

исслед. институт льна. – № 4264471; опублик. 07.02.90 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 5. – С. 3.

10. Способ уборки льна-долгунца: а. с. 1678240 СССР: А 01 D 45/06 / Ю.И. Боярчук [и др.]; Всесоюзный науч.-исслед. институт льна. – № 47758831; опублик. 07.02.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 35. – С. 3.

11. Способ уборки льна: а. с. 1384257 СССР: А 01 D 45/06/ Т.П. Галимский, А.Б. Батчаев, Г.А. Радишевский; Белорусский институт механизации сельского хозяйства. – № 4161425; опублик. 30.03.88. // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 12. – С. 3.

12. Льноуборочный комбайн: а. с. 1443846 СССР, А 01 D 45/06/ Т.П. Галимский, А.Б. Батчаев, Г.А. Радишевский [и др.]; Белорусский институт механизации сельского хозяйства. – № 4249729; опублик. 15.12.88. // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 46. – С. 3.

13. Исследование средств и технологий уборки льна с сепарацией льновороха на комбайне: отчет о НИР (заключ.) / Белор. институт механизации сельского хозяйства; рук. темы Г.А. Радишевский. – Минск, 1982. – 47 с. – № ГР 01828058913.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 05.04.2024

УДК 631.372

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2024-163-3-11-16>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ ПОЧВЫ НА ДВИЖИТЕЛИ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

В.А. Шкляревич,

ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

В статье получены зависимости, позволяющие определить нормальные реакции почвы на колесные и гусеничные движители трактора в зависимости от сил, действующих на почвообрабатывающий машинно-тракторный агрегат, а также его конструктивных и технологических параметров.

Ключевые слова: нормальная реакция почвы, почвообрабатывающий машинно-тракторный агрегат, колесный трактор, гусеничный трактор, сельскохозяйственная машина.

Dependencies that make it possible to determine normal soil reactions to wheeled and tracked tractor drives depending on the forces acting on the tillage machine-tractor unit, as well as its structural and technological parameters are obtained in the article.

Key words: normal soil reaction, tillage machine-tractor unit, wheeled tractor, caterpillar tractor, agricultural machine.

Введение

Большинство технологических операций возделывания сельскохозяйственных культур выполняются почвообрабатывающими машинно-тракторными агрегатами (МТА), в состав которых входит трактор и сельскохозяйственная машина. И именно под воздействием ходовых систем тракторов, предназначенных для реализации тягово-сцепных свойств через их взаимодействие с опорным основанием, происходит чрезмерное уплотнение почвы, которое отрицательно сказывается на ее плодородии и приводит к росту затрат на производство продукции растениеводства [1, 2].

Уплотняющее воздействие ходовых систем почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов зависит от величин нормальных реакций почвы на движители трактора, которые, в свою очередь, влияют на тягово-сцепные свойства трактора.

Цель исследования – получение зависимостей, позволяющих определить нормальные реакции почвы на колесные и гусеничные движители трактора в зависимости от сил, действующих на почвообрабаты-

вающий машинно-тракторный агрегат, а также его конструктивных и технологических параметров.

Основная часть

Для того чтобы определить силы, возникающие при взаимодействии ходовых систем и рабочих органов почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов с почвой и определяющие уплотняющее воздействие на почву, произведем тяговый расчет МТА, в состав которого входит трактор и сельскохозяйственная машина (рис. 1-4). Рассмотрим общий случай установившегося прямолинейного движения машинно-тракторного агрегата по горизонтальной поверхности поля, при котором силы инерции его движущихся масс и горизонтальные составляющие силы тяжести трактора и сельскохозяйственной машины равны нулю. Силы сопротивления остова трактора в ступицах его движителей, трения между элементами гусеничного движителя, сопротивления воздуха лобовой поверхности трактора, вследствие их малых значений, при расчетах также не учитываем.

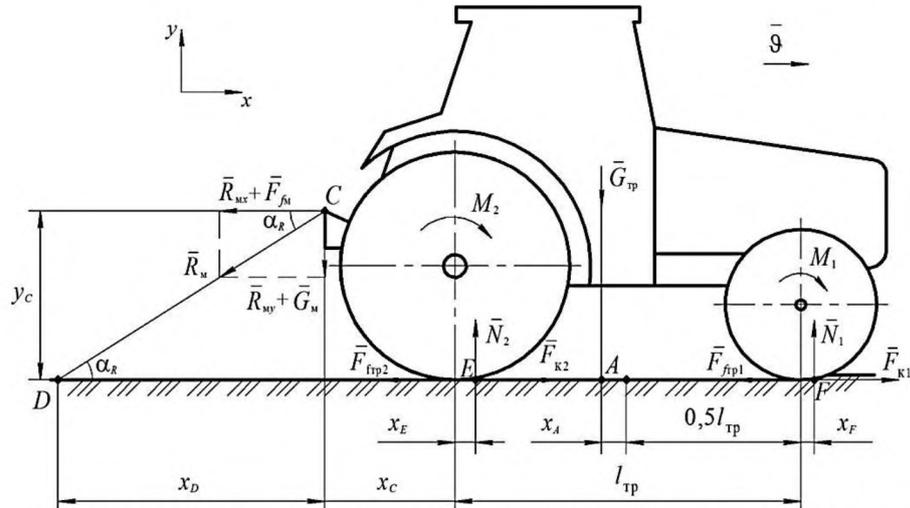


Рисунок 1. Схема сил, действующих на машинно-тракторный агрегат, в состав которого входит колесный трактор и навесная сельскохозяйственная машина

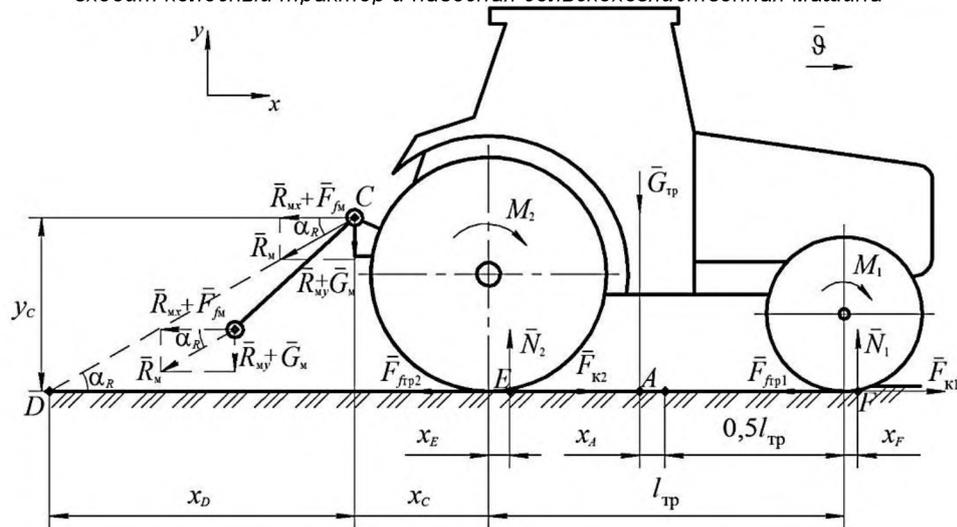


Рисунок 2. Схема сил, действующих на машинно-тракторный агрегат, в состав которого входит колесный трактор и прицепная сельскохозяйственная машина

Касательная сила тяги, развиваемая двигателем трактора, F_k – равнодействующая реакций почвы, которая образуется в пятне контакта двигателя с почвой и направлена параллельно вектору скорости поступательного движения трактора в сторону этого движения [3, 4]. Касательная сила тяги создает ведущий момент, необходимый для передвижения машинно-тракторного агрегата по поверхности поля, преодолевает тяговое сопротивление агрегатируемой с трактором сельскохозяйственной машины и сопротивление качению двигателей МТА [5].

Текущее значение касательной силы тяги определяется по формуле [5, 6]:

$$F_k = \varphi_{исп} N, \quad (1)$$

где $\varphi_{исп}$ – коэффициент использования сцепного веса;

N – вертикальная составляющая реакции почвы на двигатель трактора, Н.

Предельное значение касательной силы тяги [5]

$$F_{k \max} = \varphi_{сц} N, \quad (2)$$

где $\varphi_{сц}$ – коэффициент сцепления двигателя с почвой.

Значения коэффициента сцепления колесных тракторов в зависимости от состояния почвенного агрофона изменяются в пределах от 0,4 до 0,9, гусеничных – от 0,6 до 1,2 [5].

Силы сопротивления качению трактора $F_{fтр}$ и сельскохозяйственной машины $F_{fм}$ обусловлены деформациями почвы под их двигателями, гистерезисными потерями в пневмошинах, потерями на трение при скольжении ведомых колес и направлены против вектора скорости поступательного движения машин-

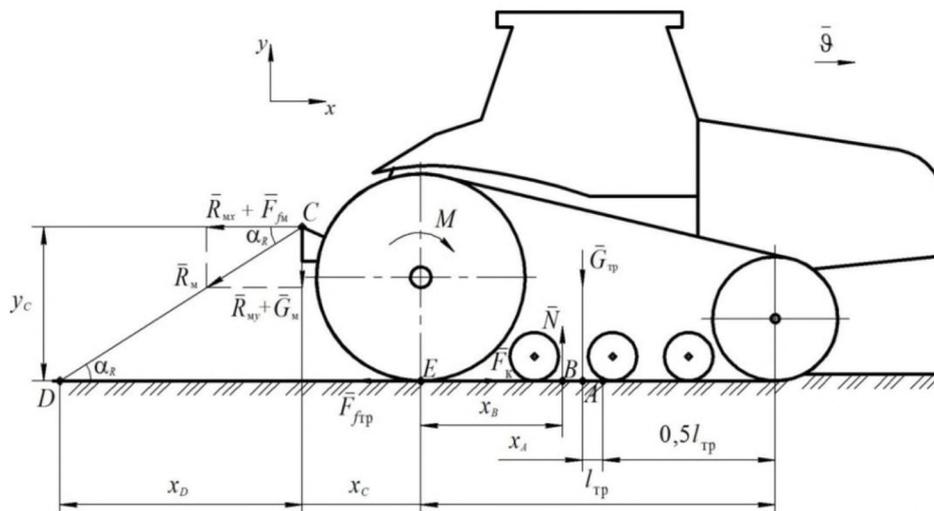


Рисунок 3. Схема сил, действующих на машинно-тракторный агрегат, в состав которого входит гусеничный трактор и навесная сельскохозяйственная машина

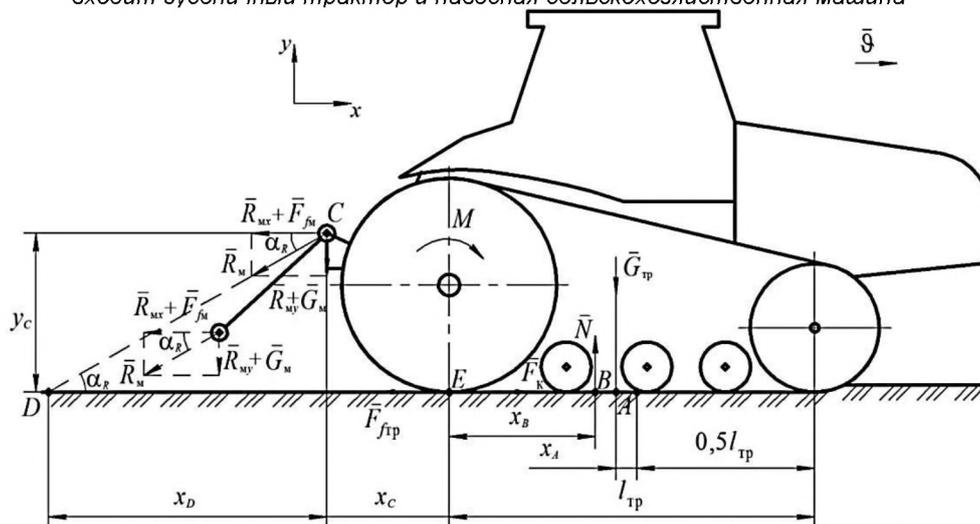


Рисунок 4. Схема сил, действующих на машинно-тракторный агрегат, в состав которого входит гусеничный трактор и прицепная сельскохозяйственная машина

но-тракторного агрегата [6-9]. Их величины определяются по соответствующим формулам:

$$F_{fтр} = fG_{тр}, \quad (3)$$

где f – коэффициент сопротивления качению движителя;

$G_{тр}$ – вес трактора, Н,

$$F_{fм} = fG_{м}, \quad (4)$$

где $G_{м}$ – вес сельскохозяйственной машины, Н.

Коэффициент сопротивления качению колесных движителей при их движении по поверхности поля принимает значения в пределах от 0,05 до 0,18 и гусеничных – от 0,05 до 0,12 [5].

Сельскохозяйственная машина, агрегируемая с трактором, как навесная (рис. 1; 3), так и прицепная (рис. 2; 4) оказывает результирующее тяговое сопротивление R_m , приложенное в точке C механизма навески трактора. Согласно векторному уравнению

равновесия всех сил [10], действующих на машинно-тракторный агрегат и приведенных к точке C механизма навески трактора, результирующее тяговое сопротивление R_m равняется векторной сумме горизонтальной составляющей тягового сопротивления сельскохозяйственной машины R_{mx} , необходимой для выполнения технологической операции возделывания сельскохозяйственной культуры, силы сопротивления качению сельскохозяйственной машины F_{fm} , вертикальной составляющей тягового сопротивления сельскохозяйственной машины R_{my} , включая нормальные реакции почвы на опорные колеса, и веса сельскохозяйственной машины G_m

$$\vec{R}_m = \vec{R}_{mx} + \vec{F}_{fm} + \vec{R}_{my} + \vec{G}_m. \quad (5)$$

Два первых слагаемых векторного уравнения равновесия (5) оказывают сопротивление передвижению машинно-тракторного агрегата по поверхности поля, а третье и четвертое – создают дополнительную вертикальную нагрузку к весу трактора, увеличивая

тем самым уплотняющее воздействие на почву ходовой системы трактора.

Запишем уравнения равновесия сил и моментов сил [10], действующих на машинно-тракторный агрегат при его взаимодействии с почвой, в состав которого входит колесный трактор со всеми ведущими колесами (индекс «1» для передних колес, «2» – задних) и навесная (рис. 1) или прицепная (рис. 2) сельскохозяйственная машина, в продольно-вертикальной плоскости к вектору скорости поступательного движения агрегата \bar{v} с учетом описанных выше допущений

$$\sum F_x = 0;$$

$$F_{к1} + F_{к2} = F_{fп1} + F_{fп2} + R_{мх} + F_{фм};$$

$$F_{к1} + F_{к2} = F_{fп1} + F_{fп2} + R_{м} \cos \alpha_R + F_{фм}, \quad (6)$$

$$\text{где } \cos \alpha_R = \frac{x_D}{y_C}.$$

В том случае, если у колесного трактора ведущими являются только задние колеса, касательная сила тяги передних колес равна нулю, то есть $F_{к1}=0$.

$$\sum F_y = 0;$$

$$N_1 + N_2 = G_{тп} + G_M + R_{мy}; \quad (7)$$

$$N_1 + N_2 = G_{тп} + G_M + R_{м} \sin \alpha_R,$$

$$\text{где } \sin \alpha_R = \frac{y_C}{x_D}.$$

Нормальная реакция почвы на колеса передней оси трактора N_1 определяется из уравнения моментов сил, действующих на МТА, относительно точки E (рис. 1, 2)

$$\sum M_E(\bar{F}_i) = 0;$$

$$N_1(l_{тп} - x_E + x_F) + R_{мх}y_C + F_{фм}y_C + R_{мy}(x_C + x_E) + G_M(x_C + x_E) - G_{тп}(0,5l_{тп} - x_A - x_E) = 0, \quad (8)$$

где $l_{тп}$ – колесная база трактора, м.

Откуда

$$N_1 = \frac{G_{тп}(0,5l_{тп} - x_A - x_E) - R_{м} \cos \alpha_R y_C}{(l_{тп} - x_E + x_F)} - \frac{F_{фм}y_C + (R_{м} \sin \alpha_R + G_M)(x_C + x_E)}{(l_{тп} - x_E + x_F)}. \quad (9)$$

Нормальная реакция почвы на колеса задней оси трактора N_2 определяется из уравнения моментов сил, действующих на МТА, относительно точки F (рис. 1, 2)

$$\sum M_F(\bar{F}_i) = 0;$$

$$-N_2(l_{тп} - x_E + x_F) + R_{мх}y_C + F_{фм}y_C + R_{мy}(l_{тп} + x_C + x_F) + G_M(l_{тп} + x_C + x_F) + G_{тп}(0,5l_{тп} + x_A + x_F) = 0. \quad (10)$$

Откуда

$$N_2 = \frac{G_{тп}(0,5l_{тп} + x_A + x_F) + R_{м} \cos \alpha_R y_C}{(l_{тп} - x_E + x_F)} + \frac{F_{фм}y_C + (R_{м} \sin \alpha_R + G_M)(l_{тп} + x_C + x_F)}{(l_{тп} - x_E + x_F)}. \quad (11)$$

Запишем уравнения равновесия сил и моментов сил, действующих на машинно-тракторный агрегат при его взаимодействии с почвой, в состав которого входит гусеничный трактор и навесная (рис. 3) или прицепная (рис. 4) сельскохозяйственная машина, в продольно-вертикальной плоскости к вектору скорости поступательного движения агрегата \bar{v} с учетом описанных выше допущений

$$\sum F_x = 0;$$

$$F_{к} = F_{фп} + R_{мх} + F_{фм};$$

$$F_{к} = F_{фп} + R_{м} \cdot \cos \alpha_R + F_{фм}. \quad (12)$$

$$\sum F_y = 0;$$

$$N = G_{тп} + G_M + R_{мы};$$

$$N = G_{тп} + G_M + R_{м} \sin \alpha_R. \quad (13)$$

Нормальная реакция почвы на гусеничный движитель трактора N определяется из уравнения моментов сил, действующих на МТА, относительно точки E (рис. 3, 4)

$$\sum M_E(\bar{F}_i) = 0;$$

$$Nx_B + R_{мх}y_C + F_{фм}y_C + R_{мы}x_C + G_Mx_C - G_{тп}(0,5l_{тп} - x_A) = 0. \quad (14)$$

Откуда

$$N = \frac{G_{тп}(0,5l_{тп} - x_A) - R_{м} \cos \alpha_R y_C}{x_B} - \frac{F_{фм}y_C + R_{м} \sin \alpha_R x_C + G_M x_C}{x_B}. \quad (15)$$

Отличительной особенностью работы пахотного машинно-тракторного агрегата для принятых выше условий, в состав которого входит колесный трактор и навесной пахотный агрегат, является наклон трактора в поперечно-вертикальной плоскости под углом $\alpha_{пах}$, вызванный движением правых колес по дну борозды, образованной за предыдущий проход МТА, а левых – по поверхности необработанного поля. Вследствие этого вертикальные нагрузки, а, следовательно, и реакции почвы на правые и левые колеса трактора распределяются неравномерно – правые колеса нагружаются больше левых (рис. 5а). К тому же неравномерность распределения нормальных реакций почвы на правые и левые колеса трактора усугубляется воздействием вертикальных нагрузок (G_M и $R_{мы}$), оказываемых пахотным агрегатом.

Уравнение равновесия сил, действующих на пахотный МТА в поперечно-вертикальной плоскости (рис. 5), согласно которому определяются суммарные нормальные реакции почвы на все колеса трактора, записывается в следующем виде:

$$\sum F_y = 0;$$

$$N_{\Sigma\text{лв}} + N_{\Sigma\text{пр}} = G_{\text{тр}} + G_{\text{м}} + R_{\text{мв}}. \quad (16)$$

Суммарная нормальная реакция почвы на правые колеса трактора $N_{\Sigma\text{пр}}$ определяется из уравнения моментов сил, действующих на пахотный МТА в поперечно-вертикальной плоскости, относительно точки E' (рис. 5а)

$$\sum M_{E'}(\bar{F}_i) = 0;$$

$$N_{\Sigma\text{пр}} b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}} - G_{\text{тр}} z_A - R_{\text{мв}} z_C - G_{\text{м}} z_C + R_{\text{мз}} y_C = 0, \quad (17)$$

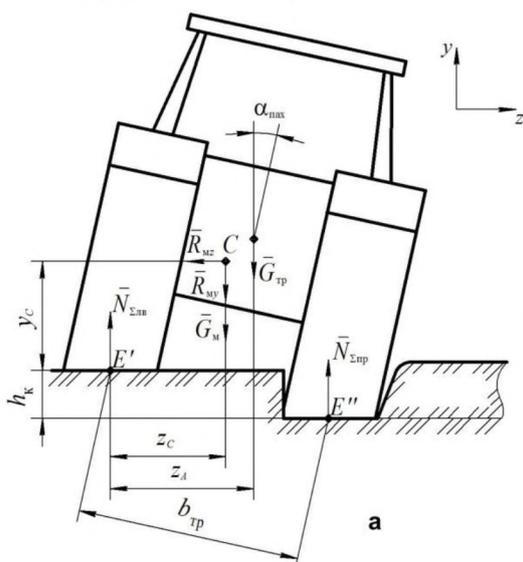
где $b_{\text{тр}}$ – ширина колеи трактора, м.
Откуда

$$N_{\Sigma\text{пр}} = \frac{G_{\text{тр}} z_A + (R_{\text{мв}} + G_{\text{м}}) z_C - R_{\text{мз}} y_C}{b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}}}. \quad (18)$$

Из уравнения моментов сил, действующих на пахотный МТА в поперечно-вертикальной плоскости, относительно точки E'' определяется суммарная нормальная реакция почвы на левые колеса трактора $N_{\Sigma\text{лв}}$ (рис. 5а)

$$\sum M_{E''}(\bar{F}_i) = 0;$$

$$-N_{\Sigma\text{лв}} b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}} + G_{\text{тр}} (b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}} - z_A) + R_{\text{мз}} (y_C + h_k) + R_{\text{мв}} (b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}} - z_C) + G_{\text{м}} (b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}} - z_C) = 0, \quad (19)$$



где h_k – глубина правой колеи, м.
Откуда

$$N_{\Sigma\text{лв}} = \frac{G_{\text{тр}} (b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}} - z_A) + R_{\text{мз}} (y_C + h_k)}{b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}}} + \frac{(R_{\text{мв}} + G_{\text{м}}) (b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}} - z_C)}{b_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{пах}}}. \quad (20)$$

Суммарная нормальная реакция почвы на правые колеса трактора, движущегося вне борозды, определяется из уравнения моментов сил, действующих на пахотный МТА в поперечно-вертикальной плоскости, относительно точки E' (рис. 5б)

$$\sum M_{E'}(\bar{F}_i) = 0;$$

$$N_{\Sigma\text{пр}} b_{\text{тр}} - G_{\text{тр}} 0,5 b_{\text{тр}} - R_{\text{мв}} z_C - G_{\text{м}} z_C + R_{\text{мз}} y_C = 0. \quad (21)$$

Откуда

$$N_{\Sigma\text{пр}} = \frac{G_{\text{тр}} 0,5 b_{\text{тр}} + (R_{\text{мв}} + G_{\text{м}}) z_C - R_{\text{мз}} y_C}{b_{\text{тр}}}. \quad (22)$$

Суммарная нормальная реакция почвы на левые колеса трактора, движущегося вне борозды, определяется из уравнения моментов сил, действующих на МТА в поперечно-вертикальной плоскости, относительно точки E'' (рис. 5б)

$$\sum M_{E''}(\bar{F}_i) = 0;$$

$$-N_{\Sigma\text{лв}} b_{\text{тр}} + G_{\text{тр}} 0,5 b_{\text{тр}} + R_{\text{мв}} (b_{\text{тр}} - z_C) + G_{\text{м}} (b_{\text{тр}} - z_C) + R_{\text{мз}} y_C = 0. \quad (23)$$

Откуда

$$N_{\Sigma\text{лв}} = \frac{G_{\text{тр}} 0,5 b_{\text{тр}} + (R_{\text{мв}} + G_{\text{м}}) (b_{\text{тр}} - z_C) + R_{\text{мз}} y_C}{b_{\text{тр}}}. \quad (24)$$

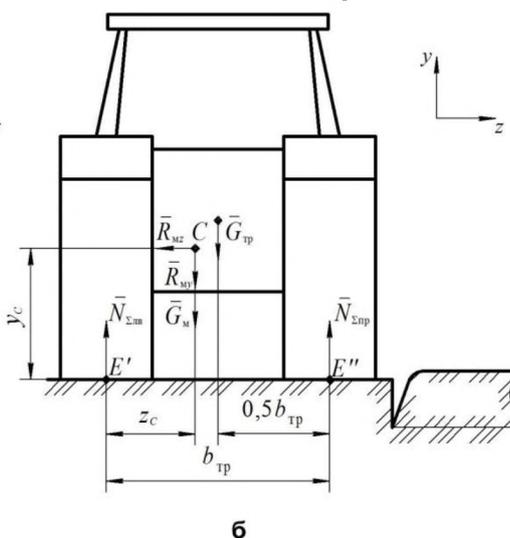


Рисунок 5. Схема сил, действующих на пахотный машинно-тракторный агрегат в поперечно-вертикальной плоскости:

а – правые колеса трактора в борозде; б – правые колеса трактора вне борозды

Сравнительный анализ полученных зависимостей (22) и (24) позволяет определить неравномерность распределения вертикальных нагрузок на движители трактора, движущегося горизонтально относительно обрабатываемой поверхности поля.

Заключение

1. Полученные уравнения (6) и (12) устанавливают условия, необходимые для передвижения машинно-тракторного агрегата по поверхности поля, согласно которым проходимость и тягово-сцепные свойства МТА тем выше, чем больше величина касательной силы тяги F_k , развиваемая его движителями, и чем меньше величины горизонтальной составляющей тягового сопротивления сельскохозяйственной машины $R_{мх}$ и силы сопротивления качению движителей МТА. Регулировать величину горизонтальной составляющей тягового сопротивления сельскохозяйственной машины $R_{мх}$, согласно полученным уравнениям, можно изменением угла наклона результирующего вектора тягового сопротивления \bar{R}_m к горизонтали – α_R .

2. Зависимости (7), (9), (11), (13) и (15), полученные при тяговом расчете машинно-тракторного агрегата, позволяют определить нормальные реакции почвы на колесные либо гусеничные движители трактора в зависимости от сил, действующих на МТА ($G_{тр}$, G_m , R_m , F_{fm}), а также его конструктивных и технологических параметров (колесная база трактора – $l_{тр}$; положение центра тяжести трактора – x_A ; положение центра давления гусеничного трактора – x_B ; положение точки C механизма навески трактора – x_C и y_C). Значения нормальных реакций почвы на движители трактора определяют уплотняющее воздействие ходовых систем МТА на почву, влияют на тягово-сцепные свойства МТА. Сравнительный анализ зависимостей (9) и (11) позволяет однозначно установить превышение суммарных нормальных реакций почвы на задние колеса над суммарными нормальными реакциями почвы на передние колеса трактора ($N_2 > N_1$), что создает дополнительное уплотняющее воздействие на почву более нагруженных задних колес трактора.

3. Зависимости (18), (20), (22) и (24), полученные при тяговом расчете пахотного МТА под действием сил, действующих на него в вертикально-поперечной плоскости, позволяют определить суммарные нормальные реакции почвы на правые $N_{спр}$ и левые $N_{слв}$ колеса трактора, движущегося как с наклоном под углом $\alpha_{нак}$, так и горизонтально относительно обрабатываемой поверхности поля, а также оценить влияние конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров пахотного МТА на неравномерность распределения вертикальных нагрузок на движители

трактора. Полученные значения нормальных реакций почвы на колеса трактора и неравномерность их распределения определяют уплотняющее воздействие МТА на почву, а также влияют на тягово-сцепные свойства МТА. Сравнительный анализ зависимостей (18) и (20) позволяет однозначно установить превышение суммарных нормальных реакций почвы на правые колеса над суммарными нормальными реакциями почвы на левые колеса трактора ($N_{спр} > N_{слв}$), что создает дополнительное уплотняющее воздействие на почву правых колес трактора, перемещающихся по дну борозды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кушнарев, А.С. Механико-технологические основы обработки почвы / А.С. Кушнарев, В.И. Кочев. – Киев: Урожай, 1989. – 144 с.
2. Севернев, М.М. Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве / М.М. Севернев. – Минск: Ураджай, 1994. – 222 с.
3. Тракторы. Теория / В.В. Гуськов [и др.]; под общ. ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 378 с.
4. Шкляревич, В.А. Исследование показателей тягово-сцепных свойств движителя / В.А. Шкляревич // Агропанорама. – 2020. – № 6. – С. 9-14.
5. Скотников, В.А. Проходимость машин / В.А. Скотников, А.В. Пономарев, А.В. Климанов. – Минск: Наука и техника, 1982. – 328 с.
6. Кутьков, Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства / Г.М. Кутьков. – М.: Колос, 2004 – 504 с.
7. Гуськов, А.В. Оптимизация потребительских свойств и параметров колесных тракторов семейства «БЕЛАРУС»: монография / А.В. Гуськов; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.П. Бойкова. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2008. – 210 с.
8. Закономерности изменения силы сопротивления качению колес машинно-тракторных агрегатов / И.Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2017. – № 3. – С. 2-6.
9. Влияние типа опорной поверхности на сопротивление качению колесных транспортно-тяговых средств / Н.Н. Романюк [и др.] // Агропанорама. – 2022. – № 6. – С. 2-8.
10. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики: учебник / С.М. Тарг. – М.: Высшая школа, 2009. – 416 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 03.06.2024