

ВЛИЯНИЕ ГРУНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН НА КРИТЕРИИ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ

Н.С. Вольская



**ВОЛЬСКАЯ
Наталья
Станиславовна**

Кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Автомобили и двигатели» ГОУ МГИУ. Область научных интересов: проходимость многоосных колесных машин. Автор более 30 научных и учебно-методических трудов, в том числе двух монографий.

Введение

При проектировании многоосных колесных машин (КМ), предназначенных для движения как по дорогам общего пользования, так и по бездорожью, необходимо иметь возможность оценивать влияние их основных конструктивных решений (ОКР) и физико-механического состояния грунта на эффективность движения. Решение этой задачи является основной целью данного исследования.

Движение вне дорог определяет одно из эксплуатационных свойств КМ – проходимость. В расчетах при оценке проходимости выделяют задачи, связанные с прямолинейным и криволи-

нейным движением. Статья посвящена результатам исследования оценки криволинейного движения многоосной КМ с учетом изменения опорно-сцепных свойств колеса в зависимости от типа и физико-механического состояния грунта.

Свойство машины совершать повороты с максимальной кривизной на дороге и вне ее называется поворотливостью. Это понятие принято разделять на статическую и динамическую. Статическая поворотливость характеризует способность КМ осуществлять равномерные повороты с малыми радиусами кривизны при невысоких скоростях движения. В статье рассматривается только статическая поворотливость КМ, так как она является составляющей методики оценки опорно-тяговой проходимости КМ при движении в тяжелых грунтовых условиях, когда автомобиль движется со скоростями не более 10–20 км/ч.

Общее требование к колесным машинам в таких условиях можно сформулировать следующим образом: необходимость обеспечения поворота с возможно меньшим радиусом кривизны при наименьшей затрате мощности двигателя и создании наиболее благоприятных контактных условий колеса с грунтом.

Поворотливость КМ на деформируемом грунте в значительной степени зависит от принятых ОКР [1] и деформативных свойств грунта. К основным конструктивным решениям относятся: колесная формула, осевая формула, формула управления и формула привода.

Математическая модель движения колесной машины по криволинейной траектории на деформируемом грунте

Деформативные свойства грунта определяют опорно-тяговую проходимость КМ и зависят от физического состояния грунта (относительной влажности W , плотности ρ , глубины мягкого слоя H_r) и его типа.

При движении КМ потенциальные возможности, заложенные в конструкцию шасси, реализуются за счет взаимодействия группы колес с опорной поверхностью. Поэтому была разработана расчетная модель и решена задача по созданию математической модели криволинейного движения многоосной КМ по деформируемой поверхности, позволяющая на стадии проектирования оценивать поворотливость КМ в зависимости как от конструкции шасси, так и от деформативных свойств грунта по принятым критериям эффективности.

При решении поставленной задачи были использованы результаты исследований известных российских ученых: Д.А. Антонова [2], П.В. Аксенова [1], Я.Е. Фаробина [3], А.С. Литвинова [4], Я.С. Агейкина [5]. Модель качения пневматического колеса при боковом уводе по мягкому грунту, предложенная Я.С. Агейкиным, является основой решения поставленной задачи. В этой модели деформативные свойства грунта задаются независимыми механическими параметрами: модулем деформации, углом внутреннего трения и внутренним сцеплением в грунте. Для определения численных значений параметров конкретных типов грунтов (песок-несвязный грунт, супесь, суглинок и глина – связные грунты) проведено отдельное исследование [6], по результатам которого выявлены зависимости механических параметров грунтов от типа грунта и его физического состояния. Таким образом, появилась возможность моделировать взаимодействие шины и грунта расчетными методами.

Математическая модель, определяющая криволинейное движение многоосной машины, представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{j}} = \mathbf{f} \\ \mathbf{K} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{0}, \\ \mathbf{D} \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{0} \end{cases}, \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{A} \cdot \mathbf{R} \\ \mathbf{B} \\ \mathbf{T} \\ \mathbf{X} \cdot \mathbf{R} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{M}$ – матрица инерции; $\ddot{\mathbf{j}}$ – вектор обобщенных координат КМ как механической системы; $\mathbf{f}$ – вектор обобщенных сил; $\mathbf{K}$ – матрица КПД и коэффициентов, характеризующих распределительные механизмы, размерностью $3l \times 6$, где l – количество узлов; $\mathbf{p}$ – матрица моментов и угловых скоростей на входном валу и ветвях распределительных механизмов; $\mathbf{D}$ – матрица коэффициентов при неизвестных в уравнениях кинематической связи и силового баланса колес, размерностью 2×6 ; $\mathbf{Z}$ – блочная матрица угловых скоростей и крутящих моментов, состоящая из подматриц размерностью $i \times j$ ($i=1, \dots, n$, $j=1, 2$ – порядковый номер борта КМ); $\mathbf{W}$ – матрица угловых скоростей колес; $\mathbf{R}$ – матрица свободных радиусов качения колес; $\mathbf{A}$ – матрица коэффициентов изменения угловой скорости колеса за счет передаваемого момента; $\mathbf{B}$ – матрица угловых скоростей колес, движущихся на свободном режиме; $\mathbf{T}$, $\mathbf{X}$ – матрицы тяговых моментов и сил на колесах; $\mathbf{F}$ – матрица суммарных моментов сопротивления качению.

Структурно система уравнений (1) состоит из трех групп систем матричных уравнений:

- первое представляет уравнения движения КМ как механической системы;
- второе включает уравнения кинематических и силовых связей в узлах механической трансмиссии;
- третье представляет уравнения силового баланса всех колес.

Рассматриваемая математическая модель криволинейного движения многоосной КМ разработана впервые. Она позволяет проводить расчеты по оценке поворотливости КМ с механической трансмиссией. Известно, что такой

тип трансмиссии имеет преимущество перед электрической или гидравлической трансмиссиями, если число ведущих осей не превышает восьми. При увеличении числа ведущих осей механическая трансмиссия становится громоздкой и неэффективной из-за большого числа раздаточных механизмов и карданных передач. Поэтому в расчетах можно варьировать этот параметр в указанных пределах.

Необходимо отметить, что второе матричное уравнение в системе (1) позволяет учитывать распределение силового потока в узлах трансмиссии, имеющих как линейные так и нелинейные характеристики. В зависимости от числа ведущих осей математическая модель (1) в развернутом виде может быть представлена системой из $10n$ дифференциальных и алгебраических нелинейных уравнений, где n – число ведущих осей КМ.

Полное описание математических моделей, входящих в рассматриваемую модель, представлено в работе [7].

На базе данной математической модели разработаны расчетный алгоритм и программа, позволяющая определять расчетные значения критериев эффективности и показателей поворотливости КМ на деформируемом грунте.

В теории автомобиля [3, 4] при анализе его статической поворотливости за критерии эффективности принимаются:

- действительный радиус поворота R_n , м;
- коэффициент удельной энергии, затрачиваемой КМ на единицу угловой скорости ее поворота K_N , м/рад;
- коэффициент использования сцепной силы движителя при повороте K_ϕ .

Для более детальной оценки статической поворотливости проводятся расчеты по таким важным показателям оценки проходимости, как глубина колеи z , затрачиваемая мощность на поворот N_n , коэффициент сопротивления повороту ψ_n .

Влияние параметров грунта и колесной машины на эффективность ее движения

Оценки влияния параметров грунта и ОКР КМ на эффективность ее движения проведена на примере четырехосного МАЗ-543 (в тексте

упоминается как штатный вариант). За основу взяты ОКР шасси этого автомобиля (рис. 1) и его весовые и габаритные характеристики. В расчетах проведено варьирование осевой формулы, формулы управления и формулы привода.

Проходимость КМ в большой степени зависит от давления воздуха в шинах p_w , поэтому были проведены дополнительные расчеты по этому параметру колеса.

Все расчеты проведены для скорости движения $v=15$ км/ч и среднего угла поворота управляемых колес $\theta=30$ град. На нижеприводимых графиках, если не указаны значения относительной влажности W , толщины мягкого слоя H_r и плотности ρ грунта, использованы для трех видов грунта следующие значения этих показателей: $W=0,3$, $H_r = 40$ см; для суглинка $\rho=1360$ кг/м³, для супеси $\rho=1510$ кг/м³ и для песка $\rho=1560$ кг/м³.

Результаты расчетов по критериям эффективности движения четырехосной КМ в зависимости от физического состояния грунта (типа, плотности, влажности и глубины мягкого слоя) представлены на рис. 2–7.

На рис. 2 приведены расчетные кривые изменения глубины колеи по забегающему колесу четвертой оси штатного варианта КМ в зависимости от плотности грунта. С увеличением плотности грунта его деформации уменьшаются, причем для песка и супеси эта зависимость выражена более ярко. При увеличении плотности песка и супеси на 25% глубина колеи уменьшилась в среднем в три раза. На суглинке такое же изменение плотности грунта дает уменьшение глубины колеи только на 30 %. На рис. 2 также приведен график изменения коэффициента сопротивления повороту ψ_n в зависимости от типа и плотности грунта. Численные значения этого коэффициента для различных грунтовых условий дают возможность оценивать и сравнивать статическую поворотливость абсолютно разных КМ.

Аналогичную картину можно увидеть на рис. 3. В этих же интервалах увеличения плотности грунта критерий эффективности при повороте K_N и входящий в него параметр – мощность N_n , затрачиваемая на поворот, суще-

Расположение осей по базе и схема привода	Обозначение формулы управления	Расположение осей по базе и схема привода	Обозначение формулы управления
	ш 11 - 00		д 1 - 11 - 1
	б 11 - 00		б 1 - 11 - 1
	д 11 - 00		д 1 - 00 - 1
	д 11 - 00		б 1 - 00 - 1

Рис. 1. Основные конструктивные решения КМ: 0 – симметричный дифференциал; 1 – муфта свободного хода; 2 – блокированная связь; 0(2) – симметричный дифференциал с принудительной блокировкой; ш, б, д – штатный, блокированный и дифференциальный привод соответственно; N_{pk} – мощность, проводимая к входному валу раздаточной коробки

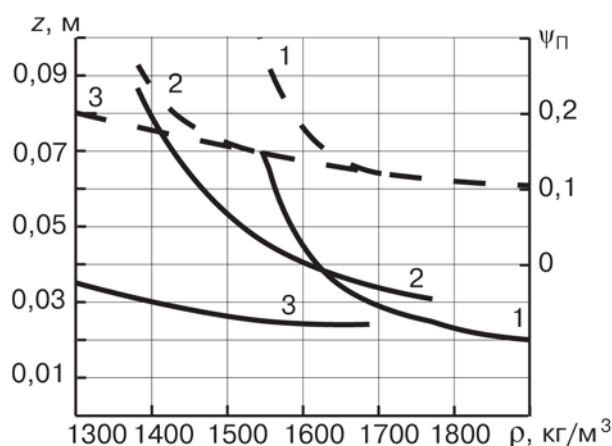


Рис. 2. Влияние плотности грунтов ρ на глубину колеи z (—) и коэффициент сопротивления повороту ψ_p (- - -) для штатного варианта КМ: 1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок

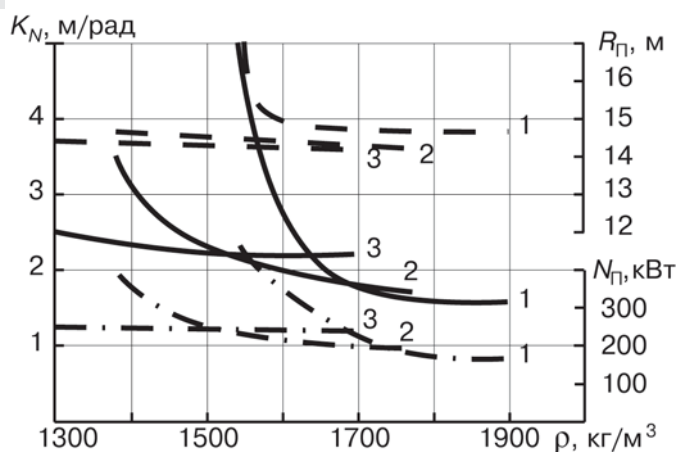


Рис. 3. Влияние плотности грунтов ρ на критерий эффективности при повороте K_n (—), мощность, затрачиваемая на поворот N_p (---) и действительный радиус поворота R_p (- - -) (штатный вариант КМ): 1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок

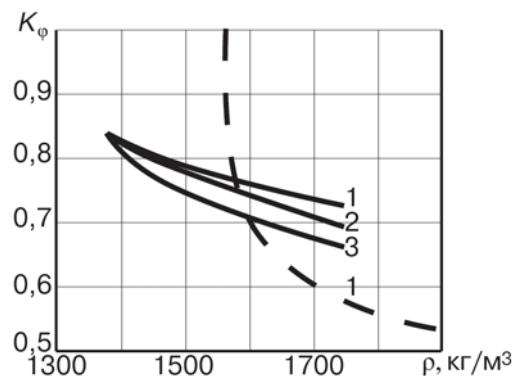


Рис. 4. Влияние плотности грунтов ρ на коэффициент использования сцепной силы движителя при повороте K_ϕ (формула управления 11-00): 1 – ш 11-00; 2 – б 11-00; 3 – д 11-00; — – супесь; - - - – песок

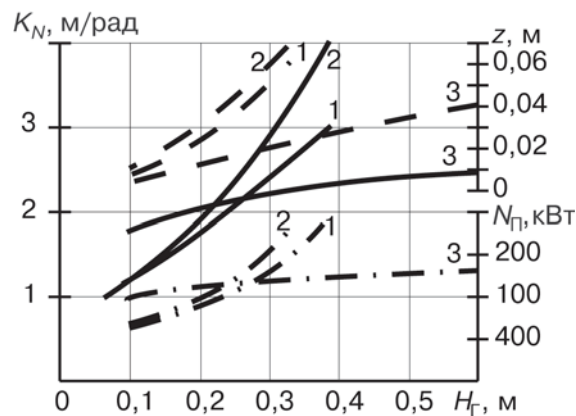


Рис. 5. Влияние толщины мягкого слоя грунтов H_g на критерий эффективности при повороте K_n (—), мощность, затрачиваемую на поворот N_p (---) и глубину колеи z (- - -) для штатного варианта КМ: 1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок

ственно снижаются.

С уменьшением глубины колеи уменьшаются затраты мощности на колеобразование и сопротивление повороту, а соответственно и продольная реакция в пятне контакта всех колес. В связи с этим значительно уменьшается средний коэффициент использования сцепной силы движителя при повороте K_ϕ (рис. 4). В более легких условиях движения (движение по грунту с высоким значением плотности) становится возможным поворот с меньшим радиусом R_p (см. рис. 3). Причем для песка (несвязного грунта) уменьшение возможного радиуса поворота существенно (около 15%).

На рис. 5 представлены расчетные кривые изменения R_p , N_p и z от толщины мягкого слоя H_g . В расчетах взято высокое значение влажности грунта $W=0,8$, при котором супесь и песок обладают низкой несущей способностью. Расчеты показывают, что увеличение толщины мягкого слоя дает резкое увеличение глубины колеи: при возрастании H_g с 10 см до 40 см глубина колеи увеличилась до 6–7 см. Мощность, затрачиваемая на поворот, возрастает почти в четыре раза. Значение оценочного параметра K_n , учитывающего N_p и z , выросло в три раза.

На суглинке толщина мягкого слоя оказывает менее заметное влияние на рассматрива-

емые оценочные показатели. По расчетам, в том же интервале изменения H_r , глубина колеи будет в два раза меньше, чем на песке и супеси. Необходимо отметить, что сопротивление повороту КМ на суглинке изначально на 20% больше, чем на песке и супеси за счет меньшего радиуса поворота R_n даже при малой толщине мягкого слоя.

На рис. 6 и 7 представлены расчетные кривые изменения K_N , K_ϕ и R_n в зависимости от относительной влажности вышеприведенных типов грунтов. Причем взяты песок и супесь средней плотности $\rho=1560 \text{ кг/м}^3$, а суглинок с плотностью $\rho=1360 \text{ кг/м}^3$. Можно отметить, что на

песке поворотливость рассматриваемого штатного варианта шасси намного хуже, чем на связных грунтах. Во-первых, растет мощность, затрачиваемая на поворот. Для различных вариантов трансмиссии K_N изменяет свое значение с 1,8 м/рад до 5 м/рад (в три раза) в интервале влажности грунта от 0,1 до 0,6. Расчеты показывают, что потребная мощность на поворот увеличивается с 250 кВт до 470 кВт. Во-вторых, с ростом влажности радиус поворота при той же скорости движения увеличился на 25% (с 16 м до 20 м).

Рассмотрим влияние основных конструктивных решений КМ и давления воздуха в шинах на критерии эффективности при криволинейном движении на тех же типах грунтов, механические свойства которых считаем постоянными.

Влияние давления воздуха в шинах на показатели поворотливости представлено на рис. 8 и 9. Из анализа этих графиков можно определить предпочтительные значения давления в шинах при движении по песку. Минимум наблюдается по коэффициенту использования сцепной силы движителя и коэффициенту удельной энергии при $p_w=0,25 \text{ МПа}$. При $p_w=0,3-0,35 \text{ МПа}$ обеспечивается минимальное значение радиуса кривизны около 14,5 м для штатного варианта шасси.

На супеси, характеризуемой достаточно высокой плотностью и относительной влажностью ($W=0,8$), увеличение давления в заданных реальных интервалах $p_w=0,2-0,4 \text{ МПа}$ практически не влияет на затрачиваемую мощность на поворот, но существенно снижает радиус поворота – с 16 м до 14,5 м (на 10%).

На суглинке большой плотности и небольшой влажности можно рекомендовать более высокие значения давления воздуха в шинах. Увеличение давления на 10–15% относительно $p_w=0,2 \text{ МПа}$ дает существенное снижение коэффициента использования сцепной силы (на 15–20 %) и радиуса кривизны с 14,7 м до 13,5 м.

На рис. 8 и 9 не приведены значения глубины колеи под колесами в зависимости от типа грунта. Однако расчеты показывают, что при дан-

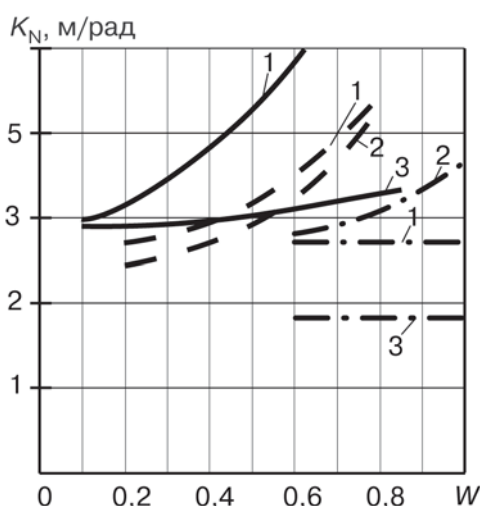


Рис. 6. Влияние относительной влажности грунтов W на критерий эффективности при повороте K_N : 1 – ш 11-00; 2 – б 11-00; 3 – д 11-00; — — — — — песок; - - - - - супесь; - · - · - суглинок

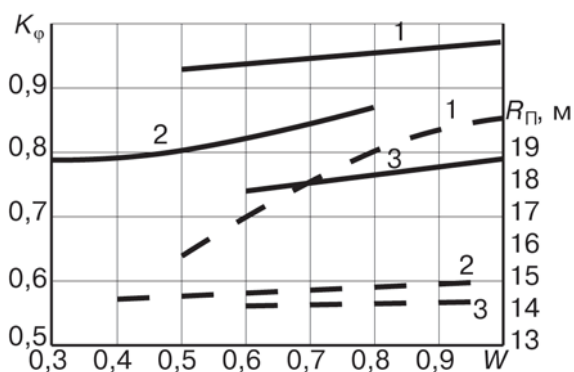


Рис. 7. Влияние относительной влажности грунтов W на коэффициент использования сцепной силы движителя при повороте K_ϕ (—) и действительный радиус поворота R_n (- - -) (штатный вариант КМ): 1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок

ных характеристиках состояния грунтовой поверхности и действующих на нее нагрузках можно ожидать следующих значений: песок – 7 см, супесь – 5 см, суглинок – 2 см. Этим, в первую очередь, можно объяснить характер изменения критерия эффективности при повороте R_{Π} для выбранных типов грунтов.

Разработанная в данном исследовании математическая модель криволинейного движения КМ по деформируемому грунту также позволяет оценить влияние формулы управления и формулы привода многоосной КМ на кри-

терии эффективности при повороте. Результаты влияния физико-механического состояния грунта (параметров ρ и W) на критерии эффективности статического поворота КМ приведены на рис. 10 и 11.

Для грунта (типа супесь) разной плотности, но постоянной влажности $W=0,3$ и $H_r=40$ см (рис. 10) можно отметить, что чем больше плотность грунта, тем меньше расчетный радиус поворота практически для всех типов формул трансмиссии и управления, кроме блокируемой трансмиссии штатного варианта шасси. При-

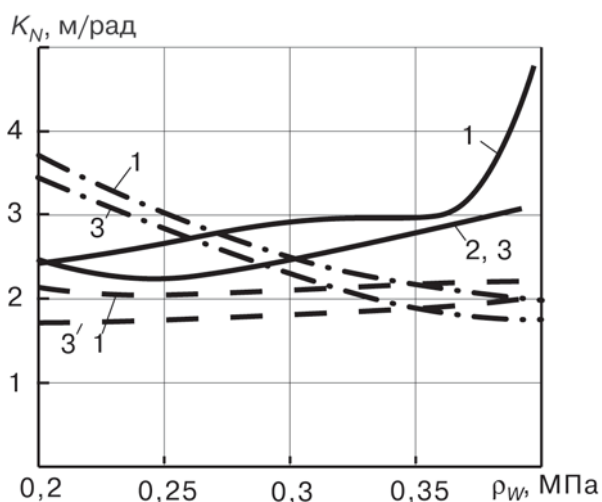


Рис. 8. Влияние давления воздуха в шинах p_w на критерий эффективности при повороте K_N :
1 – ш 11-00; 2 – б 11-00; 3 – д 11-00;
— — песок; - - - супесь; - · - · - суглинок

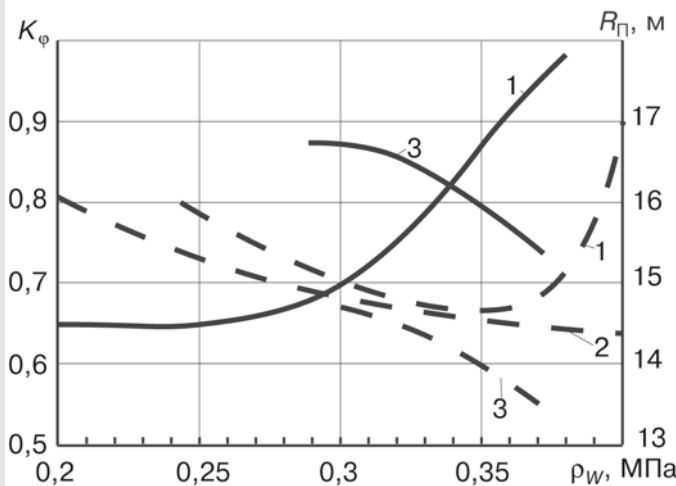


Рис. 9. Влияние давления воздуха в шинах p_w на коэффициент использования сцепной силы движителя при повороте K_{ϕ} (—) и действительный радиус поворота R_{Π} (- · -) (штатный вариант КМ): 1 – песок ($\rho=1560$ кг/м³; $W=0,8$; $H_r=0,35$ м); 2 – супесь ($\rho=1590$ кг/м³; $W=0,8$; $H_r=0,3$ м); 3 – суглинок ($\rho=1690$ кг/м³; $W=0,6$; $H_r=0,3$ м)

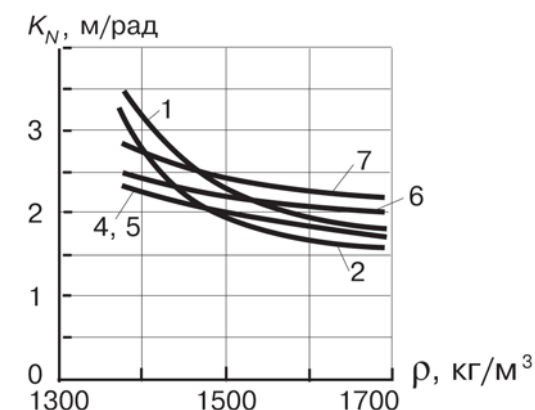
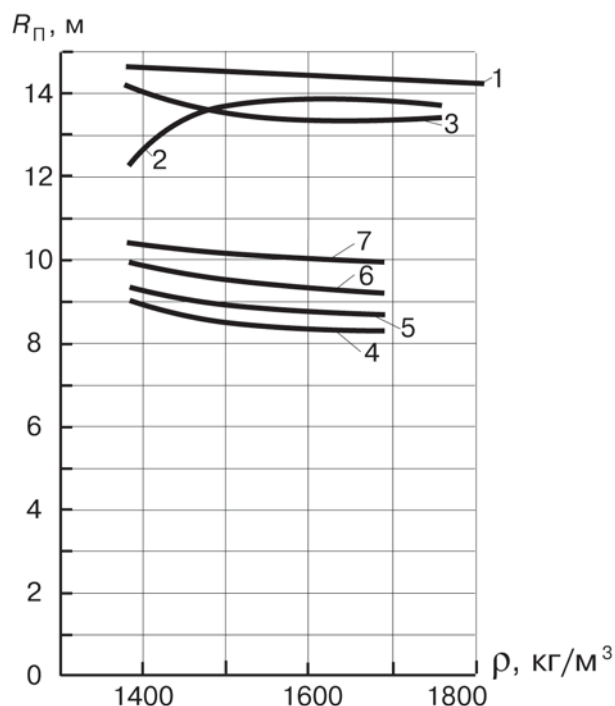


Рис. 10. Влияние плотности грунта (супесь) ρ на критерии и показатели эффективности движения при повороте КМ с различными формулами управления:
1 – ш 11-00; 2 – б 11-00; 3 – д 11-00; 4 – д 1-11-1; 5 – б 1-11-1; 6 – д 1-00-1; 7 – б 1-00-1

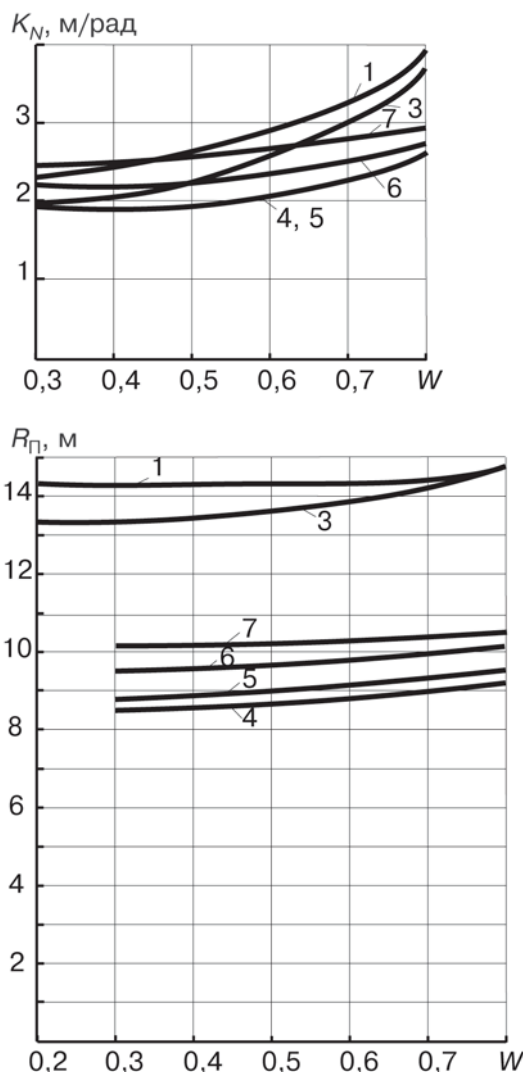


Рис. 11. Влияние относительной влажности грунта (супесь) W на критерий эффективности при повороте K_N (а) и действительный радиус поворота R_n (б) КМ с различными формулами управления:

1 – ш 11-00; 2 – б 11-00; 3 – д 11-00; 4 – д 1-11-1; 5 – б 1-11-1; 6 – д 1-00-1; 7 – б 1-00-1

чем радиусы поворота шасси со всеми управляемыми осями (1-11-1) и с управляемыми только передней и задней осью (1-00-1) в среднем на 40–45% меньше, чем у штатного варианта в заданном интервале варьирования плотностью грунта. Плотность грунта увеличивается на 20%, а радиус поворота уменьшается в среднем на 10%. Можно отметить существенное влияние на статическую поворотливость КМ введение в конструкцию шасси управляемой задней оси. Влияние управляемых средних сближенных осей меньше.

При движении на грунтах типа супесь ма-

лой плотности ($\rho < 1500 \text{ кг/м}^3$) введение дополнительных задних управляемых осей приводит к улучшению параметров поворотливости до 40–50 %.

Анализируя расчетные результаты на рис. 11, можно констатировать, что увеличение влажности грунта приводит к ухудшению параметров статической поворотливости, особенно для схемы шасси только с передними управляемыми колесами.

Выводы

1. Формула управления КМ со всеми управляемыми осями обеспечивает уменьшение радиуса поворота до 40% на всех типах грунтов независимо от их плотности и влажности по сравнению со штатной схемой.

2. Удельные затраты мощности K_N МАЗ-543 на единицу угловой скорости при повороте на супеси с плотностью более 1500 кг/м^3 с разными схемами управления и трансмиссии близки и отличаются не более чем на 20%. На более мягких грунтах схема управления со всеми управляемыми осями обеспечивает уменьшение K_N до 30%.

3. Увеличение относительной влажности супеси с 0,3 до 0,8 (в 2,5 раза) приводит к увеличению K_N для штатной схемы управления и трансмиссии на 75%, для схемы со всеми управляемыми осями на 32%, для схемы только с крайними управляемыми осями увеличение значительно меньше (до 16%).

4. Результаты расчета показывают, что для всех рассматриваемых типов грунтов при $\rho > 1700 \text{ кг/м}^3$ кинематические и силовые параметры поворота МАЗ-543 изменяются незначительно. Уменьшение плотности песка с 1700 до 1500 кг/м^3 приводит к увеличению удельных затрат мощности в 2 – 3 раза. Аналогичное уменьшение плотности супеси приводит к увеличению K_N до 100%. На связных грунтах типа суглинков такое изменение плотности почти не ощутимо.

5. Увеличение относительной влажности песка и супеси от 0,1 до 0,7 для штатной схемы МАЗ-543 приводит к одинаковому увеличению

удельных затрат мощности (на 70%). Для дифференциальной схемы трансмиссии такое увеличение влажности приводит к увеличению K_N на 10%. На связных грунтах типа суглинка увеличение влажности практически не влияет на удельные затраты мощности для штатной и дифференциальной схем трансмиссии. Для блокированной схемы трансмиссии такое увеличение влажности приводит к увеличению K_N на 30%.

Список литературы

1. Аксенов П.В. Многоосные автомобили. – М.: Машиностроение, 1989. – 280 с.
2. Антонов Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
3. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
4. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
5. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
6. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Динамика колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности. – М.: МГИУ, 2003. – 124 с.
7. Вольская Н.С., Игнатушин А.П. Модель поворота многоосной колесной машины на грунте // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2005. №4. С. 81–91.