



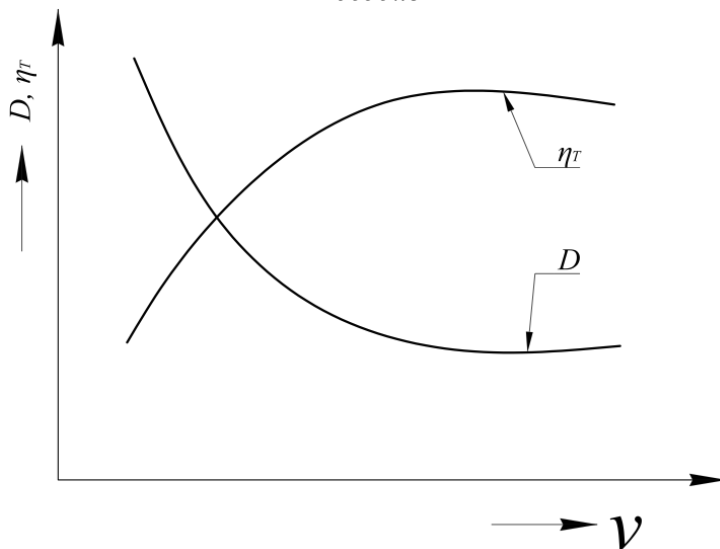
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный
технический университет

Кафедра «Тракторы»

ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МНОГОЦЕЛЕВЫХ КОЛЁСНЫХ МАШИН ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ГРУНТОВЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ

Пособие



Минск
БНТУ
2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Тракторы»

ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МНОГОЦЕЛЕВЫХ КОЛЁСНЫХ МАШИН ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ГРУНТОВЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ

Пособие по дисциплинам «Теория систем “местность–машина”»,
«Теория трактора», «Теория автомобиля»
для студентов специальностей 1-37 01 03 «Тракторостроение»,
1-37 01 04 «Многоцелевые колёсные и гусеничные машины»
автотракторного факультета и 1-37 01 04-02 «Эксплуатация
и ремонт бронетанкового вооружения и техники»
военно-технического факультета

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области транспорта
и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2018

УДК 629.365/367(075.8)

ББК 39.34-019я73

Д46

Авторы:

В. В. Гуськов, В. П. Бойков, Ю. Д. Карпиевич,

А. С. Поварехо, А. А. Сушнёв

Рецензенты:

А. И. Бобровник, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой
«Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод»;

Г. М. Кухарёнок, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой
«Двигатели внутреннего сгорания»

Динамическая характеристика многоцелевых колёсных машин при движении по грунтовым поверхностям: пособие по дисциплинам «Теория систем “местность–машина”», «Теория трактора», «Теория автомобиля» для студентов специальностей 1-37 01 03 «Тракторостроение», 1-37 01 04 «Многоцелевые колёсные и гусеничные машины» автотракторного факультета и 1-37 01 04-02 «Эксплуатация и ремонт бронетанкового вооружения и техники» военно-технического факультета / В.В. Гуськов [и др.]. – Минск: БНТУ, 2018. – 38 с.

ISBN 978-985-583-100-7.

Содержатся материалы по построению динамической характеристики многоцелевой колесной машины при её движении по грунтовой поверхности. Приведены примеры расчётов и построения указанной характеристики.

УДК 629.365/367(075.8)

ББК 39.34-019я73

ISBN 978-985-583-100-7

© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 4 |
| 1. Силы, моменты и реакции, действующие на колесные машины при движении..... | 5 |
| 2. Взаимодействие колеса с грунтовой поверхностью | 7 |
| 3. Буксование | 15 |
| 4. Тяговая и динамическая характеристики колесной машины при движении по грунтовой поверхности | 21 |
| 5. Уравнение движения колесной машины..... | 23 |
| 6. Реакция поверхности движения..... | 25 |
| 7. Тяговая характеристика колесной машины..... | 28 |
| 8. Динамическая характеристика..... | 31 |
| 9. Тяговая и динамическая характеристики специального колёсного шасси 8×8 | 32 |
| Заключение | 37 |
| Список литературы | 38 |

ВВЕДЕНИЕ

Условием движения колеса по поверхности является приложение к оси колеса толкающей силы F_t (ведомое колесо) или крутящего момента $M_{кр}$ (ведущее колесо).

Многоцелевые колесные машины (МКМ) оборудуются колёсными движителями, в общем случае состоящими из ведомых, ведущих и управляемых колёс.

Тягово-сцепные и скоростные свойства МКМ (специальные колёсные шасси, тягачи, колёсные тракторы, погрузчики и др.) описываются процессом взаимодействия колёсного движителя с опорной поверхностью движения.

Тягово-сцепными и скоростными свойствами МКМ называют совокупность свойств, определяющих возможные по характеристикам движателя или сцепления ведущих колёс с дорогой или грунтовой поверхностью диапазоны изменения скоростей движения и предельные интенсивности разгона МКМ при работе на тяговом режиме и различных дорожных условиях [6].

Опорные поверхности движения могут быть искусственными: асфальтовые и бетонные дороги, бульжная мостовая и др. Естественными поверхностями могут быть различные категории минеральных и торфяно-болотных грунтов, покрытых растительностью, или грунтовые дороги.

Процесс взаимодействия колёсного движителя с поверхностью движения характеризуется, с одной стороны, параметрами движителя и нагрузкой (шириной b и диаметром d колеса, давлением воздуха P_v в шинах, рисунком протектора, грунтозацепами, их величиной и расположением, снаряжённой нагрузкой и др.), с другой стороны – физико-механическими свойствами поверхности движения, к которым относятся категории грунта и его фоновая поверхность, влажность W , плотность γ и пористость ξ .

По своим физико-механическим свойствам грунты делятся на минеральные и торфяно-болотные.

В свою очередь минеральные грунты делятся на ряд категорий, важнейшими из которых являются глина, суглинок, супесь, песок. Торфяно-болотные грунты делятся на ряд категорий по влажности: неосушенная залежь, полусосушенная и осушенная. Все категории грунта имеют фоновую поверхность, представляющую верхнюю часть грунта. Фоновая поверхность представляет собой смеси травяных растений и их остатков с минеральным грунтом и характеризуются следующими основными показателями: луг, залежь стерня, пахота.

1. СИЛЫ, МОМЕНТЫ И РЕАКЦИИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА КОЛЕСНЫЕ МАШИНЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ

Рассмотрим процесс движения МКМ по грунтовой поверхности при неустановившемся движении на подъём, рис. 1.1. В качестве примера рассмотрим МКМ с колёсным движителем 6×4, т. е. передние колёса являются ведомыми и управляемыми, а четыре задних колеса – ведущими, неуправляемыми.

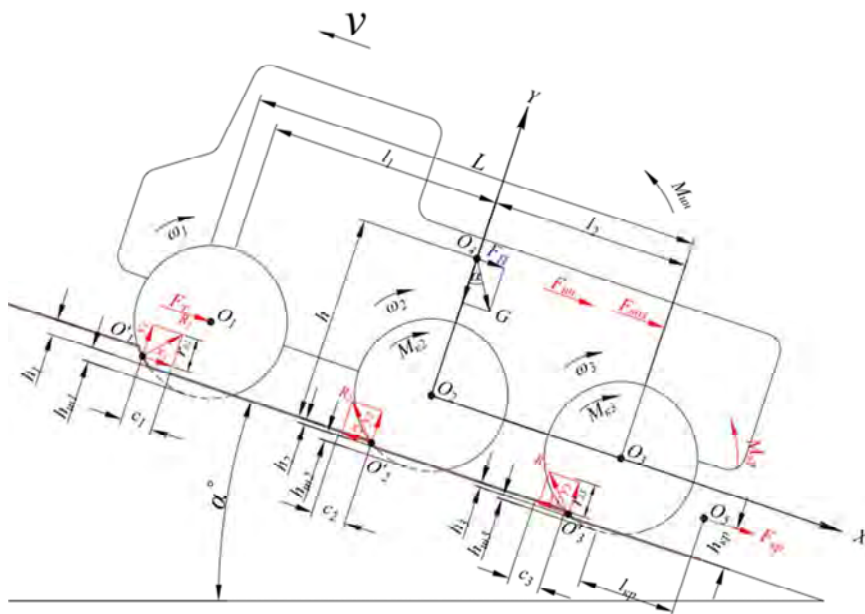


Рис. 1.1. Схема активных сил и моментов, сил инерции и моментов, силы сопротивления воздуха и крюковой нагрузки и реакции грунтовой поверхности

На МКМ действуют: активные силы и моменты (толкающая сила F_T и крутящие моменты M_{Ki} , сила тяжести G , приложенные к центру колёс); силы инерции и моменты инерции $J_{ин}$, приложенные к центру масс O_4 и центрам колёс O_1, O_2, O_3 ; сила сопротивления воздуха, крюковая $F_{кр}$ нагрузка и момент $M_{кр}$ от крюковой нагрузки; реакции грунта R_i , разложенные на две составляющие x_i и y_i .

Составим уравнение движения согласно правилу Д'Аламбера для плоской модели, а именно:

$$\Sigma X = 0; \quad \Sigma Y = 0; \quad \Sigma M_{02} = 0.$$

Тогда

$$\Sigma X = F_{\text{воз}} + F_{\text{ин}} + F_{\text{кр}} + G \sin(\alpha) + x_1 - x_2 - x_3 = 0$$

или

$$x_2 + x_3 = F_{\text{воз}} + F_{\text{ин}} + F_{\text{кр}} + G \sin(\alpha) + x_1. \quad (1.1)$$

Здесь $x_2 + x_3$ – суммарная реакция колеса, направленная в сторону движения и являющаяся движущей реакцией;

x_1 – сила сопротивления качению колеса за счёт смятия грунта опорной поверхности и образования колеи h_i .

$$\Sigma Y = y_1 + y_2 + y_3 - G \cos \alpha = 0$$

или суммарная реакция $y_1 + y_2 + y_3 = y$ равна составляющей веса $G \cos \alpha$, т. е.

$$y = G \cos \alpha. \quad (1.2)$$

При движении по горизонтальной поверхности в установившемся режиме уравнения (1.1) и (1.2) упрощаются и имеют вид

$$x = F_{\text{воз}} + F_{\text{ин}} + F_{\text{кр}}. \quad (1.3)$$

Уравнение (1.3) носит название силового баланса. Умножим обе части уравнения (1.3) на теоретическую скорость v_T движения:

$$v_T = \omega r_d,$$

где ω – угловая скорость;

r_d – кинематический радиус колеса,
и прибавим к правой части уравнения группу сил $\pm (F_{\text{воз}} + F_{\text{спр}} + F_{\text{кр}}) v_d$, умноженную на действительную скорость движения

$$v_d = v_T (1 - \delta).$$

Тогда

$$x v_t = (F_{\text{воз}} + F_{\text{спр}} + F_{\text{кр}}) (v_t - v_d) + F_{\text{кр}} v_d + F_{\text{воз}} v_d. \quad (1.4)$$

Произведение xv_t – мощность, подводимая к ведущим колёсам, а члены

$(F_{\text{воз}} + F_{\text{спр}} + F_{\text{кр}}) (v_t - v_d)$ – мощность, теряемая на буксования или потерю скорости;

$F_{\text{спр}} v_d$ – мощность, теряемая на преодоление сопротивления за счёт смятия грунта движителем и образования колеи;

$F_{\text{воз}} v_d$ – мощность, теряемая на преодоление сопротивления воздуха;

$F_{\text{кр}} v_d$ – мощность, теряемая на преодоление сопротивления прицепа и др.

Уравнение (1.4) носит название мощностного баланса МКМ.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕСА С ГРУНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Для того чтобы оценить процесс взаимодействия колеса с грунтовой поверхностью, примем следующие допущения:

1. Колесо движется по горизонтальной грунтовой поверхности в установившемся режиме.

2. Грунтовая поверхность определяется физико-механическими свойствами и сопротивлением грунтов смятию и сдвигу.

3. В качестве грунтовой поверхности примем луг суглинка нормальной влажности $W = 14\text{--}18\%$.

4. В качестве закона смятия примем зависимость, предложенную профессором В.В. Кацыгиным [4], а именно:

$$\sigma = \sigma_0 \operatorname{th} \frac{k}{\sigma_0} h,$$

где σ – нормальное напряжение при приложении вертикальной нагрузки, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, рис. 1.2;

k – коэффициент объёмного смятия грунта, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$;

h – глубина погружения штампа, м.

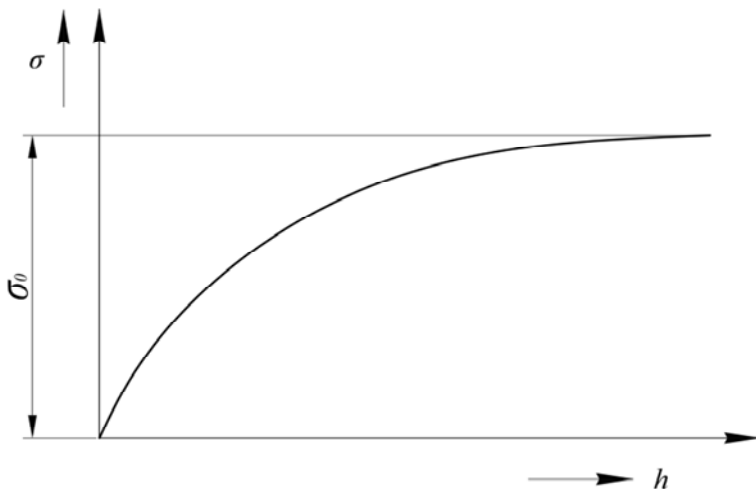


Рис. 2.1. Зависимость напряжения смятия от глубины погружения штампа

5. В качестве закона сдвига применим зависимость, предложенную профессором В. В. Кацыгиным [4], а именно:

$$\tau = b f_{\text{ск}} q_x \left(1 + \frac{f_{\text{п}}}{\text{ch} \frac{\Delta x}{k_{\tau}}} \right) \text{th} \frac{\Delta x}{k_{\tau}}.$$

Здесь:

τ – напряжение сдвига, $\text{Н}/\text{м}^2$, рис. 2.2;

b – ширина штампа, м;

q_x – давление, $\text{Н}/\text{м}^2$;

$f_{\text{ск}}, f_{\text{п}}$ – коэффициенты трения скольжения и покоя;

Δx – сдвиг грунта, м.

6. Опорная поверхность колеса, участвующая в процессе взаимодействия его с грунтовой поверхностью, имеет сложную конфигурацию, что затрудняет расчёт тяговых свойств колеса.

Для упрощения расчётов ряд исследователей [1, 2, 5] предлагают заменить опорную поверхность ведущего колеса опорной поверхностью жёсткого колеса, имеющего приведённый диаметр $D_{\text{пр}}$ (рис. 2.3).

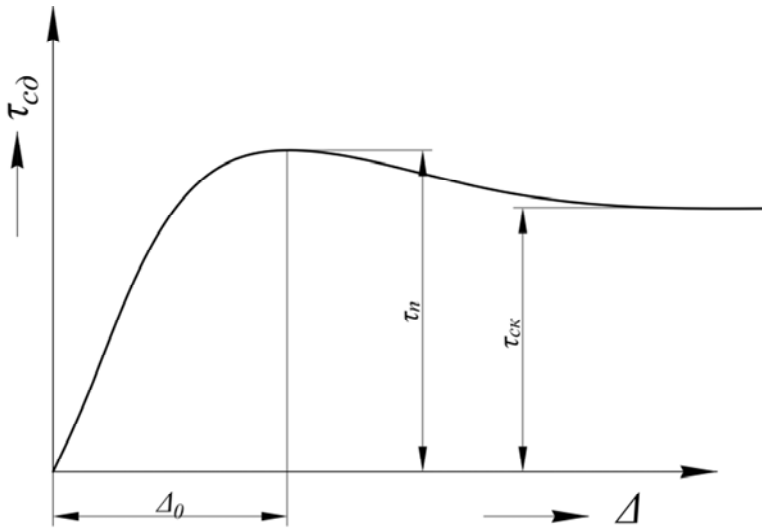


Рис. 2.2. Сопротивление грунтов сдвигающим нагрузкам

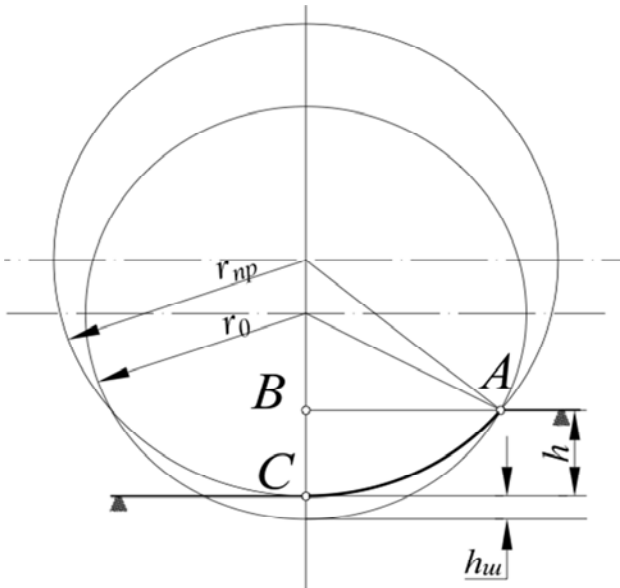


Рис. 2.3. Схема определения приведённого к жёсткому колесу диаметра эластичного колеса

Здесь $D_{\text{пр}} > D_0$, а длины AC опорной поверхности реального и приведенного колеса равны.

Замена диаметра эластичного колеса приведенным диаметром жёсткого осуществляется в соответствии со схемой на рис. 2.3. Длина отрезка AB для эластичного и эквивалентного ему жёсткого колеса

$$AB = \sqrt{r_0^2 - (r_0 - h - h_{\text{ш}})^2} = \sqrt{r_{\text{пр}}^2 - (r_{\text{пр}} - h)^2}$$

или

$$2r_0(h + h_{\text{ш}}) - (h + h_{\text{ш}})^2 = 2r_{\text{пр}}h.$$

Преобразовав выражение, получим

$$D_{\text{пр}} = \frac{D_0(h + h_{\text{ш}}) - h_{\text{ш}}(2h + h_{\text{ш}})}{h} = D_0 + \frac{h_{\text{ш}}}{h}(D_0 - 2h - h_{\text{ш}}). \quad (2.1)$$

Так как второй член правой части формулы (2.1) больше нуля и

$$D_0 > 2h + h_{\text{ш}},$$

то $D_{\text{пр}}$ всегда больше D_0 . При $h_{\text{ш}} \rightarrow 0$ эластичное колесо приближается к жёсткому. Такой случай имеет место при качении эластичного колеса с большим давлением воздуха в шине по переувлажнённому грунту.

Глубину h колес можно рассчитать по уравнениям, предложенным профессором В. В. Гуськовым [2]:

$$F_{\text{снр}} = \int_0^{h_0} b\sigma_0 \text{th} \left[\frac{k}{2b\sigma_0} \ln \frac{D_0 - h}{D_0 - h_0} \right] dh; \quad (2.2)$$

$$G = \int_0^{h_0} \frac{b\sigma(D_0 - 2h)}{2\sqrt{D_0 - h^2}} \text{th} \left[\frac{k}{2b\sigma_0} \ln \frac{D_0 - h}{D_0 - h_0} \right] dh. \quad (2.3)$$

Деформацию шины $h_{ш}$ можно найти по формуле

$$h_{ш} = \frac{G}{2\pi p_{ш} \sqrt{r_0 r_c}},$$

где $p_{ш}$ – давление воздуха в шине, Па;

r_0 – номинальный радиус: $r_0 = D_0/2$, м.

r_c – радиус сечения шины: $r_c \cong b/2$, м;

С учетом этих допущений процесс взаимодействия колеса (ведомого и ведущего) с грунтовой поверхностью представлен на рис. 2.4.

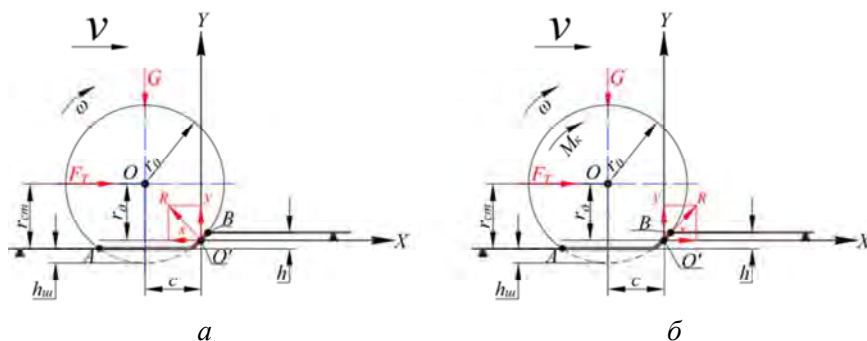


Рис. 2.4. Схема сил и моментов приложенных к ведомому (а) и ведущему (б) колёсам, движущимся по горизонтальной грунтовой поверхности в установившемся режиме

На рис. 2.4:

r_0 , $r_{ст}$, r_d – номинальный, статический и динамический радиусы колеса;

c и r_d – координаты точки O' приложения реакции грунтовой поверхности;

F_T и M_k – толкающая сила и крутящий момент, приложенные к центру O колёс;

h и $h_{ш}$ – глубина колеи и величина прогиба шины под нормальной нагрузкой G .

Рассмотрим подробнее процесс взаимодействия ведомых и ведущих колёс с грунтовой поверхностью.

Ведомое колесо показано на рис. 2.4, а,

На ведомое колесо действует толкающая сила F_T , приложенная к центру колеса и направленная в сторону движения. В результате взаимодействия колеса с грунтовой поверхностью возникает реакция R , направленная против движения, составляющими которой являются реакции x и y .

Для рассмотрения уравнений процесса взаимодействия поверхности колеса AB с грунтовой поверхностью используем правило Д'Аламбера:

$$\Sigma X = 0; \quad \Sigma Y = 0; \quad \Sigma M_0 = 0.$$

Тогда

$$\Sigma X = F_T - x = 0,$$

или

$$F_T = x;$$

$$\Sigma Y = y - G = 0,$$

или

$$y = G;$$

$$\Sigma M_0 = yc - xr_d = 0. \quad (2.4)$$

В уравнении (2.4) момент yc представляет собой момент сопротивления ведомого колеса, возникающий за счёт образования колеи, т. е.

$$yc = cG.$$

Разделим полученное равенство на динамический радиус r_d , тогда сопротивление качению колеса

$$x = \frac{c}{r_d} G.$$

Здесь c/r_d называют коэффициентом сопротивления качению ведомого колеса за счёт образования колеи и обозначают f , а произведение fG – силой сопротивления $F_{спр}$ качению за счёт образования колеи, т. е. $x = fG$.

Ведущее колесо показано на рис. 2.4, б.

На ведущее колесо действует крутящий момент M_k , приложенный к центру колеса O и вращающий колесо по часовой стрелке в сторону движения. Со стороны грунтовой поверхности действует реакция R , приложенная в точке O' и направленная в сторону движения.

Согласно правилу Д'Аламбера

$$\Sigma X = 0; \quad x - F_{\text{ост}} = 0,$$

или
$$x = F_{\text{ост}};$$

$$\Sigma Y = y - G = 0,$$

или
$$y = G;$$

$$\Sigma M_0 = -M_k y c + x r_d = 0,$$

или
$$M_k = y c + x r_d.$$

Разделим полученное равенство на динамический радиус r_d , тогда сопротивление качению колеса

$$\frac{M_k}{r_d} = \frac{c}{r_d} y. \quad (2.5)$$

Здесь M_k / r_d называют касательной силой тяги, приложенной к центру колеса O и равной F_k .

В этом случае $c/y = f_{\text{спр}}$ – коэффициент сопротивления колеса и

$$f_{\text{спр}} G = F_{\text{спр}}.$$

Тогда

$$F_k = x + F_{\text{спр}}. \quad (2.6)$$

Уравнение (2.6) представляет собой тяговый баланс колеса.

Для составления баланса мощности ведущего колеса умножим правую и левую часть уравнения (2.5) на теоретическую скорость движения v_T :

$$v_T = \omega r_k,$$

где ω – угловая скорость колеса, c^{-1} ;

r_k – кинематический радиус колеса, м.

Для учёта пробуксовки δ ведущего колеса к правой части уравнения (2.5) добавим и отнимем сумму $x + F_{\text{спр}}$, умноженную на действительную скорость v_d движения, где

$$v_d = v_T(1 - \delta) = \omega r_k(1 - \delta).$$

При расчётах мощностного баланса ряд исследователей [1, 2] приравнивают радиус качения r_k к динамическому радиусу r_d колеса. С учётом этих допущений уравнение мощностного баланса ведущего колеса имеет вид

$$F_k v_T = (x + F_{\text{спр}}) v_T \pm (x + F_{\text{спр}}) v_d.$$

Приведем подобные члены и получим уравнение мощностного баланса ведущего колеса с учётом буксования:

$$F_k v_T = (x + F_{\text{спр}})(v_T \pm v_d)$$

или

$$P_n = P_{\text{бук}} + P_c + P_{\text{спр}}.$$

Таким образом, потенциальная мощность P_n , подводимая к оси ведущего колеса, расходуется:

- ▶ на $P_{\text{бук}}$ – преодоление буксования колеса;
- ▶ $P_{\text{спр}}$ – преодоление сопротивления грунта при его смятии опорной частью ведущего колеса и образования колеи;
- ▶ P_c – мощность, расходуемая на движение колеса при наличии реакции остова, т. е.

$$x v_T = F_{\text{ост}} v_d.$$

3. БУКСОВАНИЕ

При движении по естественной поверхности грунта процесс взаимодействия движителя МКМ всегда сопровождается буксованием. Чтобы раскрыть природу буксования ведущего колеса МКМ (трактора), рассмотрим процесс взаимодействия колеса с грунтовой поверхностью.

Как известно, при движении МКМ возникают потери скорости за счёт буксования ведущих колёс. Существует несколько видений процесса буксования ведущих колёс. Одно из них, наиболее отображающее реальный процесс буксования ведущих колёс, заключается в том, что при взаимодействии ведущего колеса с грунтом действуют силы трения между опорной поверхностью шины и грунтом, силы, возникающие при упоре грунтозацепов шины в грунт, и силы, возникающие при срезе грунтового кирпича боковыми гранями грунтозацепов. На дорогах с твёрдым покрытием основное значение имеют силы трения. На рыхлых грунтах значение сил сдвига и среза возрастает и во многих случаях является определяющим.

При движении ведущего колеса (рис. 3.1) его грунтозацепы сдвигают и срезают грунт в направлении, обратном движению. Упор грунтозацепов в грунт, сдвиг и срез грунтовых кирпичей, зажатых между ними, возможны только при полном использовании сил трения, т. е. когда имеется пробуксовка колеса.

Теоретически передача ведущего момента обязательно должна сопровождаться буксованием, в результате чего ось колеса перемещается на соответствующее расстояние назад. В этом главным образом заключаются физическая сущность буксования ведущих колёс на деформируемой поверхности и причина снижения их поступательной скорости. Дополнительное незначительное снижение поступательной скорости ведущих колёс обуславливается тангенциальными деформациями шин. Благодаря эластичности шины в окружном направлении её участки, приближающиеся при качении колеса к площадке контакта шины с грунтом, под действием ведущего момента сжимаются, вследствие чего путь, проходимый колесом за один оборот, уменьшается. Из сказанного выше следует, что сцепление опорной поверхности колеса с грунтом происходит за счёт сил трения, возникающих между шиной и грунтом, и силы сдвига и среза грунтовых кирпичей, зажатых между грунтозацепами. При движении колеса ($v = \text{const}$) сдвиг и срез грунто-

вых кирпичей происходит в основном в период выхода последнего
 грунтозацепа опорной поверхности колеса из грунта (см. рис. 3.1).

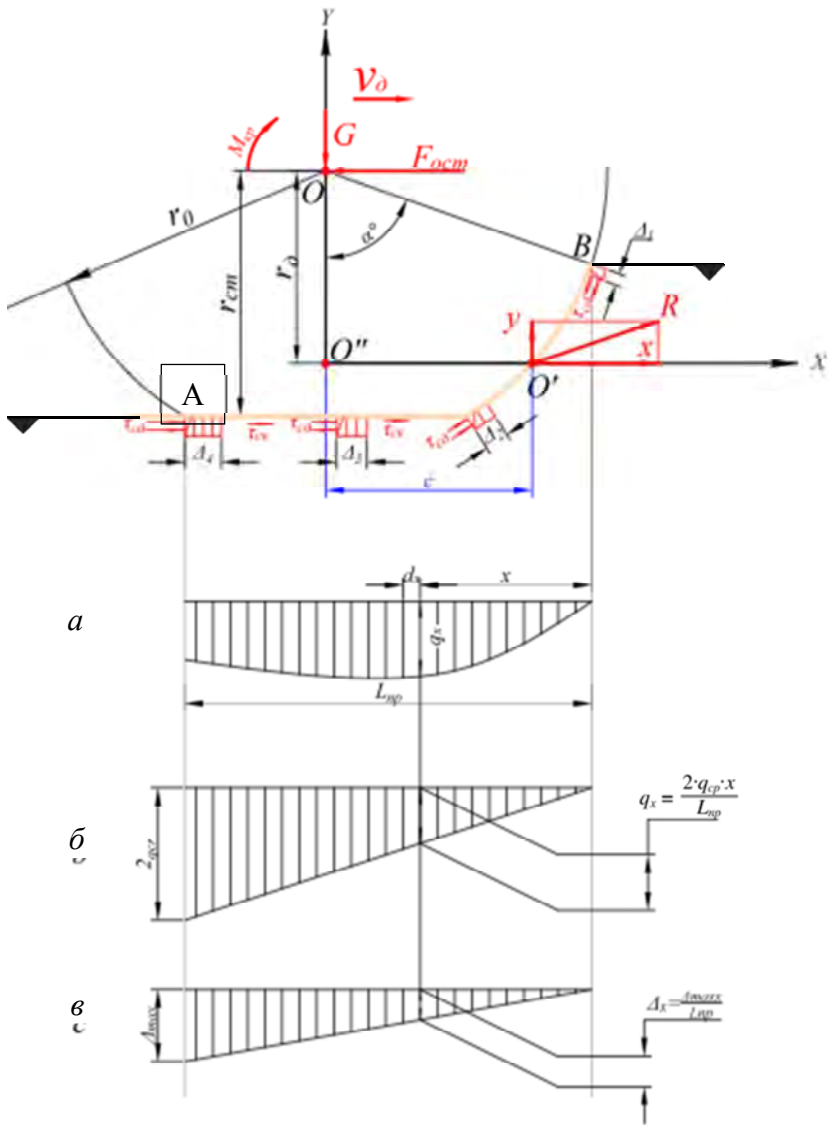


Рис. 3.1. Схема взаимодействия ведущего колеса с грунтовой поверхностью

В этот момент нагрузка от вышедшего из зацепления грунтозацепа перераспределяется на остальные находящиеся в зацеплении. Все грунтозацепы сдвигают и срезают грунт на одинаковую величину Δ_i , причём первый сдвигается на величину Δ_i , второй – на величину

$$\Delta_i + \Delta_i = 2\Delta_i,$$

третий – на

$$\Delta_i + \Delta_i + \Delta_i = 3\Delta_i \text{ и т. д.}$$

Поскольку первый грунтозацеп пройдёт все стадии зацепления от входа в грунт до выхода из него, наибольший сдвиг и срез грунта при выходе его из зацепления

$$\Delta_{\max} = n\Delta_i.$$

Здесь n – число грунтозацепов в зацеплении опорной поверхности колеса с грунтом.

С другой стороны, наибольший сдвиг и срез грунта можно представить как произведение коэффициента буксования δ на длину опорной поверхности колеса L , т. е.

$$\Delta_{\max} = \delta L.$$

Исследования [3, 4] показали, что распределение деформации сдвига и среза грунтовых кирпичей в контакте опорной поверхности колеса с грунтом можно представить виде треугольника (см. рис. 3.1).

Напряжения сдвига $\tau_{\text{сд},i}$, возникающие в грунте при воздействии на него грунтозацепами, возрастают до определённого максимума, после чего они убывают и при полном срезе грунтового кирпича достигают постоянного значения $\tau_{\text{сд},\text{ск}}$ (рис. 3.1, а).

В то же время напряжение $\tau_{\text{ср}}$, возникающее при срезе грунтового кирпича боковыми гранями грунтозацепа с высотой $h_{\text{г}}$, в первом приближении можно считать не зависящим от деформации.

Коэффициенты трения $f_{\text{н}}$ покоя и скольжения $f_{\text{ск}}$ зависят от давления q_x , причём чем больше давление, тем меньше их величина. На рис. 3.2 показаны эти зависимости для двух категорий грунта: стерни суглинка и торфяника.

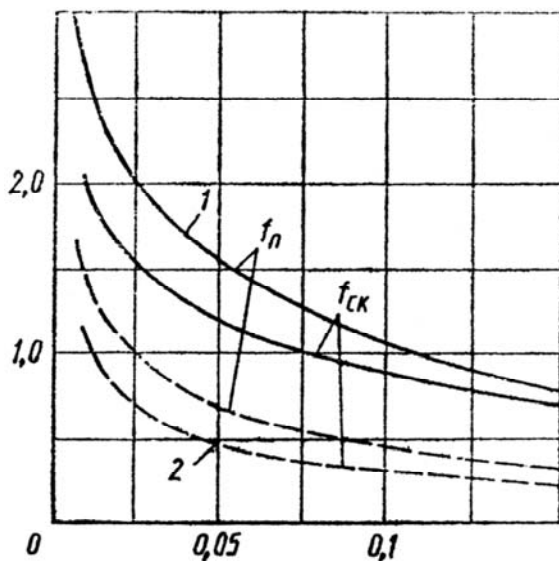


Рис. 3.2. Зависимость коэффициентов трения покоя f_n и скольжения $f_{ск}$ от давления:
 1 – суглинок, стерня (абсолютная влажность 14–16 %);
 2 – торфяник, стерня (относительная влажность 70–76 %)

Средние значения коэффициентов трения покоя и скольжения при $q_x = 0,02–0,05$ МПа (средние значения давления опорной поверхности колёс МКМ) для различных категорий грунтовой поверхности и фонов представлены в таблице (по литературным источникам [1, 2, 3, 4]). Здесь же представлены расчётные значения коэффициента K_τ деформации.

Коэффициенты трения f_n покоя, скольжения $f_{ск}$ и деформации K_τ

| Наименование грунта | Влажность, % | $f_{ск}$ | f_n | K_τ |
|---------------------------|--------------|----------|-------|----------|
| <i>Супесь:</i> | | | | |
| <i>целина</i> | 12–20 | – | – | – |
| <i>стерня зерновых</i> | 12–20 | 0,79 | 0,82 | 0,04 |
| <i>слежавшаяся пахота</i> | 12–20 | – | – | – |

Окончание таблицы

| Наименование грунта | Влажность, % | $f_{ск}$ | $f_{п}$ | K_{τ} |
|----------------------------------|--------------|----------|---------|------------|
| <i>Суглинок лёгкий:</i> | | | | |
| <i>целина</i> | 12–20 | 0,76 | 0,78 | 0,03 |
| <i>стерня зерновых</i> | 15–17 | 0,72 | 0,74 | 0,03 |
| <i>слежавшаяся пахота</i> | 11–19 | 0,69 | 0,71 | 0,03 |
| <i>Суглинок тяжёлый:</i> | | | | |
| <i>целина</i> | 15–20 | – | – | – |
| <i>стерня зерновых</i> | 16–20 | 0,76 | 0,79 | 0,04 |
| <i>слежавшаяся пахота</i> | 13–18 | – | – | – |
| <i>Торфяник:</i> | | | | |
| <i>целина</i> | 76–88 | – | – | – |
| <i>стерня зерновых</i> | 70–76 | 0,73 | 0,75 | 0,05 |
| <i>слежавшаяся пахота</i> | 80–84 | – | – | – |
| <i>Переувлажнённый чернозем:</i> | | | | |
| <i>рисовые чеки</i> | 48–56 | 0,49 | 0,38 | 0,05 |

Таким образом, движущая реакция x ведущего эластичного колеса, оборудованного грунтозацепами, равна сумме сил трения и реакций сдвига и среза на каждом грунтозацепе и имеет максимальное значение при некотором буксовании меньше единицы (в пределах 25–45 % буксования в зависимости от категории грунта).

Используем зависимость

$$\tau = f(\Delta) [2],$$

предложенную профессором В.В. Кацыгиным для определения зависимости движущей реакции (силы) x от напряжений сдвига, см. рис. 2.2.

При приложении крутящего момента M_k к оси ведущего колеса возникает реакция сдвига, направленная в сторону качения колеса (см. рис. 3.1) нормально к упорам грунтозацепа.

В этом случае суммарная реакция сдвига x :

$$x = \int_0^{L_{\text{пр}}} b f_{\text{ск}} q_x \left(1 + \frac{f_{\text{п}}}{\text{ch} \frac{\Delta x}{k_{\tau}}} \right) \text{th} \frac{\Delta x}{k_{\tau}} dx. \quad (3.1)$$

Здесь Δx – деформация сдвига, см. рис. 3.1;
 q_x – нормальное давление:

$$q_x = \sum_0^{L_{\text{пр}}} q_{xi}.$$

Поскольку согласно предположению, что деформацию сдвига грунта грунтозацепами можно представить в виде треугольника,

$$\Delta x = \delta_x L,$$

где δ_x – буксование на длине опорной поверхности x .

Тогда уравнение (3.1) имеет вид

$$x = \int_0^{L_{\text{пр}}} b f_{\text{ск}} q_x \left(1 + \frac{f_{\text{п}}}{\text{ch} \frac{\delta_x L_{\text{пр}}}{k_{\tau}}} \right) \text{th} \frac{\delta_x L_{\text{пр}}}{k_{\tau}} dx. \quad (3.2)$$

Здесь $L_{\text{пр}}$ – приведенная длина опорной части колеса (AB , см. рис. 3.1):

$$L_{\text{пр}} = r_0 \text{arctg} \sqrt{\frac{2r_0 h - h^2}{r - h}} + \sqrt{2r_0 h}.$$

Следует отметить, что давление q_x опорной поверхности колеса распределено неравномерно по длине $L_{\text{пр}}$.

Для упрощения расчётов [1, 3, 2] проводят замену сложной эпюры распределения давления по опорной поверхности колеса, в которой максимальное давление q_x достигает значения

$$q_{x\max} = 2q_{\text{ср}}.$$

Принимая эти допущения, можно определить зависимость движущей реакции x от буксования δ по следующему уравнению:

$$x = \int_0^{L_{\text{пр}}} \frac{2bf_{\text{ск}}q_x X}{L_{\text{пр}}^2} \left(1 + \frac{f_{\text{п}}}{\text{ch} \frac{\delta_x L_{\text{пр}}}{k_{\tau}}} \right) \text{th} \frac{\delta_x L_{\text{пр}}}{k_{\tau}} dx.$$

4. ТЯГОВАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ГРУНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В теории мобильных машин тягово-цепные свойства последних оцениваются тяговой характеристикой, а скоростные свойства – динамической.

Как было установлено ранее, движение МКМ по грунтовой поверхности всегда сопровождается буксованием, т. е. потерей скорости движения.

Для упрощения расчётов движение МКМ по горизонтальной поверхности считается равномерным.

В связи с этим ведущее колесо МКМ оборудуется грунтозацепами (рис. 4.1), которые улучшают сцепные свойства колеса за счёт их упора в грунт.

Сопротивление грунта к образованию колеи принято оценивать коэффициентом качения f_k , а сцепные качества – коэффициентом сцепления φ .

Процесс взаимодействия колеса с поверхностью движения можно представить единым процессом, рис. 4.2.

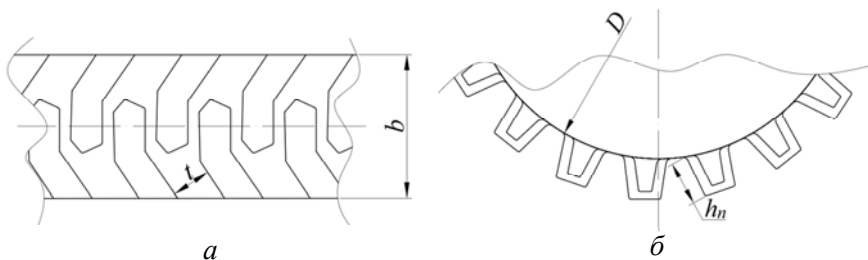


Рис. 4.1. Рисунок протектора шины ведущего колеса МКМ:
 t – шаг грунтозацепа;
 h_n – высота протектора (грунтозацепа)

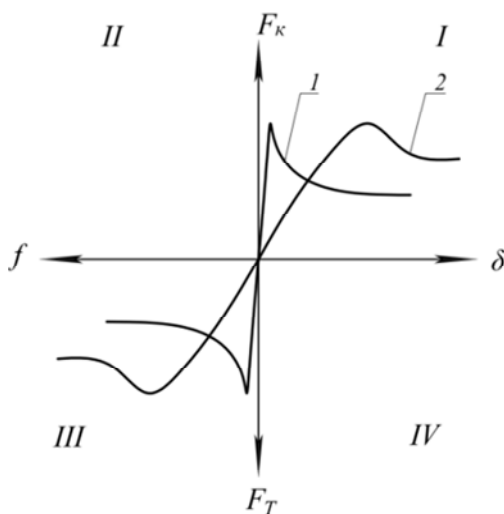


Рис. 4.2. Процесс скольжения-буксования

На рис. 4.2 показаны процессы скольжения-буксования, где δ – буксование (в долях единиц);

f – скольжение (в пределах значения коэффициента трения f_n покоя).

Кривая 1 относится к искусственным, кривая 2 – к естественным поверхностям движения. В первой четверти показаны силы сцепления, которые формируют движущую силу F_k .

При движении по дорогам (искусственные поверхности движения – линия 1) касательная F_k сила тяги возрастает почти мгновен-

но, достигая максимальной величины при приложении максимального $M_{\text{кmax}}$ крутящего момента, т. е.

$$F_{\text{кmax}} = \Psi_{\text{max}} G,$$

где Ψ – коэффициент сцепления.

При торможении, тормозная сила зависит от степени приложения тормозного момента $M_{\text{тор}}$, достигая максимальной величины при полном скольжении, т. е.

$$F_{\text{тор. max}} = f_{\text{п}} G.$$

5. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ

Согласно рис. 1.1 тяговый баланс МКМ имеет вид

$$x_2 + x_3 = x_1 + F_{\text{воз}} + F_{\text{ин}} + F_{\text{р}} + F_{\text{п}} + F_{\text{кр}},$$

где $x_2 + x_3 = F_{\text{кр}}$ – движущая сила, кН;

x_1 – сопротивление движению за счёт смятия грунта движителем и образования колеи: $x = F_{\text{спр}}$;

$F_{\text{воз}}$ – сопротивление воздуха, Н;

$F_{\text{ин}}$ – сила инерции, Н;

$F_{\text{п}}$ – сопротивление подъёму, Н;

$F_{\text{кр}}$ – крюковая нагрузка, Н.

Рассмотрим подробнее силы, действующие на МКМ, рис. 5.1.

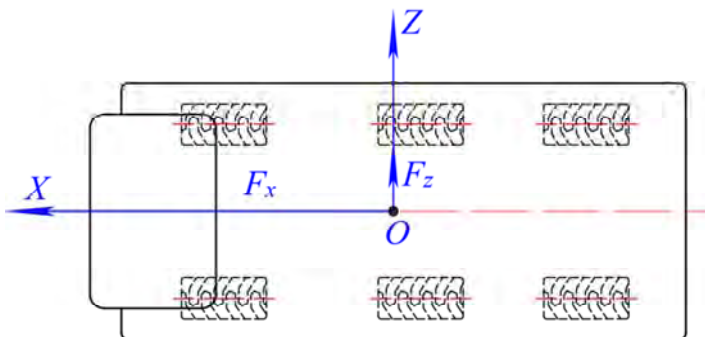


Рис. 5.1. Силы, действующие на МКМ при повороте

При определении скоростей и ускорений МКМ принимают различные допущения как по составу системы (число масс, характер связей), так и по характеру движения. МКМ с механической трансмиссией имеет однозначную связь частоты вращения всех вращающихся масс с частотой вращения коленчатого вала двигателя. Изучая тягово-скоростные свойства МКМ, пренебрегают взаимным перемещением всех отдельных масс, кроме относительного вращения деталей двигателя, трансмиссии и колёс.

Считается, что центр масс МКМ совершает плоское движение, копируя продольный профиль дороги (грунтовой поверхности) без колебаний, вызываемых её неровностями. На рис. 1.1 и 5.1 в качестве примера показано трёхосное колёсное шасси, движущееся по плоскому участку дороги. Если продольный профиль дороги криволинейный, то МКМ кроме поступательного движения совершает ещё и вращательное движение относительно оси, проходящей через центр масс и перпендикулярной плоскости движения (поперечная ось Z , см. рис. 5.1). Проходящую через центр масс ось X , параллельную плоскости движения, называют продольной осью, ось Y , перпендикулярную X и Z и направленную вверх, – нормальной.

Скоростью и ускорением МКМ называют скорость и ускорение ее центров масс. Для их определения достаточно знать внешние силы, действующие на МКМ. Определить некоторые внешние силы можно, зная соответствующие внутренние силы.

К внешним силам относятся сила тяжести, реакции дороги, аэродинамические реакции и крюковое усилие.

Сила тяжести. Её величину и точку O (центр масс) можно определить по параметрам, приведённым в технических характеристиках и справочных материалах.

В современных технических характеристиках обычно приводят собственную (снаряжённая) m_b и полную m_a массы МКМ. Масса снаряжённой МКМ – масса МКМ без груза, полностью заправленного топливом и другими техническими жидкостями, а также снаряжённой инструментом, дополнительным оборудованием и запасным колесом. Полная масса включает еще массы водителя и груза по номинальной грузоподъёмности.

Модули сил тяжести МКМ, стоящих на горизонтальной плоскости при полной и снаряжённой массе, равны соответственно

$$G_a = m_a g;$$

$$G_6 = m_6 g \quad (g - \text{ускорение свободного падения, м/с}^2).$$

Положение центра масс по длине у МКМ определяется расстояниями l_1 и l_2 до геометрических осей вращения колёс. Эти оси будем называть передней и задней осями МКМ. Расстояние $l_1 + l_2 = L$ называют базой.

Значения l_1 и l_2 могут быть найдены по параметрам, приводимым в технических характеристиках. Высота h расположения центра масс приводится в справочной литературе.

6. РЕАКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Движение МКМ по естественной поверхности грунта всегда сопровождается смятием грунта опорными частями колес и сдвигом его в направлении, обратном движению. В первом случае образуются колея, оцениваемая высотой h , и сила $F_{\text{спр}}$ сопротивления движению. Второй случай сопровождается буксованием δ и образованием движущей реакции $F_{\text{дв}}$.

При этом сила сопротивления качению колеса $F_{\text{спр}}$ оценивается формулой

$$F_{\text{спр}} = f_k G,$$

где f_k – суммарный коэффициент, включающий деформацию грунтовой поверхности $f_{\text{п}}$ и деформацию шины $f_{\text{ш}}$, т. е.

$$f_k = f_{\text{п}} + f_{\text{ш}}.$$

Как отмечают исследователи [1, 3, 5], сила сопротивления зависит от скорости движения, и предлагают оценивать ее формулой

$$f_k = f_{k0}(1 + (0,06v_d)^2).$$

В свою очередь, движущая сила F_k (движущая реакции X) оценивается коэффициентом сцепления ϕ и силой тяжести G , т. е.

$$F_k = \phi G.$$

6.1. Сила сопротивления подъёму F_{Π}

Составляющая силы тяжести является ее проекцией на направление вектора скорости центра масс МКМ. Радиусы кривизны вертикального профиля дороги обычно велики по сравнению с базой МКМ, поэтому отрезки дороги, на которых в каждый данный момент находится МКМ, можно заменить плоскостями, имеющими продольный наклон α , и рассматривать силу F_{Π} как составляющую силы тяжести, параллельную этой плоскости, см. рис. 5.1. Тогда

$$F_{\Pi} = G \sin \alpha.$$

При небольших углах α синус может быть заменён тангенсом. В дорожном строительстве тангенс угла наклона дороги к горизонту называют продольным уклоном i , который может быть выражен в процентах.

Сила сопротивления подъёму

$$F_{\Pi} = G_a i$$

может быть как положительной, так и отрицательной. Знак F_{Π} определяется знаком α , который считается положительным на подъёме.

6.2. Сила сопротивления воздуха $F_{\text{воз}}$

Составляющая полной аэродинамической силы направлена по продольной оси МКМ. Аэродинамические силы могут возникать в результате движения МКМ в неподвижной воздушной среде, обтекания неподвижной МКМ потоком движущегося воздуха (ветра), движения МКМ в движущемся воздушном потоке, т. е. при наличии ветра. Элементарные аэродинамические силы, действующие в каждой точке поверхности МКМ, различны по величине и направлению. Совокупность этих элементарных сил может быть заменена равнодействующей $F_{\text{в}}$ (полной аэродинамической силой).

$$F_{\text{воз}} = k_a A_B v_d^2,$$

где k_a – коэффициент сопротивления воздуха, $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{М}^2}$;

A_B – лобовая площадь МКМ, т. е. площадь проекции МКМ на плоскость, перпендикулярную его продольной оси, м^2 ;

v_d – действительная скорость движения, $\frac{\text{М}}{\text{с}}$.

6.3. Сила инерции $F_{\text{ин}}$

Сила инерции на поступательном (переносном) движении оценивается формулой

$$F_{\text{ин}} = m_a \frac{\partial v_0}{\partial t},$$

где m_a – полная масса МКМ, кг.

Сила сопротивления разгону F_p оценивается формулой

$$F_p = m \delta_{\text{вр}} j,$$

где $\delta_{\text{вр}}$ – коэффициент учёта вращающихся масс;

j – ускорение поступательного движения, $\frac{\text{М}}{\text{с}^2}$.

$$\delta = \frac{1 + \left(\sum J_{M_i} u_i^2 \eta_{\text{тр},i} + \sum J_k \right)}{m r_k r_d},$$

где J_{M_i} – момент инерции вращающейся i -й массы;

u_i – передаточные отношения;

$\eta_{\text{тр},i}$ – КПД i -й вращающейся массы;

r_k – кинематический радиус колеса, м;

r_d – динамический радиус колеса, м.

7. ТЯГОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ

Графическое изображение силового баланса в координатах «сила–скорость», называется *тяговой характеристикой*. На рис. 7.1 показана тяговая характеристика МКМ, движущейся по горизонтальной грунтовой поверхности в установившемся режиме.

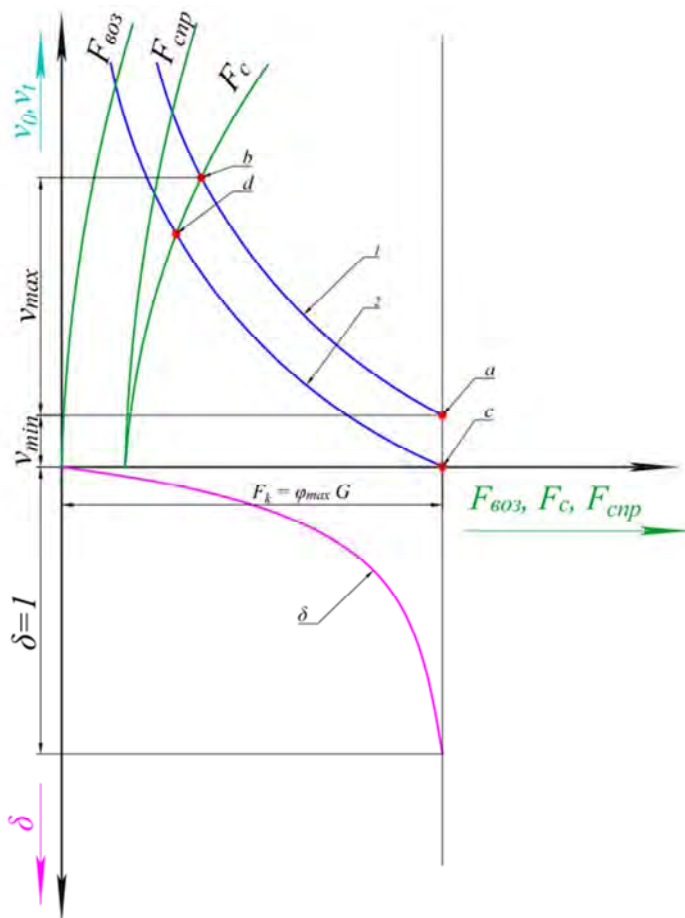


Рис. 7.1. Тяговая характеристика МКМ при движении по горизонтальной поверхности в установившемся режиме:
 1 – потенциальная характеристика МКМ;
 2 – действительная характеристика МКМ

Под потенциальной характеристикой МКМ понимается возможность реализации теоретической скорости движения при различных силах сопротивления движению.

Она рассчитывается по формуле

$$F_{д\cdot v_i} = \frac{p_e \eta_{тр} i}{r_d},$$

где p_e – мощность двигателя, кВт;

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

i – передаточное число i -й передачи;

r_d – динамический радиус ведущего колеса, м.

На кривой 1 имеются две характерные точки:

a, в которой скорость движения МКМ ограничивается сцепными свойствами:

$$F_k = \varphi_{\max} G;$$

b, в которой скорость движения МКМ ограничивается мощностью двигателя.

Под действительной характеристикой подразумевается возможность реализации тягово-сцепных и скоростных свойств при наличии буксования. Она рассчитывается по формуле

$$Fv_0 = Fv_T(1 - \delta) = \frac{p_e \eta_{тр} i}{r_d}.$$

На кривой 2 также имеются две характерные точки:

c, в которой движение МКМ невозможно ввиду полного буксования ($\delta = 1$);

d, в которой скорость движения МКМ ограничивается мощностью двигателя.

Представляет интерес исследовать зависимость тягового коэффициента η_T полезного действия, под которым будем понимать зависимость его от показателей процесса взаимодействия ведущего колеса с опорной поверхностью, см. рис. 7.1:

$$\eta_T = \eta_{тр} \eta_r \eta_\delta \eta_{спр},$$

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

η_r – КПД, учитывающий потери за счёт деформации шины;

η_δ – КПД, учитывающий потери скорости движения;

$\eta_{спр}$ – КПД, учитывающий потери за счёт смятия грунта движителем и образования колеи.

Примем допущение, что МКМ движется по горизонтальной грунтовой поверхности в установившемся режиме, со снаряжённой $m_{сн}$ массой, полной массой m_n (вес устанавливаемого на МКМ оборудования) и массой прицепа $m_{пр}$.

Под тяговым КПД будем понимать отношение мощности P_n , идущей на совершение полезной работы, к мощности, развиваемой двигателем МКМ, P_e , т. е.

$$\eta_T = P_n / P_e.$$

В этом случае тяговый КПД снаряжённой машины без оборудования и крюковой нагрузки равен 0, рис. 7.2.

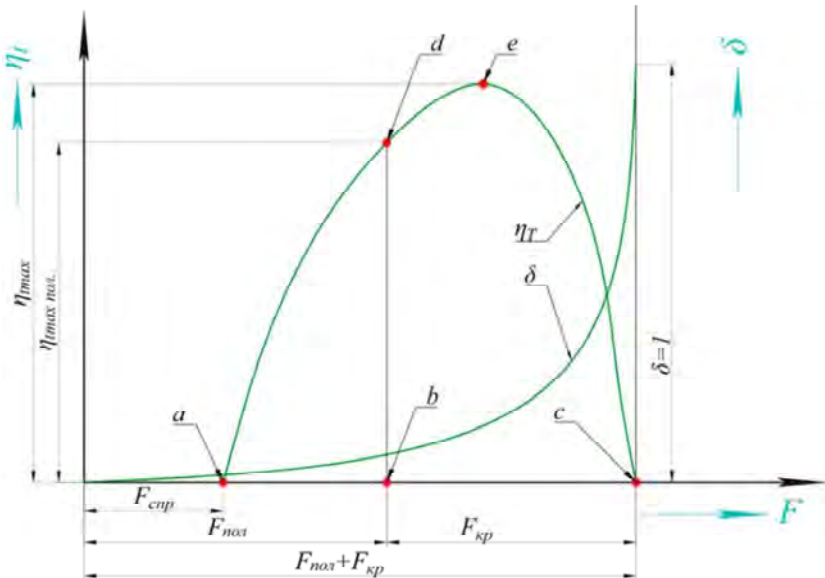


Рис. 7.2. Зависимость тягового η_T КПД МКМ от развиваемой силы тяги

С другой стороны, тяговый КПД η_T в точке c тоже равен 0, поскольку движитель МКМ 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 МКМ в качестве тягача и определить массу буксируемого прицепа.

8. ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Динамическая характеристика в отличие от тяговой даёт возможность оценить скоростные свойства МКМ, рис. 8.1. Для сравнительной оценки свойств различных МКМ, обладающих различной массой и мощностью двигателей, удобнее использовать безразмерные величины, т. е.

$$f_{спр} = \frac{F_{спр}}{G}; \quad \varphi_{сц} = \frac{F_{к}}{G} \quad \text{и} \quad D = \frac{F_{к} - F_{спр}}{G},$$

где D – динамический фактор.

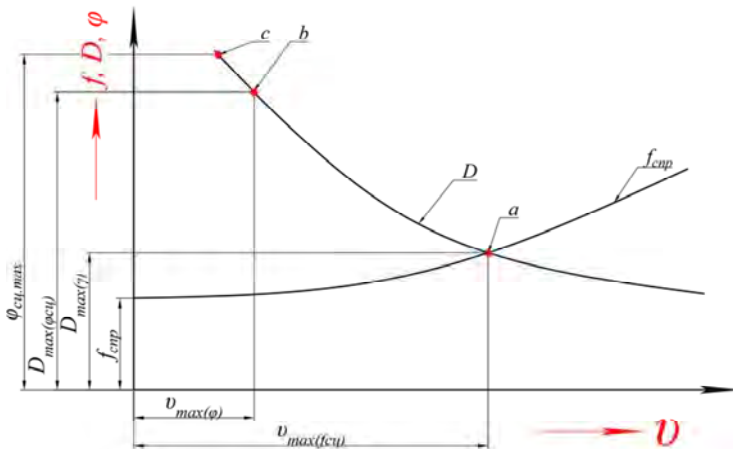


Рис. 8.1. Динамическая характеристика МКМ

На зависимости $D = f(f_{\text{ци}}, \varphi_{\text{ци}})$ имеются три точки – a, b, c .

В точке a МКМ достигает максимальной скорости движения, обусловленной сопротивлением движению.

В точке b скорость ограничивается тяговыми возможностями МКМ ($\varphi_{\text{ци}} \rightarrow \max$).

Точка c означает полное буксование МКМ ($\delta \rightarrow 1$).

9. ТЯГОВАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО КОЛЁСНОГО ШАССИ (СКШ) 8×8

В качестве примера построение динамической характеристики рассмотрим движение полноприводного 8×8 специального колёсного шасси МЗКТ-7930 семейства «Астролог», имеющего движитель в качестве 16 шин ВИ-203 (1500×600-635) и движущегося по горизонтальной поверхности залежи суглинка нормальной влажности ($W = 14-18\%$).

Параметры МКМ приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Параметры МКМ

| Марка МКМ | Мощность двигателя, кВт (л.с.) | Снаряжённая масса, т | Полная масса, т | Масса установленного оборудования, т | Максимальная скорость движения, км/ч(м/с) | Площадь лобового сопротивления, м ² | База, м | Колея, м | Дорожный просвет, м | Шина | |
|---------------|--------------------------------|----------------------|-----------------|--------------------------------------|---|--|---------|----------|---------------------|------------|-----------|
| | | | | | | | | | | Диаметр, м | Ширина, м |
| СКШ МЗКТ 7930 | 368(500) | 21,0 | 43,0 | 22,0 | 70,0 (19,44) | 9,3 | 8,45 | 2,375 | 0,4 | 1,5 | 0,6 |

Показатели физико-механических свойств грунта приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Показатели физико-механических свойств грунтовой поверхности

| Категория грунта | Влажность W , % | Несущая способность грунта σ_0 , Н/м ² | Коэффициент объёмного смятия k , Н/м ³ | Коэффициент деформации k_τ , м | Коэффициент трения скольжения $f_{ск}$ | Коэффициент трения покоя $f_{п}$ |
|------------------|-------------------|--|---|-------------------------------------|--|----------------------------------|
| Залежь суглинка | 14–18 | $2,18 \cdot 10^6$ | $0,42 \cdot 10^6$ | 0,065 | 0,76 | 0,78 |

При снаряжённой массе $m_{сн} = 21$ т (весовая нагрузка $G_{сн} = 206$ кН) в результате расчёта по уравнениям (2.2), (2.3), (3.2) получены следующие результаты.

Сила сопротивления движению за счёт смятия грунта движителем и образования колеи на минимальной скорости движения:

$$F_{спр0} = 8,7 \text{ кН};$$

$$f_{спр0} = 0,05 ;$$

$$h = 0,03 \text{ м.}$$

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

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

Зависимость тяговых показателей от скорости движения определяется по эмпирической формуле

$$F_{спр} = F_{спр0} = (1 + (0,06v_d)^2),$$

где v_d – действительная скорость движения:

$$v_d = v_\tau (1 - \delta) = \omega r_k (1 - \delta);$$

ω – угловая скорость колёс, рад/с ;

r_k – кинематический радиус, м;

δ – буксование в долях единиц.

При расчётах радиус r_k приравнивается к статическому $r_{ст}$ радиусу, который оценивается при помощи формулы Хейдекеля [2]:

$$r_{ст} = r_0 - h_{ст},$$

где r_0 – номинальный радиус, м;

$h_{ст}$ – величина прогиба шины под нагрузкой:

$$h_{ст} = \frac{G}{2\pi P_w \sqrt{r_0 r_c}}, \text{ м},$$

где P_w – давление воздуха в шине, Па;

r_c – радиус сечения шины: $r_c \cong b/2$,

где b – ширина шины.

Сила сопротивления воздуха $F_{воз}$ оценивается по формуле

$$F_{воз} = k_B A_B v_d^2,$$

где k_B – коэффициент сопротивления: $k_B = 0,52 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$;

A_B – лобовая площадь СКШ, м²: $A_B = 9,3 \text{ м}^2$.

Зависимость буксования от скорости оценим при помощи формулы

$$\Phi_{\max} \left(1 - e^{-\frac{\kappa \delta}{1 - \delta}} \right),$$

где κ – коэффициент оценивающий сцепные свойства грунтовой поверхности.

Для залежи суглинка нормальной влажности κ находится в пределах 7,9–9,1.

При расчётах этот коэффициент был принят равным 8,1.

Потенциальная характеристика рассчитывалась по уравнению:

$$P_e \eta_{тр} = F_{дв} v_d = F_{дв} v_T (1 - \delta),$$

где $\eta_{тр}$ – коэффициент полезного действия, оценивающий потери мощности в трансмиссии.

Наименьшая скорость движения ограничивается тягово-сцепными качествами машины и равна $7,7 \text{ км/ч}$ при движущей силе $F_{\text{дв}} = 240 \text{ кН}$ и буксовании 38% .

Максимальный тяговый КПД машина развивает при использовании её в качестве тягача, при движущей силе $F_{\text{дв}} = 148 \text{ кН}$, буксовании 4% и действительной скорости движения $v_{\text{д}} = 18 \text{ км/ч}$.

Однако тяговая характеристика недостаточно удобна для сравнения тягово-сцепных и скоростных свойств машин различных классов, обладающих различной массой, мощностью двигателя, движителями и т. д.

В этом случае удобнее пользоваться безразмерной величиной D – динамическим фактором:

$$D = \frac{F_{\text{дв}} - F_{\text{спр}}}{G_{\text{п}}},$$

где $F_{\text{дв}} = \varphi_{\text{max}} G$;

$F_{\text{спр}}$ – сопротивление движению за счёт образования колеи, аэродинамических сил и сопротивления от деформации грунта.

При этом полагается, что машина движется по горизонтальной поверхности в установившемся режиме.

При неустановившемся режиме в качестве силы сопротивления движения добавляются сила сопротивления подъёму, сила инерции и сила сопротивления разгону.

На рис. 9.2 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 $F_{\text{дв}}$ силе, т. е.

$$D = \frac{F_{\text{дв}} - F_{\text{спр}}}{G} = 0.$$

В точке **b** динамический фактор достигает максимального значения, так как при этом движущая сила достигает своего максималь-

ного значения, а сопротивление движению стремится к минимальному значению.

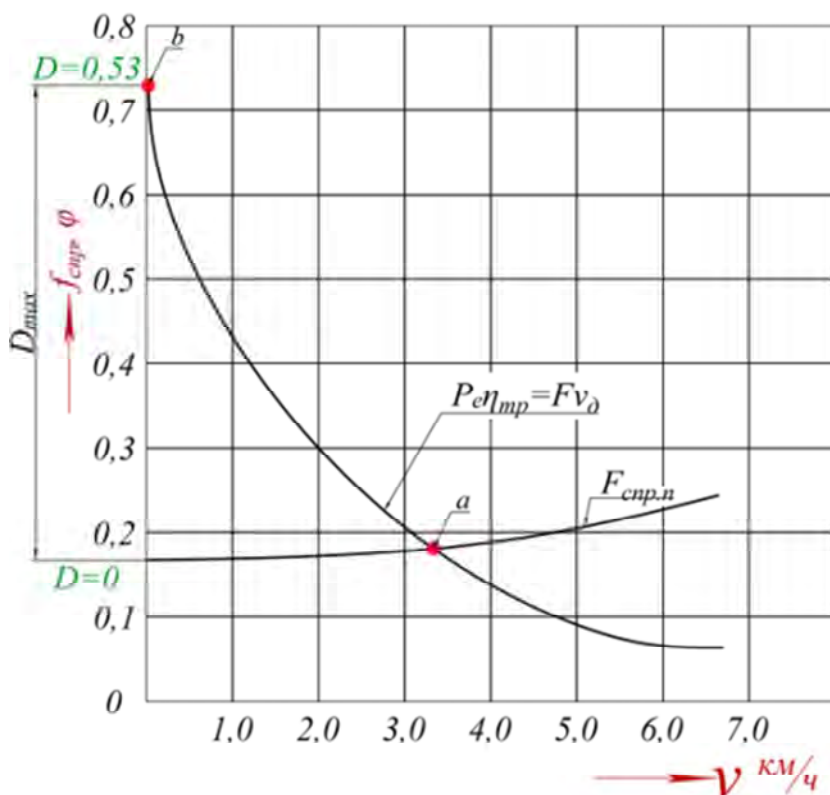


Рис. 9.2. Динамическая характеристика СКШ

Заключение

1. При анализе движения СКШ по грунтовой поверхности необходимо учитывать потерю скорости движения за счёт буксования колёс.
2. Тягово-сцепные свойства машины удобнее анализировать при помощи тяговой характеристики.
3. Скоростные свойства машины удобнее оценивать при помощи динамической характеристики.

Список литературы

1. Агейкин, Я. С. Проходимость автомобиля / Я. С. Агейкин. – Москва: Машиностроение, 1981. – 232 с.
2. Гуськов, В. В. Тракторы. Теория /В. В. Гуськов [и др.]: под общ. ред. проф. В. В. Гуськова. – Москва: Машиностроение, 1988. – 376 с.
3. Литвинов, А. С. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств / А. С. Литвинов, Я. Е. Фаробин. – Москва: Машиностроение, 1989. – 240 с.
4. 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; Москва: ИНФРА-М, 2012. – 543 с.
5. Пирковский, Ю. В. Теория движения полноприводного автомобиля / Ю. В. Пирковский, С. Б. Шухман. – Москва: ЮНИТИ, 2001. – 230 с.
6. Смирнов, Г. А. Теория движения колёсных машин / Г. А. Смирнов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 271 с.

Учебное издание

ГУСЬКОВ Валерий Владимирович
БОЙКОВ Владимир Петрович
КАРПИЕВИЧ Юрий Дмитриевич и др.

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
МНОГОЦЕЛЕВЫХ КОЛЁСНЫХ МАШИН
ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ГРУНТОВЫМ
ПОВЕРХНОСТЯМ**

Пособие по дисциплинам «Теория систем “местность–машина”»,
«Теория трактора», «Теория автомобиля»
для студентов специальностей 1-37 01 03 «Тракторостроение»,
1-37 01 04 «Многоцелевые колёсные и гусеничные машины»
автотракторного факультета и 1-37 01 04-02 «Эксплуатация
и ремонт бронетанкового вооружения и техники»
военно-технического факультета

Редактор *Т. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 12.01.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,27. Уч.-изд. л. 1,77. Тираж 100. Заказ 712.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.