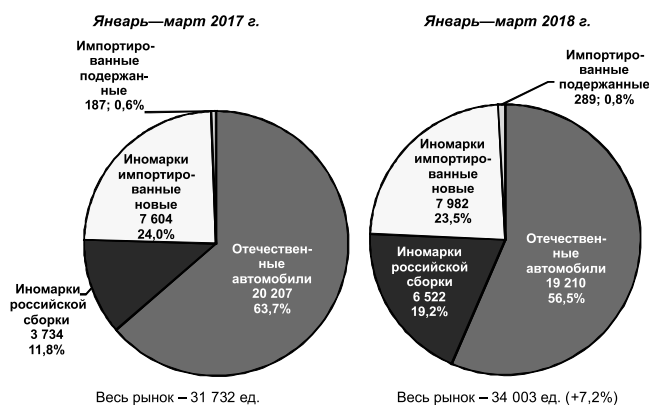


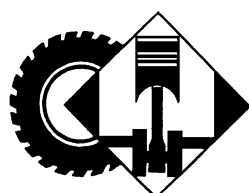
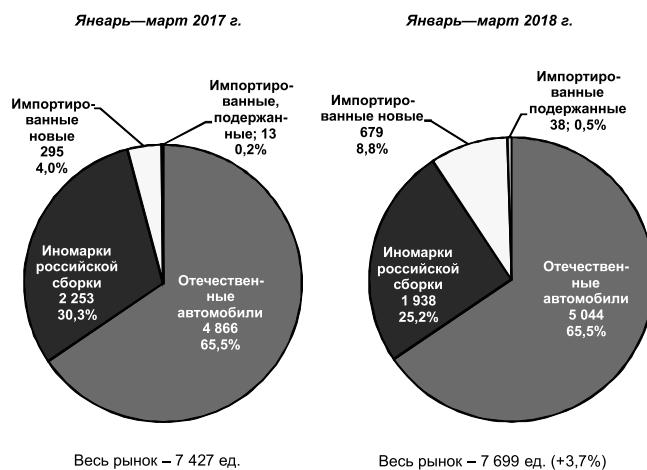
ГРУЗОВЫЕ АВТОМОБИЛИ (ВКЛЮЧАЯ МАЛОТОННАЖНЫЕ)

СТРУКТУРА РОССИЙСКОГО РЫНКА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ПО ПРОИСХОЖДЕНИЮ



АВТОБУСЫ И МИКРОАВТОБУСЫ

СТРУКТУРА РОССИЙСКОГО РЫНКА АВТОБУСОВ ПО ПРОИСХОЖДЕНИЮ



КОНСТРУКЦИИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

УДК 629.365/367 (075.8)
ББК 39.34 — 01 — н 73

ТЯГОВАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЦЕЛЕВОЙ КОЛЁСНОЙ МАШИНЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЕЁ ПО ГРУНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д-р техн. наук ГУСЬКОВ В.В., БОЙКОВ В.П.,
КАРПИЕВИЧ Ю.Д., СУШНЁВ А.А.

Белорусский НТУ (as.voshod@gmail.com)

Рассматриваются методики построения тяговой и динамической характеристик при движении колёсной машины по грунтовой поверхности. Установлены математические зависимости по определению тягово-сцепных и скоростных свойств проектируемой машины и для их оценки построены тяговые и динамические характеристики.

Ключевые слова: колёсный движитель, ведомые и ведущие колёса, законы сжатия и сдвига грунта, тяговая и динамическая характеристики, реакция поверхности, специальное колёсное шасси 8×8, сила тяжести.

Guskov V.V., Boikov V.P., Karpievich Yu.D., Sushnirov A.A. TRACTION AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MULTI-PURPOSE WHEELED MACHINES WHEN MOVING IT ALONG THE GROUND SURFACE

Discusses the methodology of the traction and dynamic characteristics when driving a wheeled vehicle over a soil surface. Set mathematical dependences on the definition of trailer coupling and properties design machines and to evaluate them built traction and dynamic performance.

Keywords: wheeled mover, slave and drive wheels, the laws of compression and shear the soil, pulling and dynamic characteristic, response of a surface, special wheeled chassis 8×8, force of gravity.

В теории мобильных машин, как известно, тягово-сцепные их свойства оцениваются тяговой характеристикой, а скоростные свойства — динамической. При этом движение колёсной машины по грунтовой поверхности всегда сопровождается буксованием, т.е. некоторой потерей скорости движения, в связи с чем ведущее колесо снабжается грунтозацепами (рис. 1), улучшающими сцепные свойства колеса.

Рассматривая взаимодействие ведомых и ведущих колёс с грунтовой поверхностью, воспользуемся законами сжатия и сдвига грунта под действием нагрузки, предложенными профессором В.В. Кацыгиным [1, 2] как наиболее адекватными реальным условиям движения.

Сопротивление грунта к образованию колеи принято оценивать коэффициентом f_k качения, а сцепные качества — коэффициентом φ сцепления. Взаимодействие колеса с поверхностью движения можно представить единым процессом, который показан на рис. 2. Здесь δ — буксование (в долях единиц), f — скольжение (в пределах значения коэффициента трения по коя f_n). Кривая 1 относится к искусственным поверхностям движения, кривая 2 — к естественным. В пер-

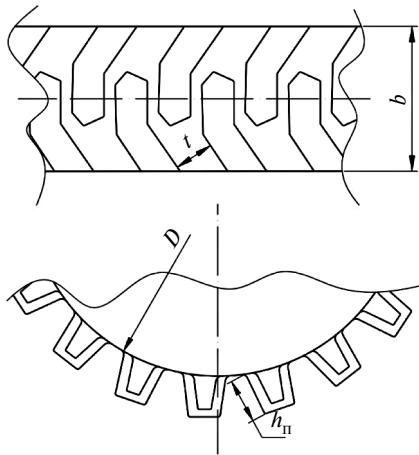


Рис. 1. Рисунок протектора шины ведущего колеса колёсной машины:
 t — шаг грунтозацепов; $h_{п}$ — высота протектора

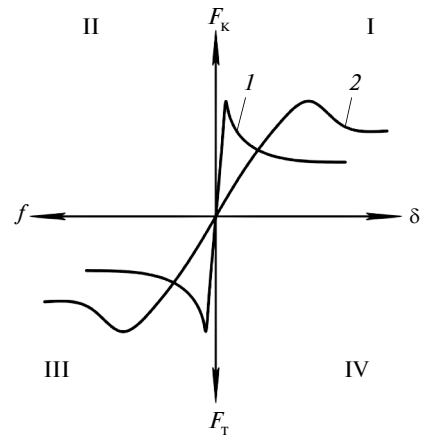


Рис. 2. Процесс скольжения-буксования

вой четверти показаны силы сцепления, формирующие движущую силу F_k .

При движении по дорогам (искусственные поверхности), касательная сила тяги F_k возрастает почти мгновенно, достигая максимальной величины при приложении максимального крутящего момента $M_{к\max}$, т.е. $F_{к\max} = \Psi_{\max} G$, где Ψ — коэффициент сцепления. При торможении тормозная сила зависит от степени приложения тормозного момента $M_{\text{тор}}$, достигая мак-

симальной величины при полном скольжении, т.е. $F_{\text{тор,max}} = f_{п} G$.

Согласно рис. 3 тяговый баланс колёсной машины имеет вид формулы 1 (табл. 1). Рассмотрим подробнее силы, действующие на мобильную колёсную машину.

При определении скоростей и ускорений принимают различные допущения как по составу системы (число масс, характер связей), так и по характеру движения. Машина с механической трансмиссией имеет

Таблица 1

№	Формула	Примечания
1	$x_2 + x_3 = x_1 + F_{\text{воз}} + F_{\text{ин}} + F_{\text{р}} + F_{\text{п}} + F_{\text{кр}}$	$x_2 + x_3 = F_{\text{кр}}$ — движущая сила; $x_1 = F_{\text{спр}}$ — сопротивление движению за счёт смятия грунта движителем и образования колеи; $F_{\text{воз}}$ — сопротивление воздуха; $F_{\text{кр}}$ — крюковая нагрузка; $F_{\text{п}}$ — сопротивление подъёму; $F_{\text{ин}}$ — сила инерции
2	$f_k = f_{k0}[1 + (0,06v_d)^2]$	—
3	$F_{\text{воз}} = k_a A_B v_d^2$	k_a — коэффициент сопротивления воздуха; A_B — лобовая площадь машины; v_d — действительная скорость движения
4	$F_{\text{ин}} = m_a \frac{\partial v_0}{\partial t}$	m_a — полная масса колёсной машины
5	$F_{\text{р}} = m \delta_{\text{вр}} j$	$\delta_{\text{вр}}$ — коэффициент учёта вращающихся масс; j — ускорение поступательного движения
6	$\delta = \frac{1 + (\sum J_{Mi} u_i^2 \eta_{\text{тp}i} + J_k)}{m r_k r_d}$	J_{Mi} — момент инерции вращающейся i -й массы; u_i — передаточные отношения; $\eta_{\text{тp}i}$ — КПД i -й вращающейся массы; r_k — кинематический радиус колеса, м; r_d — динамический радиус колеса
7	$F_d v_T = \frac{p_e \eta_{\text{тp}i}}{r_d}$	p_e — мощность двигателя; η_r — КПД трансмиссии; i — передаточное число i -й передачи; r_d — динамический радиус ведущего колеса
8	$Fv_0 = Fv_T(1 - \delta) = \frac{p_e \eta_{\text{тp}i}}{r_d}$	—
9	$\eta_m = \eta_{\text{тp}} \eta_r \eta_{\delta} \eta_{\text{спр}}$	—
10	$f_{\text{спр}} = \frac{F_{\text{спр}}}{G}$; $\varphi_{\text{си}} = \frac{F_k}{G}$; $D = \frac{F_k - F_{\text{спр}}}{G}$	D — динамический фактор

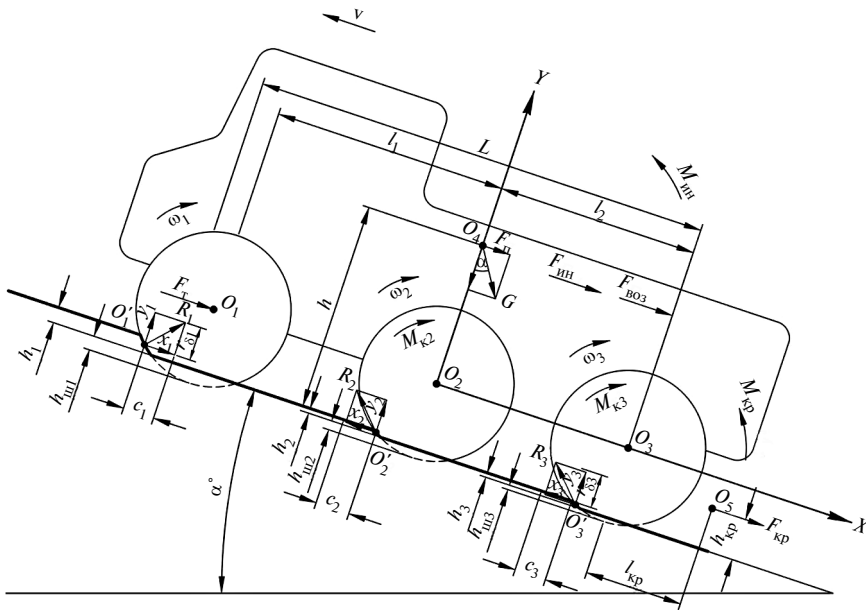


Рис. 3. Схема активных сил и моментов, сил инерции и моментов, силы сопротивления воздуха и крутящей нагрузки и реакции грунтовой поверхности

однозначную связь частоты вращения всех вращающихся масс с частотой вращения коленчатого вала двигателя. Изучая её тягово-скоростные свойства, пренебрегают взаимным перемещением всех отдельных масс, кроме относительного вращения деталей двигателя, трансмиссии и колёс.

Считается, что центр масс машины совершает плоское движение, копируя продольный профиль дороги (грунтовой поверхности) без колебаний, вызываемых её неровностями. На рис. 4, в качестве примера, показано трёхосное колёсное шасси, движущееся по плоскому участку дороги. Если продольный профиль дороги криволинейный, то кроме поступательного движения машина совершает ещё вращательное относительно поперечной оси Z , проходящей через центр масс и перпендикулярной плоскости движения. Ось X , проходящую через центр масс и параллельную плоскости движения, называют продольной осью, а ось Y , перпендикулярную X и Z и направленную вверх, — нормальной.

Скоростью и ускорением колёсной машины называют скорость и ускорение её центров масс. Для их определения достаточно знать внешние силы, дейст-

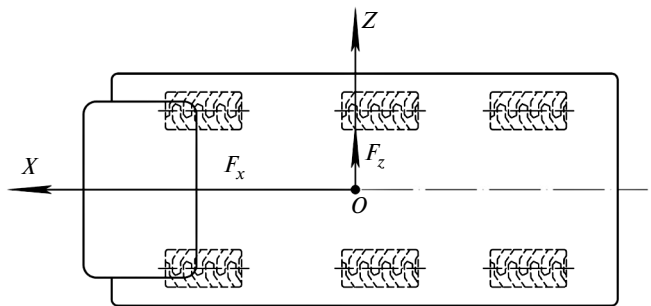


Рис. 4. Трёхосное колёсное шасси

вующие на машину. Определить некоторые внешние силы можно, зная соответствующие внутренние силы. К внешним силам относятся: сила тяжести, реакции дороги, аэродинамические реакции и крутящее усилие.

Сила тяжести. Её величину и точку O приложения (центр масс) можно определить по параметрам, приведённым в технических характеристиках и справочных материалах. В современных технических характеристиках, как известно, приводятся собственная (т.е. масса снаряжённого транспортного средства — без груза, полностью заправленного топливом, и др. техническими жидкостями, с инструментом, дополнительным оборудованием и штатными запасными колёсами) m_0 и полная (включая массы экипажа и груза по номинальной грузоподъёмности) m_a массы колёсных машин.

Модули сил тяжести машины, стоящей на горизонтальной плоскости при полной и снаряжённой массе, равны соответственно $G_a = m_a g$; $G_0 = m_0 g$. Положение центра масс по длине определяется расстояниями l_1 и l_2 до геометрических осей вращения колёс. Эти оси будем называть передней и задней осями машины. Расстояние $l_1 + l_2 = L$ — база. Значения l_1 и l_2 могут быть найдены по параметрам, приводимым в технических характеристиках. Высота расположения центра масс обычно приводится в справочной литературе.

Движение колёсной машины по естественной поверхности грунта всегда сопровождается смятием грунта опорными частями колёс и сдвигом его в направлении, обратном движению. В первом случае образуется колея, оцениваемая высотой $h_{п}$, и образуется сила сопротивления движению $F_{спр}$. Второй случай сопровождается буксованием δ , и образуется движущая реакция $F_{дв}$.

При этом сила $F_{спр}$ сопротивления качению колеса оценивается формулой: $F_{спр} = f_k G$, где f_k — суммарный коэффициент, включающий деформацию грунтовой поверхности $f_{п}$ и деформацию шины $f_{ш}$, т.е. $f_k = f_{п} + f_{ш}$. Исследователи [2—4] отмечают, что сила сопротивления зависит от скорости движения, и предлагают оценивать формулой 2. В свою очередь, движущая сила F_k (движущая реакции x) оценивается коэффициентом сцепления ϕ и силой тяжести G , т.е. $F_k = \phi G$.

Сила сопротивления подъёму $F_{п}$ — есть проекция силы тяжести на направление вектора скорости центра масс колёсной машины. Радиусы кривизны вертикального профиля дороги обычно велики по сравнению с базой машины, поэтому отрезки дороги, на которых в каждый данный момент она находится,

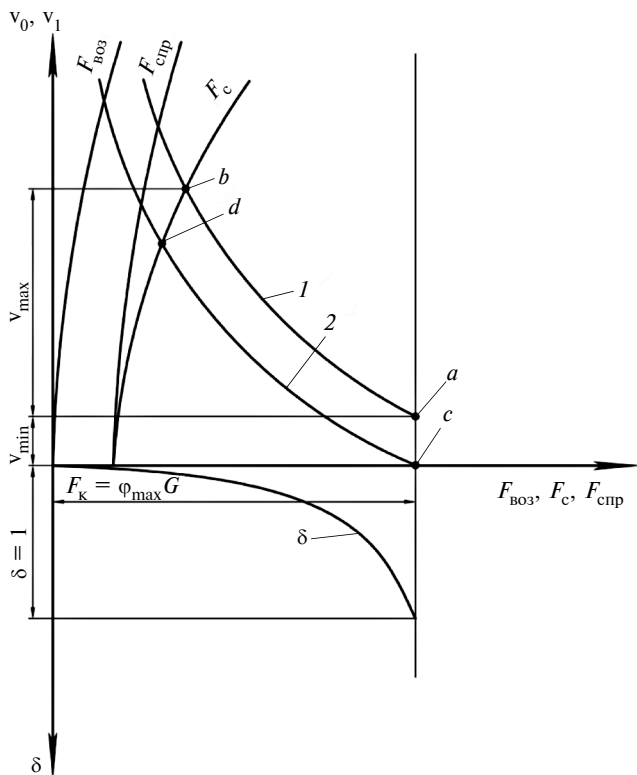


Рис. 5. Тяговая характеристика колёсной машины при движении по горизонтальной поверхности в установившемся режиме:

1 — потенциальная характеристика; 2 — действительная характеристика

можно заменить плоскостями, имеющими продольный наклон α , и рассматривать силу F_{Π} как составляющую силы тяжести, параллельную этой плоскости (см. рис. 3). Тогда $F_{\Pi} = G \sin \alpha$. А как известно, при небольших углах α синус может быть заменён тангенсом, которым в дорожном строительстве обозначают продольный уклон дороги i (в %). Таким образом, формула приобретает вид $F_{\Pi} = G_a i$. Разумеется, на подъёме эта сила будет положительной, а на спуске — отрицательной.

Сила сопротивления воздуха $F_{\text{воз}}$ — это составляющая полной аэродинамической силы, направленная по продольной оси машины. Аэродинамические силы могут возникать в результате движения в неподвижной воздушной среде, обтекания потоком движущегося воздуха (ветром) неподвижной машины, а в общем случае — при её движении в движущемся воздушном потоке. Элементарные аэродинамические силы, действующие в каждой точке поверхности машины, различны по величине и направлению. Совокупность их может быть заменена равнодействующей $F_{\text{в}}$ (полной аэродинамической силой). Сила сопротивления воздуха вычисляется по формуле 3.

Сила инерции $F_{\text{ин}}$ при поступательном (переносном) движении оценивается формулой 4. Сила сопротивления разгону $F_{\text{р}}$ — формулой 5, в которую входит коэффициент учёта вращающихся масс, вычисляемый по формуле 6.

Графическое изображение силового баланса в координатах "сила—скорость", называется **тяговой характеристикой** колёсной машины. На рис. 5 показана такая характеристика для машины, движущейся по горизонтальной грунтовой поверхности в установившемся режиме.

Под **потенциальной** характеристикой понимается возможность реализации теоретической скорости движения машины при различных силах сопротивления движению. Рассчитывается она по формуле 7. На кривой 1 имеются две характерные точки: a — где скорость движения колёсной машины ограничивается сцепными свойствами ($F_{\text{к}} = \varphi_{\text{max}} G$) и b — где скорость движения ограничивается мощностью двигателя.

Действительная характеристика — это возможность реализации тягово-сцепных и скоростных свойств при наличии буксования. Она рассчитывается по формуле 8. На кривой 2 также имеются две характерные точки: c — где движение машины невозможно ввиду полного буксования ($\delta = 1$) и d — где скорость движения ограничивается мощностью двигателя.

Представляет интерес исследование зависимости тягового коэффициента полезного действия $\eta_{\text{т}}$ (формула 9) от показателей процесса взаимодействия ведущего колеса с опорной поверхностью (рис. 6). Здесь $\eta_{\text{тр}}$ — КПД учитывающий потери в трансмиссии; $\eta_{\text{р}}$ — КПД учитывающий потери за счёт деформации шины; η_{δ} — КПД учитывающий потери скорости движения; $\eta_{\text{спр}}$ — КПД учитывающий потери за счёт смятия грунта движителем и образования колеи.

Примем допущение, что мобильная колёсная машина движется по горизонтальной грунтовой поверхности в установившемся режиме, со снаряжённой массой $m_{\text{сн}}$, полной массой m_{Π} и массой прицепа $m_{\text{пр}}$. Под тяговым КПД будем понимать отношение мощности P_{Π} , идущей на совершение полезной работы, к мощности P_e , развиваемой двигателем машины, т.е. $\eta_{\text{т}} = P_{\Pi} / P_e$. В этом случае тяговый КПД снаряжённой

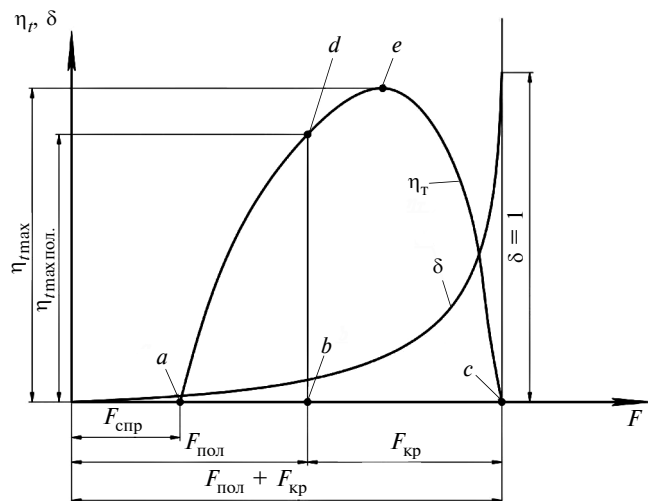


Рис. 6. Зависимость тягового $\eta_{\text{т}}$ КПД колёсной машины от развиваемой силы тяги

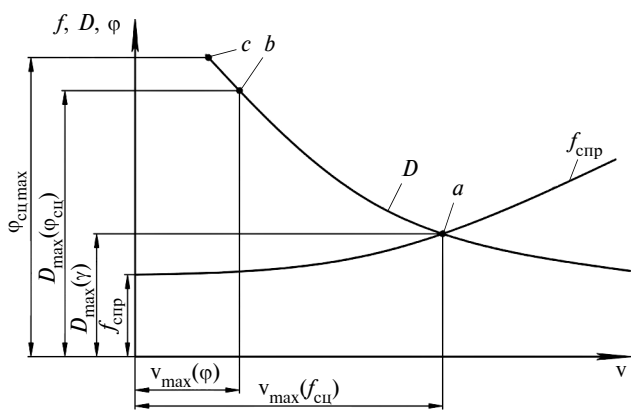


Рис. 7. Динамическая характеристика мобильной колёсной машины

машины без оборудования и крюковой нагрузки равен 0.

С другой стороны, тяговый КПД η_T в точке *c* тоже равен 0, поскольку движитель полностью буксует ($\delta = 1$). Область характеристики *adb* отражает зависимость тягового η_T КПД от полной нагрузки, а область *bdec* — крюковой нагрузки. Запас свободной силы, равной $F_{кр} - F_{п} = F_{изб}$, которую называют избыточной, даёт возможность судить об использовании колёсной машины в качестве тягача и определить массу буксируемого прицепа.

Динамическая характеристика, в отличие от тяговой, даёт возможность оценить скоростные свойства колёсной машины (рис. 7). Для возможности сравнительной оценки свойств машин, обладающих различной массой и мощностью двигателей, удобнее использовать безразмерные величины (формулы 10).

На зависимости $D = f(f_{спр}, \varphi_{спр})$ имеется три точки — *a*, *b*, *c*. В точке *a* колёсная машина достигает максимальной скорости движения, обусловленной сопротивлением движению; в точке *b* скорость ограничивается её тяговыми возможностями ($\varphi_{спр} \rightarrow \max$); в точке *c* — имеет место полное буксование машины ($\delta \rightarrow 1$).

В качестве примера построения тяговой и динамической характеристик рассмотрим движение четырёхосного полноприводного специального колёсного шасси МЗКТ-7930 (семейство "Астролог"), движущегося на шинах ВИ-203 (1500 × 600 – 635) по горизонтальной поверхности залежи суглинка нормальной ($W = 14...18\%$) влажности. Параметры данной машины приведены в табл. 2, а показатели физико-механических свойств грунта — в табл. 3.

При снаряжённой массе $m_{сн} = 21$ т (весовая нагрузка $G_{сн} = 206$ кН) в результате расчёта по приведённым ранее уравнениям получены следующие результаты. Сила сопротивления движению за счёт смятия грунта движителем и образования колеи на минимальной скорости движения: $F_{спр0} = 8,7$ кН; $f_{спр0} = 0,05$; $h = 0,03$ м.

При полной массе $m_n = 43$ т (весовая нагрузка 411 кН), из которых масса оборудования $m_{об} = 22$ т, максимальная движущая сила $F_{дв. \max} = 318$ кН при 25 %

буксования. При этом: $F_{спр0} = 121,8$ кН; $f_{спр0} = 0,21$; $h = 0,11$ м; $\varphi_{\max} = 0,75$; $L_{пр} = 1,01$ м.

Зависимость тяговых показателей от скорости движения определяется по эмпирическим формулам: $F_{спр} = F_{спр0} = 1 + (0,06v_d)^2$, где v_d — действительная скорость движения; $v_d = v_T(1 - \delta) = \omega r_k(1 - \delta)$; ω — угловая скорость колёс; δ — буксование в долях единиц; r_k — кинематический радиус.

При расчётах радиус r_k приравнивается к статическому $r_{ст}$ радиусу, который оценивается при помощи формулы Хейдекеля [5]: $r_{ст} = r_0 - h_{ст}$, где r_0 — номинальный радиус; $h_{ст}$ — величина прогиба шины под нагрузкой. Последняя определяется по формуле

$$h_{ст} = \frac{G}{2\pi P_{w\sqrt{r_0 r_c}}}, \text{ где } w \text{ — давление воздуха в шине;}$$

r_c — радиус сечения шины, приближённо равный половине её ширины ($r_c \cong b/2$).

Таблица 2

Параметр мобильной колёсной машины	Специальное колёсное шасси МЗКТ-7930
Мощность двигателя, кВт (л. с.)	368 (500)
Снаряжённая масса, т	21,0
Полная масса, т	43,0
Масса установленного оборудования, т	22,0
Максимальная скорость движения, км/ч (м/с)	70,0 (19,44)
Площадь лобового сопротивления, м ²	9,3
База, м	8,45
Колея, м	2,375
Дорожный просвет, м	0,4
Размеры шин, м	
диаметр	1,5
ширина	0,6

Таблица 3

Показатель физико-механических свойств грунтовой поверхности	Категория грунта: залежь суглинка
Влажность W , %	14...18
Несущая способность грунта σ_0 , Н/м ²	$2,18 \cdot 10^6$
Коэффициент объёмного смятия k , Н/м ³	$0,42 \cdot 10^6$
Коэффициент деформации k_τ , м	0,065
Коэффициент трения скольжения $f_{ск}$	0,76
Коэффициент трения покоя $f_{п}$	0,78

Сила сопротивления воздуха $F_{\text{воз}}$ оценивается по формуле: $F_{\text{воз}} = k_B A_B v_d^2$, где k_B — коэффициент сопротивления, $k_B = 0,52 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; A_B — лобовая площадь машины, $A_B = 9,3 \text{ м}^2$.

Зависимость буксования от скорости оценим при помощи формулы: $\varphi_{\text{кр}} = \varphi_{\text{max}} \left(1 - e^{-\frac{k\delta}{1-\delta}}\right)$, где k — коэффициент, оценивающий сцепные свойства грунтовой поверхности. Для залежи суглинка нормальной влажности k находится в пределах 7,9...9,1. При расчётах этот коэффициент был принят равным 8,1.

Потенциальная характеристика рассчитывалась по уравнению: $P_e \eta_{\text{тр}} = F_{\text{дв}} v_d = F_{\text{дв}} v_T (1 - \delta)$, где $\eta_{\text{тр}}$ — коэффициент полезного действия, характеризующий потери мощности в трансмиссии и при расчётах, принятый равным 0,91.

Полученная тяговая характеристика специального колёсного шасси приведена на рис. 8: показаны зависимости $v_d = f(F)$, $\delta = f(F)$ и $\eta_T = f(F)$.

Следует отметить, что тяговая характеристика даёт возможность оценить тягово-сцепные свойства машины от действительной скорости движения или наоборот. Так, максимальная скорость, которую может развить специальное колёсное шасси при заданных условиях движения, равна 48,5 км/ч и ограничивается мощностью двигателя P_e . Наименьшая скорость движения ограничивается тягово-сцепными качествами машины и равна 7,7 км/ч при движущей силе $F_{\text{дв}} = 240 \text{ кН}$ и буксованием 38 %. Максимальный тяговый КПД машина развивает при использовании её в качестве тягача при движущей силе $F_{\text{дв}} = 148 \text{ кН}$ и буксовании 4 % и действительной скорости движения $v_d = 18 \text{ км/ч}$.

Однако тяговая характеристика недостаточно удобна для сравнения тягово-сцепных и скоростных

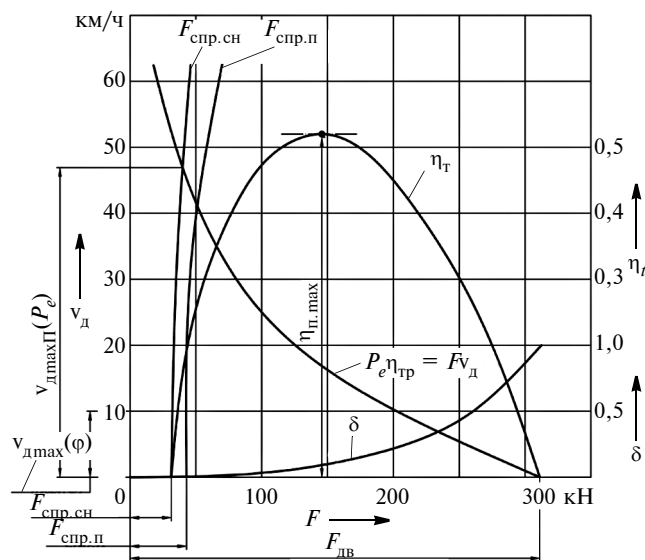


Рис. 8. Тяговая характеристика специального колёсного шасси на грунтовой поверхности — залежи суглинка нормальной влажности

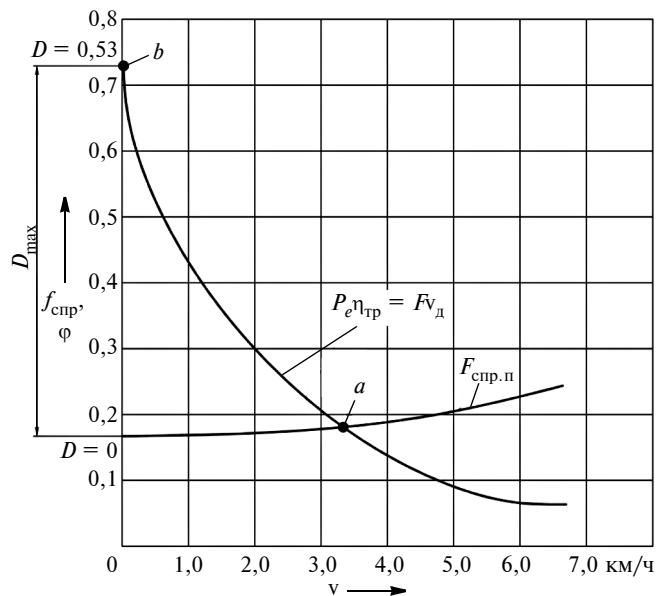


Рис. 9. Динамическая характеристика специального колёсного шасси

свойств машин различных классов, обладающих различной массой, мощностью двигателя, движителями и т.д. В этом случае используется динамическая характеристика.

При этом удобнее пользоваться безразмерной величиной — динамическим фактором $D = (F_{\text{дв}} - F_{\text{спр}})/G_p$, где $F_{\text{дв}} = \varphi_{\text{max}} G$; $F_{\text{спр}}$ — сопротивление движению за счёт образования колеи, аэродинамических силы и сопротивления от деформации грунта. (Если машина движется по горизонтальной поверхности в установившемся режиме. При неустановившемся же режиме в состав силы сопротивления движению добавляются сила сопротивления подъёму и силы инерции.)

На рис. 9 показана динамическая характеристика, отображающая зависимость динамического фактора D и тягово-сцепных свойств машины от скорости, т.е. $D = f(v_0)$, $f_{\text{спр}} = f(v_0)$ и $\varphi = f(v_0)$. В точке a динамический фактор D равен нулю ввиду того, что сопротивление движению $f_{\text{спр}} = f(v_0)$ достигло максимальной величины, равной движущей силе $F_{\text{дв}}$, т.е. $D = (F_{\text{дв}} - F_{\text{спр}})/G = 0$. В точке b динамический фактор достигает максимального значения, так как при этом движущая сила достигает своего максимального значения, а сопротивление движению стремится к минимуму.

Литература

1. Многоцелевые гусеничные и колёсные машины. Теория. / Гуськов В.В. и др.: Под общ. ред. д-ра техн. наук, профессора В.П. Бойкова. — Минск: Новое знание; М.: ИНФРА — М., 2012. — 543 с.
2. Пирковский Ю.В., Шухман С.Б. Теория движения полноприводного автомобиля. М.: ЮНИТИ, 2001. — 230 с.
3. Агейкин Я.С. Проходимость автомобиля. — М.: Машиностроение, 1951. — 232 с.
4. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств. — М.: Машиностроение, 1989. — 240 с.
5. Гуськов В.В. Тракторы. Теория. / В.В. Гуськов и др.: Под общ. ред. проф. В.В. Гуськова. — М.: Машиностроение, 1988. — 376 с.