УДК 631.373.001.24+631.33.07
DOI: 10.55934/2587-8824-2022-29-2-180-186

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОЛУПРИЦЕПА ДЛЯ РАЗБРАСЫВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

Р. С. Рахимов, А. Р. Ялалетдинов, И. Р. Рахимов, Д. А. Ялалетдинов, А. Р. Пацкань

С увеличением производительности посевных и уборочных агрегатов, а также с увеличением урожайности возделываемых зерновых и кормовых культур вопросы перевозки различных грузов сельскохозяйственного назначения, заправки посевных комплексов семенами и удобрениями, разбрасывания органических удобрений и извести и других работ проблема создания универсальных полуприцепов различной грузоподъемности с возможностью выполнения перечисленных работ возрастает. Над созданием таких полуприцепов работают как отечественные, так и зарубежные фирмы и заводы. Однако эти полуприцепы не всегда соответствуют классу тяги и мощности двигателя трактора, что ведет к снижению качества работы и производительности агрегата. В связи с этим в работе дана методика расчета грузоподъемности полуприцепа, соответствующей классу тяги трактора и определения мощности двигателя трактора, обеспечивающая выполнение всех технологических операций в соответствии с агротехническими требованиями. В статье показано, что возможная сила тяжести загруженного полуприцепа зависит от касательной силы тяжести трактора с учетом нагрузки на прицепное устройство трактора со стороны полуприцепа при полной его загрузке. Далее дана методика определения потребной мощности двигателя трактора с учетом затрат мощности на перемещение агрегата, на разгрузку органических удобрений, которая позволяет рассчитать необходимую мощность двигателя для оптимальной загрузки трактора. Установлены рациональные параметры полуприцепа для трактора с мощностью двигателя 157 кВт, которые составляют емкость кузова 18…20 м^3, сила тяжести полуприцепа 70…75 кН, сила тяжести удобрений в бункере 175…180 кН. Производительность агрегата при B = 8…20 м, скорости движения $V_а$ = 2…3,5 м/с и дальности расположения куч удобрений находится в пределах от 4 до 15 га/ч.

Ключевые слова: полуприцеп, конструктивная схема, параметры, перевозка грузов, разбрасывание удобрений, заправка посевных комплексов, производительность, качество работы, грузоподъемность, класс тяги тракторов.

Выпуском полуприцепов разной грузоподъемности занимаются многие отечественные и зарубежные заводы [1–5]. Они отличаются друг от друга конструктивной схемой их исполнения, способом разгрузки грузов, способами разбрасывания удобрений и т.д.

Выпускаются двух-, трех- и четырехосные полуприцепы с грузоподъемностью от 15 до 40 т, в паспортных данных которых указаны собственный вес полуприцепа и грузоподъемность, а необходимая мощность двигателя трактора при работе в различных видах работ и с разными грузами и удобрениями не указана. В связи с этим для использования возможностей трактора в полном объеме и увеличения производительности агрегата необходимо иметь методику расчета потребной мощности двигателя трактора и допустимую грузоподъемность полуприцепа для агрегатирования с тракторами различного класса тяги, что представляет новизну предложенной работы.

Цель исследования: разработать методику расчета грузоподъемности и емкости кузова для тракторов различного класса тяги, а также определения потребной мощности двигателя трактора для универсальных полуприцепов разной грузоподъемности.

Методы и приемы

Параметры универсального полуприцепа (грузоподъемность и объем кузова) зависят от характеристик груза и мощности двигателя трактора, с которым он агрегатируется.

Максимальная грузоподъемность полуприцепа зависит от тягово-сцепных свойств трактора на агрофоне с определенной несущей спо-

собностью. Тогда максимальная сила тяжести $G_{пр}$, кН, полуприцепа с учетом груза определяется по выражению [1]:

$$G_{пр} = \frac{\left(P_x(\delta) - f_т G_{тр}\right)\eta_{max}}{f_т}, \qquad (1)$$

где $P_x(\delta)$ – касательная сила тяги трактора, кН;

$f_т$ – коэффициент сопротивления перекатыванию колес трактора на стерневом фоне;

$G_{тр}$ – сила тяжести трактора, кН;

η_{max} – максимальный коэффициент использования тягового усилия трактора.

В процессе работы сила тяжести полуприцепа и груза распределяется между опорными колесами полуприцепа и прицепным устройством трактора (рис. 1).

Реакция на прицепное устройство трактора R_0, кН, при полной загрузке кузова полуприцепа различными видами грузов составляет:

$$R_0 = G_п + Q_у - R_{хк}, \qquad (2)$$

где $Q_у$ – сила тяжести удобрений, кН;

$G_п$ – сила тяжести пустого полуприцепа, кН;

$R_{хк}$ – реакция почвы на ходовые колеса полуприцепа, кН.

В свою очередь сила $Q_у$, кН, определяется как:

$$Q_у = \gamma_у V_к, \qquad (3)$$

где $\gamma_у$ – объемный вес груза, кН/м^3;

$V_к$ – объем кузова полуприцепа, м^3.

Величину реакции почвы на опорные колеса полуприцепа $R_{хк}$, кН, при полной загрузке кузова можно определить составлением уравнения моментов относительно точки О в виде:

$$\sum M_0 = R_{хк} l_{хк} - G_п l_0 - Q_у l_у = 0. \qquad (4)$$

Отсюда:

$$R_{хк} = \frac{G_п l_0 + Q_у l_у}{l_{хк}}. \qquad (5)$$

Подставляя значение силы $R_{хк}$ из формулы (5) в (2), получим величину реакции прицепа трактора R_0, кН, при полной загрузке кузова в виде:

$$R_0 = \frac{G_п\left(l_{хк} - l_0\right) + Q_у\left(l_{хк} - l_у\right)}{l_{хк}}. \qquad (6)$$

При известном значении реакции R_0, кН, можно определить касательную силу тяги трактора $R_x(\delta)$, кН, по зависимости:

$$R_x(\delta) = \left(G_т + R_0\right)\delta, \qquad (7)$$

где $G_т$ – сила тяжести трактора, кН;

δ – коэффициент сцепления колес трактора с почвой.

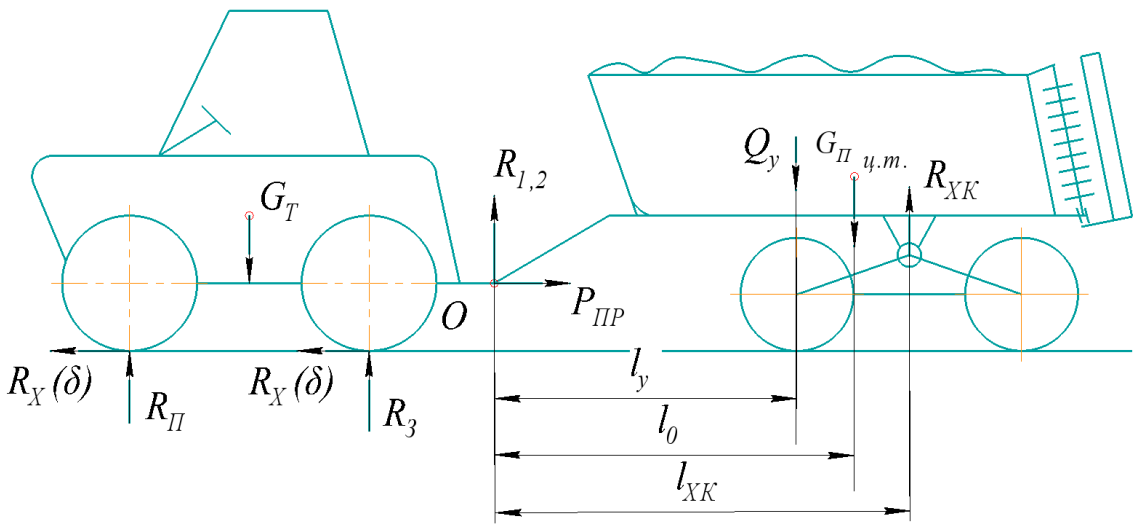

Рис. 1. Расчетная схема для определения перераспределения нагрузок по опорам

Для колесного трактора с двумя ведущими мостами при работе по обработанной почве: δ = 0,6…0,65 [2].

При выполнении различных видов работ мощность двигателя трактора N_e, кВт, используется на преодоление тягового сопротивления полуприцепа N_1, кВт, на перемещение переднего борта для разгрузки различных видов грузов при помощи гидроцилиндров N_2, кВт, и на вращение валов разбрасывателя или заправщика семян через ВОМ трактора N_3, кВт, то есть:

$$N_e = N_1 + N_2 + N_3. \quad (8)$$

В свою очередь

$$N_1 = \frac{N_{кр}}{\eta_т} = \frac{P_{кр} v_а}{\eta_т} = \frac{P_{пр} v_а}{\eta_т \eta}, \quad (9)$$

где $N_{кр}$ – мощность на крюке трактора, кВт;

$\eta_т$ – КПД трансмиссии трактора;

$P_{кр}$ – тяговое усилие на крюке трактора, кН;

$v_а$ – скорость движения агрегата, м/с;

$P_{пр}$ – тяговое сопротивление полуприцепа, кН;

η – коэффициент использования тягового усилия трактора.

Мощность N_2, кВт, на привод гидронасоса определяется по формуле:

$$N_2 = \frac{\rho Q_т}{\eta_{об} \eta_м}, \quad (10)$$

где ρ – давление масла в гидросистеме, кПа;

$Q_т$ – потребная производительность насоса, м^3/с;

$\eta_{об}$ – объемный КПД насоса;

$\eta_м$ – механический КПД.

В процессе работы в зависимости от нормы внесения органических удобрений M, т/га, скорости движения $v_а$ и параметров гидроцилиндра (диаметр поршня гидроцилиндра $d_п$, м, и хода штока гидроцилиндра $l_{шт}$) для перемещения поршня гидроцилиндра с определенной скоростью $v_{шт}$, м/с, используется производительность насоса $Q_т$, м^3/с, не в полном объеме. Излишки масла через перепускной клапан возвращаются обратно в бак.

Определим потребную производительность гидронасоса.

Путь, пройденный агрегатом L, м, для полного опоражнивания кузова с количеством удобрений $Q_у$, т, при норме внесения удобрений M, т/га, и ширине зоны разбрасывания B, м, составляет:

$$L = \frac{Q_у \cdot 10^4}{MB}. \quad (11)$$

Тогда время прохождения агрегатом t, с, до полного опорожнения при скорости движения $v_а$, м/с, составит:

$$t = \frac{L}{v_а} = \frac{Q_у \cdot 10^4}{MBv_а}. \quad (12)$$

Ширина захвата B, м, при разбрасывании органических удобрений зависит от оборотов ротора разбрасывателя, которая регулируется дросселем из кабины трактора регулированием количества подаваемого масла в гидромотор и находится в пределах от 8 до 20 м.

Для перемещения переднего борта в начальный момент используется гидроцилиндр с диаметром поршня $d_{п1}$, м, и ходом штока $l_{шт1}$, м, а затем гидроцилиндр с диаметром поршня $d_{п2}$, м, и ходом штока $l_{шт2}$, м.

Тогда потребное время перемещения переднего борта до полной разгрузки кузова определяется по формуле:

$$t = \frac{l_{шт1} \pi d_{п1}^2 + l_{шт2} \pi d_{п2}^2}{4 Q_п \eta_{об}}. \quad (13)$$

Отсюда можно определить потребную производительность насоса $Q_п$, м^3/с, для перемещения переднего борта при известном времени перемещения борта t, с в виде:

$$Q_п = \frac{l_{шт1} \pi d_{п1}^2 + l_{шт2} \pi d_{п2}^2}{4 t \eta_{об}}. \quad (14)$$

Мощность, затрачиваемая на привод разбрасывателя или на привод шнека при заправке семян $N_з$, кВт, зависит от типа груза, скорости вращения роторов или шнека, нормы внесения удобрений или производительности шнека

и скорости движения агрегата. Согласно исследованиям, через ВОМ трактора используется при вспашке роторным плугом от 10 до 20 % мощности двигателя трактора. Поскольку органические удобрения в процессе разбрасывания и семена при заправке сеялок находятся в рыхлом несвязном состоянии, то мощность $N_з$, кВт, принимаем в пределах от 10 до 20 % от мощности двигателя трактора. Значения $N_з$, кВт, для различных типов удобрений при различных оборотах ротора и нормы внесения могут быть определены экспериментально в полевых условиях.

Тогда можно определить максимально возможные значения тягового сопротивления полуприцепа $P_{пр}$ при работе на различных агротехнических фонах и при движении с различной скоростью $v_а$.

Из формулы (9) $P_{пр}$, кН, равна:

$$P_{пр} = \frac{N_1 \eta_т \eta}{v_а}. \qquad (15)$$

Производительность агрегата W, га/ч, зависит от скорости движения агрегата $v_а$, м/с, от ширины разбрасывания удобрений, B, м, и коэффициента использования времени смены $\tau_{см}$ и определяется в виде:

$$W = 0{,}36 B v_а \tau_{см}. \qquad (16)$$

Коэффициент использования времени смены $\tau_{см}$ при разбрасывании органических удобрений зависит от:

– нормы внесения удобрений – M, т/га;

– расстояния до бурта с удобрениями – S, м;

– производительности погрузчика удобрений – $W_{пог}$, м^3/с;

– скорости движения агрегата – $v_а$, м/с.

Коэффициент $\tau_{см}$ в упрощенном виде определяется как:

$$\tau_{см} = \frac{T_р}{T_о} = \frac{T_р}{T_р + T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6}, \qquad (17)$$

где $T_о$ – время работы агрегата в смену, ч;

$T_р$ – время работы агрегата в загоне, ч;

T_1 – время движения агрегата на погрузку, ч;

T_2 – время движения груженого агрегата на загонку, ч;

T_3 – время погрузки полуприцепа, ч;

T_4 – время на отдых и обед, ч;

T_5 – время в пути до поля и обратно, ч;

T_6 – время, затрачиваемое на подготовительно-заключительные работы, на техническое обслуживание и т.д.

В свою очередь:

$$T_1 = \frac{S}{v_{а1}};\ T_2 = \frac{S}{v_{а2}};\ T_3 = \frac{V_п}{П_п \cdot 3600};$$
$$T_р = t = \frac{L}{v_а} = \frac{Q_у \cdot 10^4}{NBv_а}, \qquad (18)$$

где S – расстояние от поля до места погрузки удобрений, м;

$v_{а1}$ – скорость движения агрегата на погрузку, м/с;

$v_{а2}$ – скорость движения агрегата обратно с наполненным кузовом, м/с;

$V_п$ – емкость кузова, м^3;

$П_п$ – производительность погрузчика, м^3/с.

Подставляя в полученные уравнения (1–18) исходные данные тракторов и условия их работы, можно определить параметры полуприцепов и показателей работы для тракторов различного класса тяги.

Результаты исследований и их анализ

Параметры полуприцепа определены для варианта его работы при разбрасывании органических удобрений в агрегате с трактором класса тяги 2–3 Case Puma 210. Технические характеристики трактора, используемые в расчетах, представлены в таблице 1, а объемный вес органических удобрений в таблице 2.

Сила тяжести полуприцепа $G_{пр}$, кН, определяется по формуле (1) при следующих исходных данных: $f_т$ = 0,1–0,2, $G_т$ = 6850 кг = = 68,5 кН, η_{max} = 0,95. При этом касательная сила тяги трактора $R_х(\delta)$, кН, определяется по формуле (7) с учетом догрузки прицепа трактора со стороны полуприцепа на величину R_0, кН.

Согласно паспортным данным трактора, допустимая нагрузка на задний мост составляет 9500 кг, а на передний мост 6000 кг.

В связи с этим реакцию полуприцепа на прицепное устройство R_0, кН, как показывают результаты расчетов, можно увеличить до 4000 кг.

Примем R_0 = 30 кН.

Тогда, согласно формуле (7), определяется $R_х(\delta)$, кН.

Таким образом, при работе с полуприцепом с полной загрузкой кузова трактор Case Puma 210 может развить касательную силу тяги, равную $R_х(\delta) = 50…60$ кН.

Тогда согласно формуле (1), максимальная сила тяжести полуприцепа с полной загрузкой кузова $G_{пр}$, кН, может находиться в пределах: $G_{пр} = 185…290$ кН.

Примем $G_{пр} = 250$ кН.

Согласно проведенным прочностным расчетам, сила тяжести пустого полуприцепа с разбрасывателем удобрений $G_0 = 70…75$ кН.

Тогда максимальная сила тяжести удобрений в кузове может находиться в пределах $Q_у = G_{пр} – G_0 = 175…180$ кН.

Тогда для различных видов удобрений объем кузова должен находиться в пределах:

$$V_к = \frac{Q_у}{\gamma_у} = 18{,}0…30 \text{ м}^3.$$

Поскольку в основном вносится в почву перегной, с $\gamma_у = 9–10$ кН/м^3, примем объем кузова $V_к$, м^3, находящийся в пределах $V_к = 18–20$ м^3. Для внесения других удобрений в конструкции полуприцепа необходимо предусмотреть возможность наращивания кузова для увеличения объема кузова.

В процессе внесения органических удобрений мощность двигателя трактора используется на перемещение полуприцепа с удобрениями, на привод гидронасоса при перемещении удобрений передним бортом и на вращение разбрасывателя через ВОМ трактора (формула 8).

Для определения $Q_п$, м^3/с, согласно формуле (11), определим путь L, м, при известных $Q_у = 14$ т, $M = 40$ т/га, $B = 8$ м и согласно формуле (12) при $V_а = 3$ м/с, определим время t, с, прохождения агрегатом до полного опоражнивания кузова. Получим $t = 145{,}8$ с.

Подставляя в формулу (14) известные значения параметров гидроцилиндров, потребную

Таблица 1 – Технические характеристики трактора Case Puma 210 для проведения расчета

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	Параметры
1	Мощность двигателя	кВт	157
2	Параметры передних шин		540/65 R28
3	Параметры задних шин		650/65 R28
4	Длина трактора	мм	4916
5	Ширина трактора	мм	2682
6	Высота в рабочем состоянии	мм	3100
7	Максимальная скорость	км/ч	40
8	Масса	кг	6850
9	Допустимая нагрузка: – на передний мост – на задний мост	 кг кг	 6000 9500
10	Давление масла в гидросистеме	Бар кПа	215 21 500
11	Производительность насоса гидросистемы	л/мин м^3/с	120 0,002

Таблица 2 – Объемный вес органических удобрений [4]

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	Параметры
1	Навоз свежий	кг/м^3	400–700
2	Перегной	кг/м^3	900–1000
3	Перегной полуразложившийся	кг/м^3	700–800
4	Торф сухой	кг/м^3	300–350
5	Торф влажный	кг/м^3	900–978

производительность насоса и времени t, с, определим $Q_п$, м^3/с.

Получим: $Q_п$ = 0,000257 м^3/с.

При известной потребной производительности гидронасоса $Q_п$, м^3/с, согласно формуле (10), определим потребную мощность гидронасоса.

Тогда N_2 = 7,68 кВт.

При принятых допущениях максимальная мощность двигателя, передаваемая через ВОМ трактора, равна: N_3 = 31,4 кВт.

При известных N_e, N_2 и N_3 можно определить согласно зависимости (8) N_1, которая используется на преодоление тягового сопротивления полуприцепа. Получим N_1 = 117,92 кВт.

При известном N_1 можно определить тяговое сопротивление полуприцепа $P_{пр}$, кН, при работе на различных агротехнических фонах.

Поскольку агрегат может работать на скоростях $v_а$ = 7…12 км/ч = 1,94…3,33 м/с.

Согласно формуле (15) получим:

$$P_{пр} = 34{,}6…20{,}18 \text{ кН}.$$

Имеем, что $P_{пр} < P_x(\delta)$. Тогда трактор с данным полуприцепом работает без буксования колес.

Проведенные расчеты показывают, что полуприцеп с разбрасывателем органических удобрений с обоснованными параметрами полностью загружает тракторы класса тяги 2–3.

Производительность агрегата в зависимости от скорости движения агрегата $V_а$ = = 2…3,5 м/с и ширине захвата B = 8…20 м и дальности расположения куч удобрений L, м, находится в пределах от 4 до 15 га/ч.

Аналогично, согласно описанной методике, можно обосновать параметры полуприцепа для тракторов различного класса тяги в пределах от 1,4 до 8.

Выводы

В статье разработана методика расчета параметров полуприцепа при внесении органических удобрений, позволяющая обосновать его параметры для тракторов различного класса тяги. Расчеты проведены на примере агрегатирования полуприцепа для внесения органических удобрений с трактором класса тяги 2–3.

По данной методике на ООО «Челябинский компрессорный завод» (бренд «ЧКЗ-Агро») был разработан универсальный полуприцеп ПТВ-256, успешно прошедший заводские испытания согласно методикам ГОСТ [3] в КФХ «Березка» Чесменского района Челябинской области и показавший свою работоспособность в соответствии с агротехническими требованиями к разбрасыванию твердых органических удобрений.

Список литературы

1. Информационный портал itexn.com. Машины для внесения удобрений. Виды, характеристики и тенденции развития машин. Режим доступа : https://itexn.com/1169_mashiny-dlja-vnesenija-udobrenij-vidy-harakteristiki-i-tendencii-razvitija-mashin.html.
2. ПК Ярославич. Полуприцепы тракторные // Каталог продукции 2021. Режим доступа : https://pkyar.ru/bundles/AppBundle/files/catalog/categories/booklet/2021_04_19_11_07_55_884000.pdf.
3. ООО «Челябинский компрессорный завод» // Каталог продукции 2022. Режим доступа : https://disk.yandex.ru/i/elKToiOfh35pTw.
4. Пат. на изобр. RU2717507C1. Универсальный полуприцеп / Р. С. Рахимов [и др.]. 2020.
5. АС № A01C15/12. SU 1702911 A2.
6. Кузнецов Н. А., Юлсанов М. А. Обоснование параметров транспортного агрегата для перевозки силосных и сенажных культур // Вестник ЧГАА. 2013. Т. 64. С. 34–42.
7. Клецкин М .И. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин : в 4 томах. М. : Машиностроение. Т. 1.
8. ГОСТ 28718-2016. Техника сельскохозяйственная. Машины для внесения твердых органических удобрений. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2017.

Рахимов Раис Саитгалеевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет.

E-mail: ildarr@bk.ru.

Ялалетдинов Альберт Раисович, канд. техн. наук, генеральный директор, ООО «Челябинский компрессорный завод».
E-mail: chkz@chkz.ru.

Рахимов Ильдар Раисович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ИНИЦ, ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет; руководитель департамента сельскохозяйственных машин, ООО «Челябинский компрессорный завод».
E-mail: ildarr@bk.ru.

Ялалетдинов Денис Альбертович, аспирант, ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет; исполнительный директор, ООО «Челябинский компрессорный завод».
E-mail: den@chkz.ru.

Пацкань Андрей Романович, аспирант, ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет; главный инженер, ООО «Челябинский компрессорный завод».
E-mail: patskan@chkz.ru.

* * *