub>г.д.</sub>	КW <sub>ст.</sub>	КW <sub>г.д.</sub>
При $G_{сц} = 33,2$ кН									
139,79	127,65	1	1	1	1	1	1	1	1
При $G_{сц} = 33,2 \cdot 1,2 = 39,84$ кН									
148,72	137,06	1,06	1,07	1,38	1,37	0,77	0,78	1,06	1,07
При $G_{сц} = 33,2 \cdot 1,4 = 46,48$ кН									
158,82	147,75	1,12	1,15	1,92	1,89	0,59	0,61	1,13	1,16

**Выводы**

Анализ полученных результатов показывает следующее.

Для трактора с колесной схемой 4К4а при движении на стерне с повышенной влажностью повышение сцепного веса на 20% снижает буксование ведущих колес трактора на 6% и дает возможность увеличить на 38% грузоподъемность прицепа, что, в конечном счете, с учетом снижения на 23% скорости движения ТТА повышает производительность на 6%.

Увеличение сцепного веса трактора на 40% снижает буксование его ведущих колес на 12% и позволяет увеличить грузоподъемность агрегатируемого с ним прицепа на 92%, что приводит к повышению производительности ТТА на 13%.

Аналогичные результаты наблюдаются и при движении по грунтовой дороге после дождя.

Таким образом, проведенные теоретические исследования показали, что корректирование вертикальных нагрузок приводит не только к увеличению сцепного веса трактора, но и ведет к повышению рациональной, для конкретных условий движения ТТА, грузоподъемности прицепа и, следовательно, к увеличению его производительности.

**Список литературы**

1. Бочаров А.В. Повышение тягово-сцепных свойств прицепного транспортного агрегата за счет автоматической гидродогрузки задних колес трактора : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / А.В. Бочаров. – Воронеж, 2000. – 146 с.
2. Ворохобин А.В. Повышение эффективности использования тракторно-транспортного агрегата при корректировании вертикальных нагрузок на колеса : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / А.В. Ворохобин. – Воронеж, 2007. – 172 с.
3. Гребнев В.П. Эффективность оборудования колесных тракторов тягово-догружающим устройством / В.П. Гребнев, А.В. Ворохобин // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 8. – С. 9–11.
4. Пат. 2297938 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В62D 53/04, В60D 1/00, А01В 59/04. Сцепное устройство для соединения колесного трактора с прицепом / В.П. Гребнев, В.И. Панин, А.В. Ворохобин ; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный аграрный университет. – № 2005138232/11 ; заявл. 08.12.2005; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12. – 5 с.
5. Повышение эффективности использования прицепных тракторно-транспортных агрегатов / В.П. Гребнев, Н.М. Дерканосова, А.В. Ворохобин, Д.Н. Баскаков // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2012. – Вып. 2 (33). – С. 87–92.
6. Поливаев О.И. Тракторы и автомобили. Теория и эксплуатационные свойства : учебник / О.И. Поливаев, В.П. Гребнев, А.В. Ворохобин ; под общ. ред. О.И. Поливаева. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2014. – 319 с.
7. Трепененков И.И. Эксплуатационные показатели сельскохозяйственных тракторов / И.И. Трепененков. – Москва : Машгиз, 1963. – 270 с.