

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО КПД ТРАКТОРА

Хафизов К.А., Хафизов Р.Н., Нурмиев А.А., Галиев И.Г.

Реферат. Для выявления основных параметров трактора – его массы, мощности двигателя, диаметра колеса и ширины его профиля (четырёхпараметрическая оптимизация) с использованием критерия оптимизации – суммарные энергетические затраты (учитывающего энергию урожая, теряемого из-за не оптимальности названных параметров), необходимо иметь математическую модель для расчета мощности двигателя через тяговый коэффициент полезного действия (КПД) трактора. Тяговый КПД трактора рассчитывается через f – коэффициент сопротивления перекачиванию колеса трактора и d – коэффициент буксования колеса трактора. Анализ прикладной теории, наработанной предыдущими исследователями, показал, что величины f и d зависят от веса трактора, приходящего на одно колесо G , диаметра D и ширины профиля колеса B , давления в ее шинах ρ_w , твердости почвы H , усилия на крюке трактора $P_{кр}$ и его скорости V . В ходе анализа установлено, что чем больше диаметр колеса, ширина профиля шины, меньше вертикальная нагрузка на колесо и давление в шинах, тем меньше сопротивление перекачиванию колеса по уплотняемому грунту. Сделан вывод, что изучение характера изменения коэффициента сопротивления перекачиванию колес f и их буксования d от перечисленных факторов необходимо проводить совместно, т.к. они взаимовлияют друг на друга. Отсутствие приемлемых математических зависимостей для расчета указанных коэффициентов, при одновременном действии всех выявленных факторов, приводит к необходимости проведения semifакторного эксперимента с целью выявления зависимостей – $f = f(G, D, b, \rho_w, H, P_{кр}, V)$ и $d = d(G, D, b, \rho_w, H, P_{кр}, V)$, что весьма затруднительно в условиях эксплуатации, поэтому с использованием теории подобия необходимо уменьшить число факторов в эксперименте до четырех.

Ключевые слова: математическая модель, тяговый КПД, трактор, параметры колеса, коэффициент сопротивления перекачиванию, коэффициент буксования, твердость почвы, скорость агрегата, тяговое усилие.

Введение. Уравнение для расчета мощности двигателя трактора, необходимой для работы агрегата с шириной захвата B_p и с рабочей скоростью V_p , известно из работы [1]:

$$N = \frac{0,273 \cdot \kappa_v}{\eta_f \cdot \eta_\delta \cdot \eta_{mp} \cdot \xi_p} \cdot B_p \cdot V_p, \quad (1)$$

где N – требуемая эффективная мощность двигателя, кВт; κ_v – удельное сопротивление орудия в функции от рабочей скорости, кН/м; η_f – коэффициент полезного действия (КПД), учитывающий потери на самопередвижение трактора; η_δ – КПД, учитывающий потери мощности на буксование; η_{mp} – КПД трансмиссии трактора; ξ – обобщенный коэффициент, определяющий необходимость увеличения требуемой мощности из-за вероятностного характера нагрузки.

Через параметры η_f , η_δ , η_{mp} определяется тяговый коэффициент полезного действия трактора.

Тяговый КПД трактора рассчитывают по формуле:

$$\eta_{ty} = \eta_f \cdot \eta_\delta \cdot \eta_{mp} = N_{кр} / N_i, \quad (2)$$

где N_i – мощность двигателя, соответствующая тяговой мощности трактора $N_{кр}$.

Существует понятие «условный тяговый КПД» трактора:

$$\eta_{ty} = \frac{N_{кр}}{N_{ен}}, \quad (3)$$

где $N_{ен}$ – номинальная мощность двигателя.

Между действительным и условным тяго-

вым КПД трактора существует зависимость:

$$\eta_{ty} = \eta_{ус} \cdot \eta_{ф}, \quad (4)$$

где $\eta_{ф}$ – коэффициент использования мощности двигателя.

Тяговый КПД трактора является одним из основных показателей его тяговых свойств. Он показывает, какая доля развиваемой двигателем мощности идет на совершение полезной работы. Тяговые качества трактора проявляются в результате взаимодействия его движителей с опорной поверхностью, поэтому физико-механические свойства опорной поверхности в значительной степени определяют его тягово-сцепные и технико-экономические показатели.

Цель исследования – выявление влияния на тяговый КПД трактора параметров трактора, агрегата и внешней среды. Необходимо раскрыть зависимость каждого элемента формулы (2) для расчета тягового КПД трактора – от массы трактора, диаметра и ширины профиля колеса трактора и его внутреннего давления, ширины захвата, рабочей скорости машинно-тракторного агрегата (МТА) и физико-механических свойств почвы.

Условия, материалы и методы. Для выявления искомых зависимостей необходимо проанализировать известные методы расчета составляющих формулы (2).

Коэффициент полезной тяги трактора и его зависимость от параметров МТА. Коэффициент полезной тяги η_f определяет потери мощности на самопередвижение, которые зависят от массы трактора, свойств и состояния поверхности основания, по которой движется

трактор, от устройства и параметров ходовой части и их регулировки. Эти потери состоят из потерь на трение в подшипниках колес, на смятие пневматических шин, деформацию почвы с образованием колеи, учитываемых коэффициентом сопротивления передвижению f . Коэффициент полезной тяги можно определить по формуле:

$$\eta_f = \frac{P_{кр}}{P_{кас}} = \frac{P_{кр}}{P_{кр} + P_f} = \frac{\kappa_v \cdot B}{\kappa_v \cdot B + f \cdot G_T} = \frac{1}{1 + \frac{f \cdot g_T}{\kappa_v}}, \quad (5)$$

где $P_{кр}$ – сила тяги на крюке трактора, кН; $P_{кас}$ – касательная сила тяги на ободу ведущего колеса, кН; P_f – сила сопротивления самопередвижению трактора, кН; g_T – эксплуатационный вес трактора на единицу захвата агрегата, кН/м; f – коэффициент сопротивления перекачиванию колеса трактора; κ_v – удельное тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины, кН/м.

В эксплуатационных расчетах обычно принимают $f = const$ для определенных условий работы и типа трактора. Однако на самом деле по результатам многих исследований установлено [2-8], что коэффициент сопротивления перекачиванию изменчив. Нас, при прочих равных условиях, интересует влияние на f параметров колеса (диаметра колеса, ширины его профиля, давления в шинах), скорости и ширины захвата МТА и физико-механических свойств почвы (твердости почвы H – как информативного и быстро измеряемого параметра). Это связано с необходимостью оптимизации основных параметров трактора (массы трактора и мощности его двигателя), параметров движителя (диаметра колеса, ширины его профиля, давления в шинах), а также скорости и ширины захвата МТА с использованием энергетического критерия оптимизации, учитывающего влияние указанных параметров на формируемый урожай [9-12].

Для выявления зависимости коэффициента сопротивления перекачиванию f от параметров колеса предлагаются различные зависимости. В частности, Гуськов В.В. [3] предлагает заменить эластичное колесо жестким и использовать (на это указывают и зарубежные исследователи, в частности, М. Беккер, [2]) следующие зависимости для расчета f .

$$f = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{G}{b \cdot D^2 \cdot k_1}}, \quad (6)$$

где G – вес трактора, приходящийся на одно колесо, кН; k_1 – приведенный коэффициент объемного смятия почвы, кН/м³; b – ширина профиля шины, м; D – диаметр эластичного колеса, м.

В данной формуле диаметр эластичного колеса D заменяем диаметром жесткого колеса D_s , работающего подобно эластичному колесу, используя зависимость:

$$D_s = D + \frac{h_w}{h_s} \cdot (D - 2 \cdot h_s - h_w), \quad (7)$$

где h_w – высота деформации шины, м; h_s – глубина деформации почвы под колесом, м.

Расчет k_1 производим по формуле:

$$k_1 = k / (100 \sqrt{b \cdot D}), \quad (8)$$

где k – табличное значение коэффициента объемного смятия испытательным штампом для разных грунтов, кН/м².

Для расчета деформации шины воспользуемся формулой Хейдекеля:

$$h_w = \frac{G}{\pi \cdot \rho_w \cdot \sqrt{D \cdot b}}, \quad (9)$$

где ρ_w – давление в шинах, МПа.

Для расчета глубины следа колеса Гуськов В.В. предлагает упрощенную формулу:

$$h_s = \sqrt[3]{\frac{G^2}{k_1^2 \cdot b^2 \cdot D_s}}, \quad (10)$$

Из этих зависимостей видно, что чем больше диаметр колеса, ширина профиля шины, меньше вертикальная нагрузка на колесо и давление в шинах, тем меньше сопротивление перекачиванию колеса по уплотняемому грунту.

Кроме перечисленных факторов на величину P_f влияют скорость машинно-тракторного агрегата V и тяговое усилие трактора $P_{кр}$.

Известно, что для автомобильных колес, катящихся по твердой, недеформируемой поверхности при скорости движения автомобиля до 10...15 м/с, коэффициент сопротивления качению колеса считается постоянным. В случае же движения с большей скоростью коэффициент сопротивления качению увеличивается, так как деформированная в результате восприятия вертикальной нагрузки шина из-за высокой скорости вращения не успевает полностью распрямиться в пределах пятна контакта шины с дорогой, вследствие чего, колесу возвращается не вся запасенная в результате упругой деформации энергия. Кроме того, при повышении скорости деформации возрастает внутреннее трение в слоях шины, также вызывающее увеличение коэффициента f .

Тракторы двигаются на поле со скоростью от 5 до 15 км/ч (1,39...4,17 м/с), при этом деформируется не только шина колеса, но и почва, поэтому процесс влияния скорости на коэффициент сопротивления перекачиванию более сложен.

По данным И.П. Полканова [13]:

$$f = f_a \cdot V^n, \quad (11)$$

где f_a – коэффициент, характеризующий перекачивание трактора при определенной скорости; n – показатель степени (на основании обработки опытных данных получено $n = 2$).

По данным Ю.К. Киртбая [14]:

$$f = f_r + f_{(v)} \cdot V^c, \quad (12)$$

где f_r – составляющая коэффициента сопротивления передвижению трактора, учитывающая свойства грунта; $f_{(v)}$ – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления по скорости, $f_{(v)} = (0,03...0,1) \cdot f_r$, (сек/м)^c; $c = 0,3...1,5$ – показатель степени, зависящий от конструкции движителя.

По данным Ф.С. Завалишина [15]:

$$f = f_0 + a_f \cdot (V_1 - V_0), \quad (13)$$

где V_1 , V_0 – текущее и базовое значение скорости; f_0 – коэффициент сопротивления передвижению при базовой скорости; a_f – коэффициент, зависящий от типа движителей, влажности почвы, степени нагрузки и других факторов. В среднем можно принять $a_f = 0,0014$.

На значительное изменение коэффициента f при росте скорости указывает И.И. Трепешенков [16]. Опыты, проведенные им, показали, что при росте скорости с 4 до 28 км/ч f на плотной почве увеличивается на 40 %, а вспаханной на 100 %. В диапазоне скоростей 6...9 км/ч для практических расчетов можно принять $f = \text{const}$. Это не приведет к большим неточностям, так как при постоянном тяговом усилии, сопротивление качению с ростом скорости увеличивается, а при переменном тяговом усилии уменьшается.

Представляет интерес материал, полученный при решении проблемы повышения рабочих скоростей МТА. В.Н. Болтинский [17] подтверждает возрастание коэффициента f при росте скорости трактора.

В опытах А.Я. Поляка и А.Д. Щупака (ВИМ) получено, что сила сопротивления самопередвижению трактора P_f в основном зависит от свойств почвы и не зависит от изменения скорости агрегата и крюковой нагрузки. Изменение скорости с 15 до 22 км/ч не привело к изменению h_f и h_b .

В экспериментальных исследованиях Ф.В. Кальянова [18], при увеличении нагрузки на крюке и постоянной скорости агрегата сила P_f возрастет. Для колесного трактора на пашне в диапазоне $7,5 < P_{кр} < 14$ кН при росте скорости агрегата P_f – уменьшается, а при $P_{кр} < 4,5$ кН, P_f – возрастает.

Как видим, экспериментальные данные разноречивы. При изменении скорости перемещения агрегата возможны все три случая — когда сила P_f растет, остается постоянной или уменьшается. Это можно объяснить сложностью влияния различных факторов на P_f , а также неоднородной методикой проведения опытов.

С целью приближения к реальным условиям эксплуатации Б.И. Кашпура провел опыты с трактором МТЗ-50 [19], нагрузив его плугом ПН-3-35Р. При этом получено, что для постоянной нагрузки на крюке с ростом скорости повышается вертикальная деформация почвы и сопротивление перекачиванию. При больших значениях нагрузки на крюке, интенсивность роста P_f возрастет.

Различие полученных экспериментальных данных и отсутствие однозначных комментариев в теоретическом плане ориентируют на экспериментальное определение зависимости $f = j(G, D, b, \rho_w, H, P_{кр}, V)$, что усложняет задачу из-за большого количества параметров, многообразия конструкций тракторов, сельскохозяйственных машин и условий их работы.

Коэффициент буксования и его зависимость от параметров МТА. Коэффициент

буксования, характеризующий потери мощности на буксование, определяется по формуле:

$$\eta_6 = 1 - \frac{\delta}{100}, \quad (15)$$

где d – буксование колес трактора, %.

Затраты мощности на буксование зависят от физико-механических свойств грунта, конструкции и состояния движителей, сцепного веса трактора, нагрузки на крюке, скорости взаимодействия почвозацепов с почвой и ряда других факторов.

При прочих равных условиях, нас интересует зависимость буксования от скорости и ширины захвата МТА. Принято считать, что буксование в основном зависит от нагрузки на крюке. В типовых тяговых характеристиках приводится один график $d = f(P_{кр})$ для всех передач трактора. На данном графике выделяют два участка: первый постепенного и второй интенсивного нарастания буксования. Первый участок весьма приближается к прямой линии. При эксплуатационных расчетах, второй участок не имеет практического интереса. Во-первых, работа с интенсивным нарастанием буксования с агротехнической точки зрения вредна; во-вторых, если при расчетах ориентировать работу агрегата на зону интенсивного буксования, то при непредвиденном увеличении сопротивления, агрегат может вообще потерять работоспособность. Поэтому предлагается линейная эмпирическая зависимость для определения буксования, приведенная в работе [16]:

$$\delta = \epsilon_\delta \cdot P_{кр}, \quad (16)$$

где ϵ_δ – эмпирический коэффициент; $P_{кр}$ — усилие на ободу колеса.

Академик Б.С. Свирщевский [20] предлагает определять буксование по эмпирическому уравнению:

$$\delta = a \cdot \frac{P_{кр}}{G_T} + \epsilon \cdot \left(\frac{P_{кр}}{G_T} \right)^c, \quad (17)$$

где G_T — вес трактора, кН; a , ϵ , c – эмпирические коэффициенты, определяемые для каждой марки трактора и почвенных условий.

Буксование появляется вследствие сдвига почвозацепами почвы до тех пор, пока в ней не образуются нужной величины касательные напряжения, поэтому движение без буксования вообще невозможно. Сдвиг почвы зависит, во-первых, от давления почвозацепов, во-вторых, от времени воздействия почвозацепов на опорную поверхность. Отсюда можно предположить, что буксование зависит не только от усилия на крюке, но и от скорости перемещения МТА.

Об изменении буксования движителей при увеличении скорости и постоянном усилии на крюке принято судить по экспериментальным данным, нередко противоречивым. При этом возможны следующие случаи:

- буксование остается постоянным;
 - буксование снижается из-за уменьшения времени воздействия почвозацепов на почву.
- По данным исследований [21], для гусеничных и колесных тракторов буксование снижа-

ется тем интенсивнее, чем больше значение усилия на крюке. Опыты проводились на пашне. Автор делает вывод, что при тяговых усилиях, близких к 50 % веса трактора, буксование в большей степени зависит от скорости, особенно для колесных тракторов. При тяговых усилиях, составляющих 15 % веса трактора, величина буксования незначительна и зависимость ее от скорости незаметна;

– буксование возрастает [15] из-за того, что растет крюковое усилие, ведущее к большему росту буксования, чем ее снижению от возрастания сцепного веса;

– буксование может как возрасти, так и уменьшится в зависимости от величины усилия на крюке и почвенных усилий, особенностей движителя и соединения трактора с орудием [14]. Увеличение буксования при росте скорости агрегата объясняется наличием препятствий на поле и колебаниями остова трактора на шинах, что снижает сцепление шин с почвой. При этом одновременно уменьшается время воздействия почвозацепов на почву, что должно снизить буксование. Конечный результат зависит от стечения действия всех факторов.

В работе [22, 23, 24] установлены причины повышения и снижения буксования на различных технологических операциях, рисунок 1.

Вывод автора «При работе трактора в условиях неустановившегося характера тягового сопротивления величина буксования ведущих колес будет увеличиваться – в соответствии с увеличением частоты и амплитуды колебаний нагрузки на крюке трактора. При работе трактора с установившейся тяговой нагрузкой значения частоты или амплитуды колебаний незначительны и равны нулю, величина буксования ведущих колес уменьшается с ростом скорости движения агрегата».

Анализ и обсуждение результатов исследований. Анализ имеющейся прикладной теории взаимодействия колеса с грунтом показал, что имеются зависимости для расчета величины коэффициента сопротивления перекатыванию колеса f в зависимости от веса трактора, приходящего на колесо, ее диаметра, ширины профиля и давления в шинах и физико-механических свойств почвы. Однако эти зависимости не учитывают влияние на f скорости трактора и его тягового усилия на крюке. Данные, полученные экспериментальным путем, разноречивы [18-26].

В теории тракторов отдельно не рассматривается влияние на буксование колеса параметров движителя и физико-механических свойств почвы (допустим твердости почвы - H). Данное влияние невозможно рассматривать в отрыве от учета изменения сопротивления перекатыванию движителя, поэтому различие полученных экспериментальных данных и отсутствие однозначных комментариев в теоретическом плане ориентируют на экспериментальное определение зависимости буксования $\delta = \psi(G, D, b, \rho_w, H, P_{кр}, V)$ при одновременном выявлении характера изменения коэффициента сопротивления перекатыванию $f = j(G, D, b, \rho_w, H, P_{кр}, V)$.

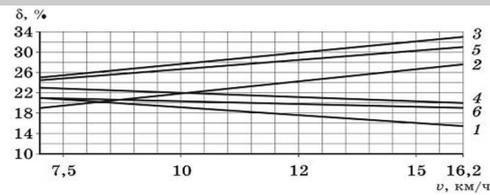


Рисунок 1 – Буксование ведущих колес при работе трактора на разных операциях в зависимости от скорости движения при постоянной крюковой силе: 1 – работа с загрузочной лабораторией;

- 2 – пахота поля из под пропашных культур;
- 3 – пахота целины; 4 – пахота целины с гасителем колебаний; 5 – пахота стерни без гасителя колебаний;
- 6 – пахота стерни с гасителем колебаний

Для снижения числа факторов при планировании экспериментов необходимо воспользоваться теорией подобия.

Выводы. Из накопленных прикладных математических моделей взаимодействия колесного движителя трактора с почвой выявлено, что чем больше диаметр колеса, ширина профиля шины, меньше вертикальная нагрузка на колесо и давление в шинах, тем меньше сопротивление перекатыванию колеса по уплотняемому грунту. При изменении скорости перемещения агрегата возможны все три случая — когда сила сопротивления перекатыванию колеса трактора P_f растет, остается постоянной или уменьшается. Это можно объяснить сложностью влияния различных факторов на P_f при изменении скорости трактора, а также неоднородной методикой проведения опытов. Многие исследователи приходят к мнению о возрастании величины коэффициента сопротивления перекатыванию при росте тягового сопротивления трактора.

В теории трактора принято считать, что буксование, в основном, зависит от тягового усилия на крюке трактора, однако предварительное ознакомление с накопленным теоретическим и экспериментальным материалом убеждает, что на буксование влияют и скорость трактора, и параметры колесного движителя и физико-механические свойства почвы.

Раздельная оценка потерь на качение и буксование является условной. В действительности, вместе с увеличением буксования возрастает также сопротивление качению. Чем меньше прочность грунта, на котором работают ведущие колеса, тем интенсивнее это проявляется и объясняется тем, что буксование уменьшает связь между частицами грунта, в результате чего увеличивается глубина погружения колес в грунт и соответственно увеличиваются затраты энергии на образование колеи.

Недостаточность теоретического материала для расчета тягового КПД трактора вызывает необходимость планирования и проведения semifакторного эксперимента с целью выявления зависимостей – $f = j(G, D, b, \rho_w, H, P_{кр}, V)$ и $\delta = \psi(G, D, b, \rho_w, H, P_{кр}, V)$. Однако планирование и проведение semifакторного эксперимента в полевых условиях весьма проблематично, поэтому с использованием теории подобия необходимо уменьшить число факторов в эксперименте до четырех.

Литература

1. Киртбая Ю.К. Элементы теории оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных агрегатов // Тракторы и сельхозмашины.–1966.–№2.–С.19–22.
2. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность–машина / Пер. с англ. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1973. – 519 с.
3. Тракторы: теория / Под общ. ред. В.В. Гуськова – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
4. Гуськов А.В. Тягово-сцепные свойства и проходимость колесного движителя по грунтам со слабой несущей способностью. / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2008. – №2. – С.63-75.
5. Скотников В.А., Пономарев А. В., Климанов А. В. Проходимость машин. – Минск.: Наука и техника, 1982. – 328 с.
6. Ксеневиц И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система–почва–урожай. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
7. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. – М.: Машиностроение, 1982. – 282 с.
8. Bekker M.G. Off-the-Road Locomotion. Ann Arbor the university of Michigan press, 1960. – 218 p.
9. Хафизов К.А. Пути снижения энергетических затрат на производственных процессах в сельском хозяйстве – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. – 272 с.
10. Camill Khafizov, Azat Nurmiev, Ramil Khafizov, Nail Adigamov. Method of justification for parameters of tractor-implement unit with regards to their impact on crop productivity / Contents of Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for rural development. Jelgava 2018, с. 161-167 (Scopus, Web of Science).
11. Ramil Khafizov, Camill Khafizov, Azat Nurmiev, Ilgiz Galiev. Optimization of main parameters of tractor and unit for seeding cereal crops with regards to their impact on crop productivity / Contents of Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for rural development. Jelgava 2018, с.176-185 (Scopus, Web of Science).
12. Azat Nurmiev, Camill Khafizov, Ramil Khafizov, Bulat Ziganshin. Optimization of main parameters of tractor working With soil-processing implement / Contents of Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for rural development. Jelgava 2018, с.168-175 (Scopus, Web of Science).
13. Полканов И.П. Теория и расчет машинно-тракторных агрегатов.– М.: Машиностроение, 1964.–255 с.
14. Киртбая Ю.К. Резервы в использовании машинно-тракторного парка. – М.: Колос, 1982.–329 с.
15. Завалишин Ф.С. Основы расчета механизированных процессов в растениеводстве. – М.: Колос, 1973.–319 с.
16. Трепененков И.И. Эксплуатационные показатели сельскохозяйственных тракторов. – М.: Машгиз, 1963.–271 с.
17. Болтинский В.Н. Результаты НИР по проблеме «Научные основы повышения рабочих скоростей движения машинно-тракторных агрегатов, выполненных в 1961 г. в ВИМе» // Повышение скорости машинно-тракторных агрегатов. – М.: БТИ ГОСНИТИ, 1962.– С.7–23.
18. Кальянов Ф.В. Исследование влияния скорости движения трактора на его тяговые показатели // Повышение рабочих скоростей тракторов и сельскохозяйственных машин. – М.: ЦИНТИАМ, 1963.– С.40–46.
19. Кашпура Б.И. Исследование влияния скорости движения на динамические показатели работы тракторов // Научные основы повышения рабочих скоростей машинно-тракторных агрегатов. – М.: Колос, 1968.– С.182–185.
20. Свирщевский Б.С. Эксплуатация машинно-тракторного парка.– М.: Сельхозгиз, 1954.– 325 с.
21. Евстратов А.Н. Обоснование и разработка индикатора буксования ходовой части трактора К-701 // Автоматизация технологических процессов в полеводстве: Труды/ ВИМ.–1985.–Т.104.– С.47–51.
22. Тургиев А.К., Карапетян М.А., Мочунова Н.А. Касательная сила тяги колесного трактора // Тракторы и сельхоз-машины. – 2010. – № 11. – С. 17–18.
23. Тургиев А.К. Повышение эффективности технологических процессов на основе улучшения тягово-сцепных свойств колесных процессов при колебательной тяговой нагрузке: дис. д-ра техн. наук. – Рязань: Рязанская СХА, 1999. – 86 с.
24. Шрайбер М., Кутбаш Н.Д. (2007): Сравнение различных определений нулевого скольжения и предложения стандартизировать рабочие характеристики сцепления шины с поверхностью дороги // Журнал Terramechanics, 44: 75–79.
25. Галиев И.Г., Хусаинов Р.К. Определение весомости технологических операций и уровня расхода ресурса агрегатов и систем трактора //Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 7. – № 3 (25). – С. 74-77.
26. Галиев И.Г., Хусаинов Р.К. Оценка условий функционирования тракторов в аграрном производстве // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 10. – С. 13-15.

Сведения об авторах:

Хафизов Камиль Абдулхакович – доктор технических наук, профессор кафедры «Тракторы, автомобили и энергетические установки», e-mail: fts-kgau@mail.ru
 Хафизов Рамил Наилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тракторы, автомобили и энергетические установки», e-mail: ramilajz@mail.ru
 Нурмиев Азат Ахиарович – старший преподаватель кафедры «Тракторы, автомобили и энергетические установки», e-mail: azat-nurmiev@mail.ru
 Галиев Ильгиз Гакифович – доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация и ремонт машин», e-mail: drGali@mail.ru
 ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», Казань, Татарстан, Россия.

THEORETICAL BACKGROUND OF CREATING A MATHEMATICAL MODEL OF TRACTOR TRACTION EFFICIENCY

Khafizov K.A., Khafizov R.N., Nurmiev A.A., Galiev I.G.

Abstract. To identify the main parameters of the tractor - its mass, engine power, wheel diameter and its profile width (four-parameter optimization) using the optimization criterion - the total energy costs (taking into account the energy of the crop lost due to the non-optimality of these parameters), it is necessary to have a mathematical model for calculation of engine power through the traction coefficient of performance of the tractor. The traction efficiency of the tractor is calculated through f is the coefficient of resistance to rolling of the tractor wheel and δ is the coefficient of slipping of the tractor wheel. An analysis of the applied theory developed by previous researchers showed that the values f and δ depend on the weight of the tractor coming to one wheel G , the diameter D and the width of the profile of the wheel B , the pressure in its tires p_w , the hardness of the soil H , the effort on the tractor hook P_{kp} and its speed V . During the analysis, it was found that the larger the diameter of the wheel, the width of the tire profile, the less the vertical load on the wheel and the pressure in the tires, the less the resistance to rolling the wheel over the soil being compacted. It is concluded that the study of the nature of the change in the coefficient of

resistance to rolling wheels f and their slipping δ from the above factors must be carried out jointly, because they influence each other. The absence of acceptable mathematical dependences for calculating the indicated coefficients, with the simultaneous action of all identified factors, leads to the need for a seven-factor experiment to identify the dependencies $f = \varphi(G, D, b, \rho_w, H, P_{kp}, V)$ and $\delta = \psi(G, D, b, \rho_w, H, P_{kp}, V)$, which is very difficult in operating conditions, therefore, using the similarity theory, it is necessary to reduce the number of factors in the experiment to four.

Key words: mathematical model, traction efficiency, tractor, wheel parameters, rolling resistance coefficient, slipping coefficient, soil hardness, unit speed, traction force.

References

1. Kirtbaya Yu.K. Elements of the theory of optimal parameters of mobile agricultural units. [Elementy teorii optimalnykh parametrov mobilnykh selskokhozyaystvennykh agregatov]. // *Traktory i selkhoz mashiny. – Tractors and agricultural machines*. 1966.–№2. – P. 19–22.
2. Bekker M.G. *Vvedenie v teoriyu sistem mestnost – mashina*. [Introduction to the theory of terrain – machine systems]. / Translated from English by V.V. Guskov – M.: Mashinostroenie, 1973. – P. 519.
3. *Traktory: teoriya*. [Tractors: theory]. / Under the general edition of V.V. Guskov – M.: Mashinostroenie, 1988. – P. 376.
4. Guskov A.V. Traction and hitching properties and cross-country ability of the wheel mover on soils with weak bearing capacity. [Tyagovo-stsepnnye svoystva i prokhodimost kolesnogo dvizhitelya po gruntam so slaboy nesuschey sposobnostyu]. // *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. "Mashinostroenie"*. – *The herald of MSTU named after N.E. Bauman. "Engineering"*. 2008. №2. P. 63-75.
5. Skotnikov V.A., Ponomarev A. V., Klimanov A. V. *Prokhodimost mashin*. [Patency of machines]. – Minsk.: Nauka i tekhnika, 1982. – P. 328.
6. Ksenevich I.P., Skotnikov V.A., Lyasko M.I. *Khodovaya sistema – pochva - urozhay*. [Running gear – soil – productivity]. – M.: Agropromizdat, 1985. – P. 304.
7. Vong Dzh. *Teoriya nazemnykh transportnykh sredstv*. [Theory of land vehicles]. – M.: Mashinostroenie, 1982. – P. 282.
8. Bekker M.G. Off-the-Road Locomotion. Ann arbor the university of Michigan press, 1960. – P. 218.
9. Khafizov K.A. *Puti snizheniya energeticheskikh zatrat na proizvodstvennykh protsessakh v selskom khozyaystve*. [Ways to reduce energy costs in production processes in agriculture]. – Kazan: Izd-vo Kazan. un-ta, 2007. – P. 272.
10. Camill Khafizov, Azat Nurmiev, Ramil Khafizov, Nail Adigamov. Method of justification for parameters of tractor- implement unit with regards to their impact on crop productivity / Contents of Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for rural development. Jelgava 2018, P. 161-167 (Scopus, Web of Science).
11. Ramil Khafizov, Camill Khafizov, Azat Nurmiev, Ilgiz Galiev. Optimization of main parameters of tractor and unit for seeding cereal crops with regards to their impact on crop productivity / Contents of Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for rural development. Jelgava 2018, P.176-185 (Scopus, Web of Science).
12. Azat Nurmiev, Camill Khafizov, Ramil Khafizov, Bulat Ziganshin. Optimization of main parameters of tractor working With soil-processing implement / Contents of Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for rural development. Jelgava 2018, P.168-175 (Scopus, Web of Science).
13. Polkanov I.P. *Teoriya i raschet mashinno-traktornykh agregatov*. [Theory and calculation of machine-tractor units]. M.: Mashinostroenie, 1964. – P. 255.
14. Kirtbaya Yu.K. *Rezervy v ispolzovanii mashinno-traktornogo parka*. [Reserves in the use of the machine and tractor fleet]. – M.: Kolos, 1982. – P. 329.
15. Zavalishin F.S. *Osnovy rascheta mekhanizirovannykh protsessov v rastenievodstve*. [Fundamentals of the calculation of mechanized processes in crop production]. – M.: Kolos, 1973. – P. 319.
16. Trepnenkov I.I. *Ekspluatatsionnye pokazateli selskokhozyaystvennykh traktorov*. [Performance indicators of agricultural tractors]. – M.: Mashgiz, 1963. – P. 271.
17. Boltinskiy V.N. *Rezultaty NIR po probleme "Nauchnye osnovy povysheniya rabochikh skorostey dvizheniya mashinno-traktornykh agregatov, vypolnennykh v 1961 g. v VIMe"*. // *Povyshenie skorosti mashinno-traktornykh agregatov*. [The results of research on the problem "Scientific basis for increasing the operating speeds of the movement of machine and tractor units, performed in 1961 in VIM". // Increasing the speed of machine and tractor units]. – M.: BTI GOSNITI, 1962. – P. 7–23.
18. Kalyanov F.V. *Issledovanie vliyaniya skorosti dvizheniya traktora na ego tyagovye pokazateli*. // *Povyshenie rabochikh skorostey traktorov i selskokhozyaystvennykh mashin*. [Investigation of the influence of tractor speed on its traction performance. // Increasing the operating speeds of tractors and agricultural machines]. – M.: TsINTIAM, 1963. – P. 40–46.
19. Kashpura B.I. *Issledovanie vliyaniya skorosti dvizheniya na dinamicheskiy pokazateli raboty traktorov*. // *Nauchnye osnovy povysheniya rabochikh skorostey mashinno-traktornykh agregatov*. [Study of the influence of speed on the dynamic performance of tractors. // Scientific basis for increasing the operating speeds of machine-tractor units]. – M.: Kolos, 1968. – P.182–185.
20. Svirschevskiy B.S. *Ekspluatatsiya mashinno-traktornogo parka*. [The operation of the machine and tractor fleet]. M.: Selkhozgiz, 1954. – P. 325.
21. Evstratov A.N. *Obosnovanie i razrabotka indikatora buksvaniya khodovoy chasti traktora K-701*. // *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v polevodstve: Trudy VIM*. (The rationale and development of the indicator for slipping the undercarriage of the K-701 tractor. // Automation of technological processes in field cultivation: Scientific papers if VIM). 1985. - Vol. 104. – P. 47–51.
22. Turgiev A.K., Karapetyan M.A., Mochunova N.A. Tangent traction force of a wheeled tractor. [Kasatel'naya sila tyagi kolesnogo traktora]. // *Traktory i selkhoz mashiny. - Tractors and agricultural machines*. – 2010. – № 11. – P. 17–18.
23. Turgiev A.K. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov na osnove uluchsheniya tyagovo-stsepnnykh svoystv kolesnykh protsessov pri kolebatel'noy tyagovoy nagruzke: dis. d-ra tekhn. nauk*. (Improving the efficiency of technological processes on the basis of improving the traction and coupling properties of wheel processes with vibrational traction: Doctoral dissertation). – Ryazan: Ryazanskaya SKhA, 1999. – P. 86.
24. Shrayber M., Kutbash N.D. (2007): Comparison of various definitions of zero slip and proposals to standardize tire grip performance. [(2007): Sravnenie razlichnykh opredeleniy nulevogo skolzheniya i predlozheniya standartizirovat rabochie kharakteristiki stsepleniya shiny s poverkhnostyu dorogi]. *Terramechanics. - Terramechanics*, 44: P. 75–79.
25. Galiev I.G., Khusainov R.K. Determination of the weight of technological operations and the level of resource consumption of aggregates and tractor systems. [Opredelenie vesomosti tekhnologicheskikh operatsiy i urovnya raskhoda resursa agregatov i sistem traktora]. // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – The Herald of Kazan State Agrarian University*. 2012. Vol. 7. № 3 (25). P. 74-77.
26. Galiev I.G., Khusainov R.K. Assessing the operating conditions of tractors in agricultural production. [Otsenka usloviy funktsionirovaniya traktorov v agrarnom proizvodstve]. // *Tekhnika i oborudovanie dlya sela. - Machinery and Equipment for Rural Area*. 2015. № 10. P. 13-15.

Authors:

Khafizov Kamil Abdulkhakovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Tractors, cars and power plants Department, e-mail: fts-kgau@mail.ru
 Khafizov Ramil Nailevich – Ph.D. of Technical sciences, Associate Professor of the Tractors, cars and power plants Department, e-mail: ramilajz@mail.ru
 Nurmiev Azat Akhbarovich – senior lecturer of the Tractors, cars and power plants Department, e-mail: azat-nurmiev@mail.ru
 Galiev Ilgiz Gakifovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: drGali@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Tatarstan, Russia.