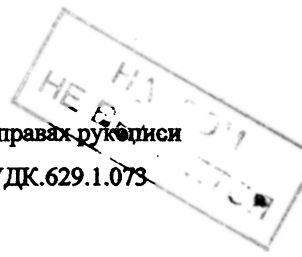


На правах рукописи

УДК.629.1.073



ЛАРИН ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ОПОРНОЙ
ПРОХОДИМОСТИ МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН НА
МЕСТНОСТИ**

Специальность 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Работа выполнена в Московском Государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор АГЕЙКИН Я.С.

доктор технических наук, профессор НАУМОВ В.Н.

доктор технических наук, профессор БЕЛЯКОВ В.В.

Ведущее предприятие: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

Защита состоится “ 2 ” июля _____ 2007 г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета по транспортному машиностроению Д212.141.07 при Московском Государственном техническом университете им Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Г.О. Котиев

Подписано к печати 24.04.2007.

Заказ 245 . Объем 2,0 п. л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ФУЛК

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы – определяется необходимостью повышения эффективности колесных транспортных средств (КТС) на местности при решении народно-хозяйственных и оборонных задач.

Эффективность выполнения поставленных задач КТС принято характеризовать "подвижностью" – комплексом свойств, характеризующих способность движения по заданному маршруту с высокой скоростью, экономичностью и надежностью.

В зависимости от назначения КТС, первые два комплексных свойства могут конфликтовать между собой, надежность же перевозки груза является основным требованием, которое и ограничивает показатели подвижности КТС.

Решение всего комплекса задач, связанных с вопросами подвижности, является достаточно сложной задачей. Поэтому до настоящего времени в большинстве случаев, весь комплекс задач подвижности разбивается на несколько групп, каждая из которых решает только частные вопросы.

В большинстве случаев ограничение параметров подвижности связано с движением КТС по неподготовленной местности и дорожным покрытиям в плохом состоянии.

Эффективность выполнения поставленных задач зависит от конструктивного исполнения КТС – общей компоновки, силовой установки, трансмиссии, систем поддрессирования и управления, колесного движителя.

Реализацию на местности всех заложенных в КТС конструктивных решений обеспечивает в первую очередь колесный движитель КТС.

Совершенство и эффективность колесного движителя (КД) КТС определяется параметрами одиночного КД (пневматической шины), их числом и расположением по базе, распределением нормальных нагрузок и силового потока, схемой поворота и т. д.

Цель работы – повышение опорной проходимости КТС на местности на базе дальнейшего развития:

- теоретических методов оценки деформируемости грунтов различными деформаторами при произвольном нагружении;
- методов исследования качения эластичного КД по прямолинейным и криволинейным траекториям на твердой (ТОП) и деформируемой опорной поверхности (ДОП);
- методов исследования и прогнозирования характеристик прямолинейного и криволинейного движения многоосного КТС по деформируемым опорным поверхностям.

Для достижения цели работы на основе анализа современного состояния теории взаимодействия колесных движителей с деформируемой опорной поверхностью и методов исследования движения КТС сформулированы и решены следующие задачи:



1783587

Парин В.В. Методы прогноза

М Г Т У
ИМ. Н. Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА 1

- провести анализ и получить аналитические зависимости, описывающие изменение основных параметров деформируемых опорных поверхностей Земной поверхности, необходимых для оценки проходимости КТС на маршруте движения;

- разработать методику расчета деформаций ДОП при различных видах нагружения и параметрах деформаторов;

- провести анализ и разработать эмпирические зависимости, определяющие значения нормальной деформации и сопротивления качению пневматических шин при изменении нормальной нагрузки и внутреннего давления воздуха;

- создать методику расчета параметров прямолинейного качения эластичного КД по твердым и деформируемым опорным поверхностям при наличии скольжения и фрезерования грунта в зоне контакта;

- провести анализ влияния конструктивных и эксплуатационных параметров одиночного КД на параметры его опорной проходимости на базе созданных методик;

- разработать методику расчета последовательного движения колесных движителей по одной колее при прямолинейном движении КТС с учетом фрезерования и обвала грунта в колею;

- создать методику расчета параметров криволинейного качения эластичного КД по твердой и деформируемой опорным поверхностям при наличии скольжения и фрезерования грунта в зоне контакта;

- разработать методику расчета криволинейного движения колесных движителей по колее, образованной предыдущими КД при криволинейном движении КТС, с учетом несовпадения их траекторий;

- разработать методику прогнозирования и программы для ЭВМ расчета характеристик прямолинейного и криволинейного движения многоосного КТС по деформируемой опорной поверхности;

- провести анализ влияния на параметры опорной проходимости КТС при прямолинейном и криволинейном движении конструктивных (база, колея, расположение и число осей, параметры КД, распределение силового потока, схема поворота) и эксплуатационных (положение центра масс, давление воздуха в шинах, скорость движения, радиус поворота) параметров;

- разработать методику расчета параметров эффективности КТС на маршруте движения при изменении эксплуатационных параметров.

Научная новизна:

- получены аналитические зависимости изменения основных физико-механических параметров деформируемых опорных поверхностей (песков, супесей, суглинков, глин, лессов, торфяных залежей и снега) Земной поверхности, упрощающих и расширяющих возможности оценки опорной проходимости КТС на маршруте движения;

- создана на базе теорий механики грунтов методика расчета деформаций ДОП при различных видах нагружения и параметрах деформаторов, учи-

тывающая процессы уплотнения и сдвигов частиц дисперсных тел, время действия, позволяющая точнее описывать процессы деформаций под движителями транспортных средств;

- созданы методики расчета параметров прямолинейного качения одиночного и многоопорного колесного движителя по твердым и деформируемым опорным поверхностям при наличии скольжения, фрезерования и обвала грунта в зоне контакта, отличающиеся методами определения нормальных и касательных напряжений, деформаций грунта, обеспечивающие более близкое совпадение расчетных и экспериментальных данных;

- разработаны методики и программы, позволяющие проводить точную оценку и анализ на ранней стадии проектирования колесного движителя влияния основных конструктивных (свободного радиуса r_c , профиля B_n и H_n , протектора: коэффициента насыщенности k_n , высоты $h_{г.з}$ и шага $t_{г.з}$ грунтозацепов) и эксплуатационных (давление воздуха в шине p_w и нормальная нагрузка P_z) параметров на характеристики опорной проходимости;

- созданы методика и программы расчета параметров криволинейного качения одиночного и многоопорного колесного движителя по твердым и деформируемым опорным поверхностям при наличии продольного, бокового и углового скольжения, вертикальной и боковой деформаций грунта, его фрезерования в зоне контакта, учитывающие силовой и кинематический увод, отличающиеся методами определения нормальных, продольных и боковых напряжений, деформаций грунта, обеспечивающие более близкое совпадение расчетных и экспериментальных данных;

- созданы методики и программы расчета параметров прямолинейного и криволинейного движения многоосных КТС по деформируемым опорным поверхностям при наличии скольжения, фрезерования и обвала грунта в зоне контакта, учитывающие уклоны и параметры деформируемости опорной поверхности, основные конструктивные и эксплуатационные параметры многоосного КТС и колесного движителя, скорость и траекторию движения, отличающиеся возможностью учета большого числа нелинейностей в ходовой части, трансмиссии и зоне контакта колесных движителей с грунтом;

- разработаны новые методики и программы, позволяющие на ранней стадии проектирования проводить анализ влияния основных конструктивных и эксплуатационных параметров КТС на параметры опорной проходимости при прямолинейном и криволинейном движении, определять пути выбора оптимальных: компоновочных решений (базы, колеи, числа осей, расположения осей по базе); распределения нормальных статических нагрузок по осям; полной массы; схемы поворота; габаритов и числа КД при заданных массе и базе КТС; внутреннего давления воздуха в шинах; законов распределения силового потока по колесным движителям; скорости и радиуса кривизны движения;

- разработана методика расчета параметров эффективности КТС на маршруте движения, использующая кроме известных средней скорости и пу-

тевого расхода топлива, дополнительные показатели эффективности – коэффициент подведенной мощности к колесному движителю и коэффициент полезной мощности силовой установки. Отличительной особенностью методики является предварительное создание расчетных матриц параметров движения КТС по различным опорным поверхностям.

Достоверность результатов. Методика расчета деформаций опорных поверхностей при различных видах нагружения и параметрах деформаторов экспериментально подтверждена серией опытов на грунтовом канале с сухим песком.

Методика расчета параметров опорной проходимости одиночных колесных движителей и многоосных колесных транспортных средств подтверждена сравнением расчетных и экспериментальных исследований на различных грунтовых поверхностях:

- при прямолинейном движении – в широком диапазоне изменения нормальных нагрузок (давлений) для КТС различной грузоподъемности: сверхнизкой (малогабаритные специальные шасси) $P_{zi} < 0,3 \text{ кН}$ ($p_{z, \text{ср.тс}} = 0,007 \dots 0,03 \text{ МПа}$), средней (многоцелевые автомобили) $P_{zi} < 50 \text{ кН}$ ($p_{z, \text{ср.тс}} = 0,095 \dots 0,195 \text{ МПа}$), высокой (многоосные специальные шасси) $P_{zi} = 50 \dots 75 \text{ кН}$ ($p_{z, \text{ср.тс}} = 0,141 \dots 0,327 \text{ МПа}$);

- при криволинейном движении - для многоцелевых автомобилей $P_{zi} < 50 \text{ кН}$ ($p_{z, \text{ср.тс}} = 0,095 \dots 0,195 \text{ МПа}$).

Практическая ценность. Методики и программы расчетов на ЭВМ, практические рекомендации позволяют производить выбор конструктивных и эксплуатационных параметров КТС различной массы, обеспечивающих наилучшие параметры опорной проходимости при прямолинейном и криволинейном движении по деформируемым опорным поверхностям местности.

Методика расчета эффективности КТС на маршруте движения позволяет производить оценку, прогнозирование и выбор колесного транспортного средства обеспечивающего при изменяемых его эксплуатационных параметрах наибольшую эффективность выполнения поставленных задач.

Аппроксимирующие зависимости параметров грунтов и методики расчета параметров взаимодействия штампов с грунтом позволяют приближенно, но достаточно быстро, определять основные характеристики реальных грунтов на маршруте движения.

Реализация работы. Результаты работы внедрены в ОАО КАМАЗ, ООО БАЗ, ОАО РУСИЧ-КЗКТ, НИИСМ и НПЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Научно-исследовательские работы по теме диссертации выполнялись на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всесоюзной конференции «Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении», Москва, 1980

г.; региональной научно-технической конференции "Повышение эффективности проектирования и испытаний автомобилей", Горький, 1984 г.; Всесоюзной конференции по теории и расчету мобильных машин и ДВС, Телави, 1985 г.; Симпозиуме по термомеханике "Оптимальное взаимодействие", Суздаль, 1992 г.; научно-технической конференции МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2000 г.; 14 симпозиуме "Проблемы шин и резинотехнических композиций", Москва, 2003 г.; Международном симпозиуме "Проектирование колесных машин", Москва, 2005 г.; Международном симпозиуме "Образование через науку", Москва, 2005 г.; Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры "Колесные машины" МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2006 г.; научных семинарах кафедры "Колесные машины" МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1976, 1978, 1980...1986, 2000, 2006, 2007 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 печатных и 29 рукописных работ. В феврале 2007 г. издана монография (224 стр.).

Объем работы. Диссертация состоит из 2-х томов: введения, 4 глав, выводов и приложений. Содержит 608 страниц машинописного текста, 286 рисунков и 42 таблицы. Список использованной литературы содержит 338 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Определены актуальность, цель и задачи, решаемые в работе. Представлены: научная новизна и практическая ценность, достоверность исследований.

Поставленные задачи определены на основе анализа работ авторов, внесших значительный вклад в развитие теории и практической оценки параметров подвижности КТС, заложивших направления и научные подходы к решению многих рассматриваемых в работе задач.

Это в первую очередь Российские и исследователи бывшего СССР: Я.С. Агейкин, П.В. Аксенов, А.С. Антонов, Д.А. Антонов, В.Ф. Бабков, Л.В. Барахтанов, Г.Б. Безбородова, Б.Н. Белоусов, В.В. Беляков, А.К. Бируля, В.П. Бойков, Н.Ф. Бочаров, Ю.А. Брянский, Н.А. Бухарин, Р.В. Вирабов, А.В. Васильев, И.И. Водяник, С.Г. Вольский, М.С. Высоцкий, М.Э. Генних, В.В. Горячкин, В.А. Грачев, А.И. Гришкевич, В.В. Гуськов, А.А. Дмитриев, С.С. Дмитриченко, А.И. Егоров, Н.А. Забавников, В.И. Задорожный, Г.В. Зимелев, А.Ю. Ишлинский, В.В. Кацыгин, В.И. Кнороз, Н.И. Коротоношко, Н.Ф. Кошарный, А.А. Крживицкий, И.П. Ксенович, Н.К. Куликов, Г.М. Кутьков, М.Г. Лабезников, М.А. Левин, М.Н. Летошнев, А.С. Литвинов, Е.Д. Львов, М.И. Ляско, А.Н. Мамаев, В.И. Медведков, В.К. Мишкинчук, В.В. Московкин, В.Н. Наумов, А.Н. Орда, И.П. Петров, В.А. Петрушов, Ю.В. Пирковский, В.Ф. Платонов, А.Ф. Полетаев, А.А. Полунгян, Ю.Л. Рождественский, С.С. Саакян, В.М. Семенов, Л.В. Сергеев, В.А. Скотников, А.П. Софьян, Г.А. Смирнов, А.П. Степанов, Н.А. Ульянов, Я.Е. Фаробин, Н.А. Фуфаев, М.П. Чистов, Е.А. Чудаков, Б.Л. Шапошник, С.А. Шуклин, С.Б. Шухман.

Из зарубежных авторов: Д. Адамс, М.Г. Беккер, Л. Вильям, Дж. Вонг, З. Джаноси, В.И. Диксон, Д.М. Кларк, Г. Крик, С.И. Колби, Г. Команди, Р.А. Листон, С. Ньютола, А. Риис, Р.С. Роу, Г. Ситкей, А. Солтынский, Д.В. Стаффорд, Д. Шуринг, С.Р. Фостер, Э. Хаггедус, М.Л. Харрисон, Б. Ханамото, Р.Н. Янг, З. Яноси.

Глава 1. Характеристики почвенно-грунтовых поверхностей (ППП) и зависимости взаимодействия с ними штампов-двигателей

По систематизированным и обработанным литературным источникам проведена аппроксимация изменения основных механических параметров грунтов в зависимости от зернового состава, коэффициента пористости e , влажности W .

Изменение угла внутреннего трения ϕ_0 , связности грунта c_0 и модуля общей деформации E_0 описывается уравнениями [4]:

$$\phi_0 = a_{\phi e}(e)^{b_{\phi e}}, \quad c_0 = a_{ce}(e)^{b_{ce}}, \quad E_0 = a_{Ee}(e)^{b_{Ee}},$$

где коэффициенты a_i и b_i являются функциями коэффициентов водонасыщения J_w для несвязанных грунтов и показателя консистенции J_L для связанных.

Для торфяных грунтов получены уравнения изменения механических характеристик дополнительно в зависимости от степени разложения R , %, и зольности A_c , %.

Для снега изменение ϕ_0 , c_0 , E_0 (МПа) и коэффициента трения скольжения $\phi_{тр}$ представлено в зависимости от удельного веса γ и температуры T (°С).

Получены аналитические выражения значений коэффициентов для ДОП различного состояния [4].

Переход к другим необходимым для расчета опорной проходимости параметрам осуществляться по известным уравнениям механики грунтов [4].

Разработана методика расчета деформаций грунтового основания при произвольном нагружении пространственного деформатора [5, 6, 9].

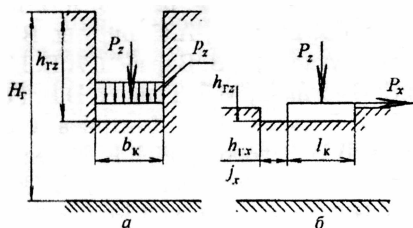


Рис. 1

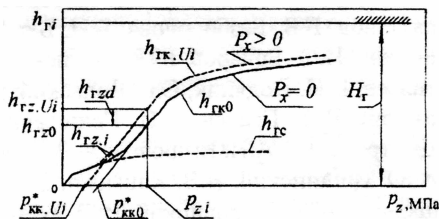


Рис. 2

Вертикальная деформация грунта h_{rz} , описывается процессами сжатия и сдвигов частиц грунта, учитывает размеры (b_k и l_k), форму штампа, толщину слоя грунта H_r , направление вектора суммарной внешней силы, рис. 1. Суммарная деформация h_{rz} определяется вертикальными деформациями сжатия h_{rc} и сдвигов h_{rk} (1).

$$h_{tz} = h_{гк} + h_{гс} \exp(-h_{гк}/h_{гс}) (H_r/(H_r - h_{гк})). \quad (1)$$

Вертикальная деформация сжатия $h_{гс}$ определяется суммой деформаций элементарных слоев dz , сжимаемых нормальным давлением p_{zci} , зависящим от глубины залегания слоя z_i , нормального максимального давления в зоне контакта деформатора с грунтом, размеров и формы штампа, неоднородности грунта по глубине, эпюры нагружения, близости твердого подслоя. Предельное давление $p_{с*}$ выше которого деформация сжатия не изменяется: $p_{с*} = E_0(e_0 - e_{\min})/(1 + e_0)$.

Вертикальная деформация сдвигов $h_{гк}$ определяется потерей несущей способности грунта с учетом размеров штампа, H_r , угла приложения нагрузки U_x , критического давления $p_{кк}$: $h_{гк} = 0,5[-b_h - (b_h^2 - 4c_h)^{0,5}]$, где: $b_h = H_r(N_1^* + N_3^* - p_{кк} - H^*N_2^*) - 0,5H_n(N_1 + N_3^*)/A_h$; $c_h = H_rH^*(p_{кк} - N_1^* - N_3^*)/A_h$; $A_h = N_2^*(H_r - 0,5H_n)$, $H^* = H_r - 0,25H_n \exp(-0,1|U_x|)$, $U_x = \arctg(R_x/P_z)$, $H_n = 0,707b \lg \varphi_0 \cos \varepsilon \exp(\lg \varepsilon(0,25\pi + \varepsilon))$, $\varepsilon = 0,75\varphi_0$, $N_1^* = K_\gamma N_\gamma \gamma 0,5b$; $N_2^* = K_p N_p \gamma$; $N_3^* = K_c N_c c_0$.

Коэффициенты несущей способности грунта K_i и N_i получены на основе аппроксимации решений В.В. Соколовского по определению несущей способности $p_{кк}$ при действии наклонной нагрузки для плотных грунтов, с их корректировкой для рыхлых грунтов на основании проведенных автором экспериментальных работ.

Приемлемая точность расчета h_{tz} доказана экспериментально при внедрении различных по размеру и форме штампов в сухой песок.

Горизонтальная деформация грунта $h_{гх}$, рис. 1 б, возникает при одновременном приложении нормальной (P_z) и горизонтальной нагрузок (P_x , P_y), возможна дополнительная вертикальная осадка $h_{гzd}$. Характер и величины этих деформаций зависят от соотношений нормального давления p_z и несущей способности грунта $p_{кк}$.

При средних и больших $p_z/p_{кк}$, рис. 2, с увеличением горизонтальной нагрузки (угла действия нагрузки U_x), снижается несущая способность $p_{кк}$, увеличивается $h_{гк}$ и $h_{гс}$. Дополнительные вертикальные и горизонтальные деформации: $h_{гzd} = h_{гс} - h_{гс0}$; $h_{гх} = h_{гс} \tau_x/p_z$, где $h_{гс0}$ - нормальная деформация при $U_x = 0$, τ_x и p_z - напряжения, действующие непосредственно на подошве штампа.

При давлениях значительно меньших несущей способности, в зависимости от характеристик "подошвы" штампа рассматриваются два процесса.

При гладкой подошве штампа и высоком сцеплении частиц грунта (плотный) значение предельной горизонтальной реакции R_x определяется коэффициентами трения покоя μ_n и скольжения $\mu_{ск}$ материала штампа о грунт. При продольной силе $P_x = R_x \leq \mu_n P_z$, горизонтальные деформации отсутствуют $h_{гх} = j_x = 0$. После достижения $P_x > \mu_n P_z$, штамп начинает скользить по грунту, $R_x = \mu_{ск} P_z$, $h_{гх} > 0$ и зависит от величины и интенсивности приложения внешней силы P_x , определяющей скорость скольжения штампа по грунту,

жесткости и массы штампа и т. д., рис. 1 б. Предлагается описывать изменение касательных напряжений τ от горизонтального сдвига $j = h_{гх}$ уравнением (2), рис. 3:

$$\tau = \tau_{уст} (1 - \exp(-|j|/j_o)) + a_c \exp[-(|j| - j_m)^2/a_t], \quad (2)$$

$$\tau_{уст} = p_z \operatorname{tg} \varphi_0; \quad \tau_{max} = \tau_{уст} + c_0; \quad j_m = K_{с.гр} t_{вп}; \quad j_o = k_{j_o} j_m; \quad a_c = c_0; \quad a_t = k_{a_t} j_m / \operatorname{tg} \varphi_0.$$

Значения j_m , j_o и a_t , определенные нами через выбранные коэффициенты $K_{с.гр} = (e_0 - e_{min})/(1 + e_0)$, k_{j_o} , k_{a_t} , могут уточняться по мере накопления экспериментальных данных.

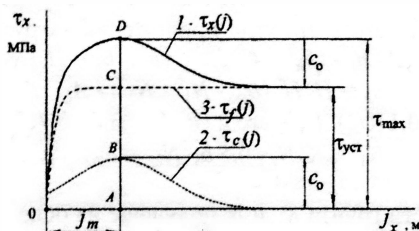


Рис. 3

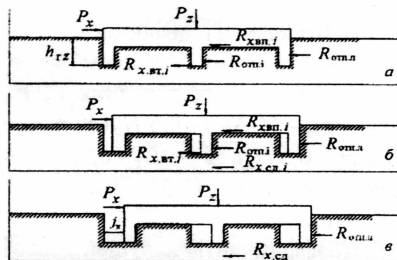


Рис. 4

При наличии грунтозацепов продольная реакция R_x складывается из элементарных сил трения по выступам грунтозацепов, сдвига (отпора) грунта, расположенного между грунтозацепами, дополнительного отпора грунта по лобовым поверхностям грунтозацепов.

Процесс восприятия штампом продольной нагрузки P_x разделяется на три фазы, рис. 4, в каждой из которых определяется значение R_x и j_x .

Время действия нагрузки t учитывается введением коэффициента динамичности $K_{гд} = t/(t + t_p)$, уменьшающим значение расчетной действующей на грунт нагрузки: $p_{zp} = p_z K_{гд}$. Время релаксации грунта $t_p = 0,5/\varphi_0$ (φ_0 , в градусах).

Доказано, что при штампах произвольной формы в вертикальном сечении с углом наклона элементов штампа к вертикали $\beta > \varphi_c$ для определения несущей способности при заданной деформации, можно приводить криволинейный штамп к плоскому, действующему на глубине максимальной осадки. Ошибка при этом не превосходит 5%. При $\beta \leq \varphi_c$ (угол наклона стенки $U_{st} \geq \varphi_c$) необходимо учитывать давление пассивного отпора σ_n грунта на стенку, т.е. часть нормальной нагрузки действующей на штамп будет восприниматься реакциями отпора, другая часть — приведенным плоским контактом.

Предлагаемые зависимости и методики оценки деформируемости грунтов в нормальном и горизонтальном направлениях (сдвиги и отпор), а также распределение контактных напряжений по поверхности штампа произвольной формы, обладая достаточной простотой, приемлемо точно описывают процессы деформируемости большинства ДОП в зависимости от параметров грунтового основания, нагружающего штампа, значений и направлений дей-

ствия нагрузки.

Глава 2. Взаимодействие одиночного колесного движителя с опорной поверхностью (ОП)

Модель прямолинейного качения КД по твердой ОП [7, 12, 13]. Основное требование к разрабатываемой модели – возможность эффективного определения нормальных и касательных напряжений по длине контакта близких к реальному распределению.

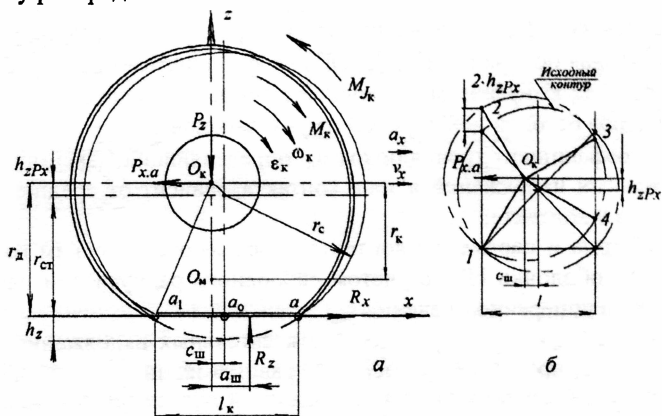


Рис. 5

Предлагаемая математическая модель, рис. 5, базируется на следующих допущениях:

- момент сопротивления качению КД $M_{fшPz}$, обусловленный вертикальной нагрузкой P_z , не зависит от продольной силы P_x ;
- при действии продольной силы P_x на оси КД, ось смещается: в продольном направлении (по оси x) относительно центра контакта КД и ОП на величину $c_{ш}$, пропорциональную вертикальному (по оси z) перемещению оси h_z под действием вертикальной силы P_z ($c_{ш} = h_z P_x / P_z$); по оси z относительно статического положения на величину $h_{zPx} = |c_{ш}| 0,5 l_k / r_{ct}$;
- мощность, подводимая к оси КД, затрачивается на: преодоление внутренних потерь в КД при приложении силы P_z (перемещение h_z) и силы P_x (перемещения $c_{ш}$, h_{zPx} , окружную деформацию беговой дорожки-протектора); преодоление внешних сопротивлений (тяговой силы P_x , продольной силы инерции P_{ax} и момента инерции M_{jk} относительно оси КД); скольжение беговой дорожки КД по опорной поверхности со скоростью v_s ;
- нормальные напряжения по длине контакта p_i формируются вследствие радиального перемещения и изгиба в вертикальной плоскости бесконечно малого элемента беговой дорожки;
- условные деформации изгиба h_z определяются разницей углов наклона в продольно-вертикальной плоскости касательных линий к профилю неде-

формированной α_0 и деформированной шины α_k в одном и том же вертикально-поперечном сечении контакта;

– нормальные напряжения в зоне нагрузки p_{zn} и разгрузки p_{zp} являются линейными функциями радиальных и изгибных деформаций и нескольких взаимосвязанных коэффициентов, определяемых из известных (полученных экспериментальными или расчетными методами) интегральных параметров качения КД;

– касательные напряжения в продольной плоскости τ являются функциями: продольного перемещения (сдвига) j элементов беговой дорожки КД относительно ОП; постоянных для конкретной системы “колесный движитель-опорная поверхность” (КД-ОП) коэффициентов трения скольжения $\mu_{ск}$ и связности c_0 ; коэффициентов кривой сдвига, зависящих от длины контакта и параметров беговой дорожки КД (грунтозацепов);

– коэффициент трения покоя $\mu_{п.}$, определяющий максимальные значения касательных напряжений в зоне контакта, зависит от среднего нормального давления в контакте;

– форма и параметры контакта определяются плоским горизонтальным сечением оболочки ПШ с учетом свободного радиуса r_c и радиуса беговой дорожки в поперечном сечении $r_{бд}$;

– распределение нормальных и касательных напряжений в поперечных сечениях КД принято равномерным, равным их значениям в плоскости симметрии КД.

Уравнения моментов и мощности при интегральных значениях силовых параметров:

$$M_k = M_{fшPz} + P_{x,a} (r_{ст} + h_{zP_x}); P_{x,a} = P_x + m_k a_x; \quad (3)$$

$$M_k \omega_k = M_{fшPz} \omega_k + P_{x,a} \omega_k r_{ко} + P_{x,a} \omega_k c_{ш} + P_{x,a} \omega_k h_{zP_x} + P_{x,a} \omega_k h_{zP_x} |P_x|/P_x + P_{x,a} \omega_k dr_{кв} + M_{jk} \omega_k + R_x v_s. \quad (4)$$

Интегральные силовые параметры определяются машинным интегрированием элементарных нормальных и касательных сил по длине контакта.

Нормальные напряжения в зонах нагрузки p_{zn} и разгрузки p_{zp} :

$$p_{zn} = K_{1c}(h_{rc} + Q_{ciz} h_{iz}); p_{zp} = K_{1c} [(1 - (1 - Q_c) |x_i|/x_a) h_{rc} + Q_{ciz} (1 - (1 - Q_c) |x_i|/x_a) h_{iz}]. \quad (5)$$

Деформации сжатия и изгиба: $h_{rc} = r_c - (r_d^2 + x^2)^{0,5}$; $h_{iz} = r_c - (r_c^2 - x^2)^{0,5}$.

Получены выражения для нормальных нагрузок: P_z – при качении КД, P_{zn} и P_{zp} – соответственно при нагрузке и разгрузке не катящегося КД; момента сопротивления качению M_f

Касательные напряжения: $\tau = \tau_{уст} (1 - \exp(-|j|/j_o)) + a_c \exp[-(|j| - j_m)^2/a_i]$,

$$\tau_{уст} = p_z \mu_{ск}; a_c = c_0 = p_z (\mu_{п.} - \mu_{ск}); \tau_{max} = \tau_{уст} + c_0 = p_z \mu_{п.}; \quad (6)$$

$j_m = k_{оп} l_k$; $j_o = k_{jo,оп} j_m$; $a_i = k_{ai,оп} j_m / \mu_{ск}$; $0,01 \leq k_{оп} \leq 0,1$; $k_{jo,оп} \approx 0,1$; $k_{ai,оп} \approx 0,05$;

$$j = (r_c - h_z) (\tg \alpha_a - \tg \alpha) - r_k (\alpha_a - \alpha).$$

Предполагается, что $\mu_{ск} = \text{const}$, $c_0 = \text{const}$, $\mu_{п.} = \mu_{ск} + c_0/p_z$, значение $c_0 = p_{зб} (\mu_{пб} - \mu_{ск})$ определяется при базовых (экспериментальных) $p_{зб}$ и $\mu_{пб}$.

Наиболее полно эффективность работы КД описывается зависимостями и характеристиками: $K_\tau = f(s_6)$; $f_N = f(K_\tau)$; $f_{Nf} = f(K_\tau)$, где $K_\tau = P_x/P_z$; $f_N = N_k/(P_z$

$$v_x); f_{Nf} = (N_{fш} + N_{fз}) / (P_z v_x).$$

Вводятся понятия коэффициентов продольного скольжения: общего – $s_{60} = 1 - r_k/r_c$; упругого – $s_{6y} = 1 - r_{к0}/r_c$; сдвигового – $s_{6j} = 1 - r_k/r_{к0}$.

Модель криволинейного качения КД по твердой ОП [19].

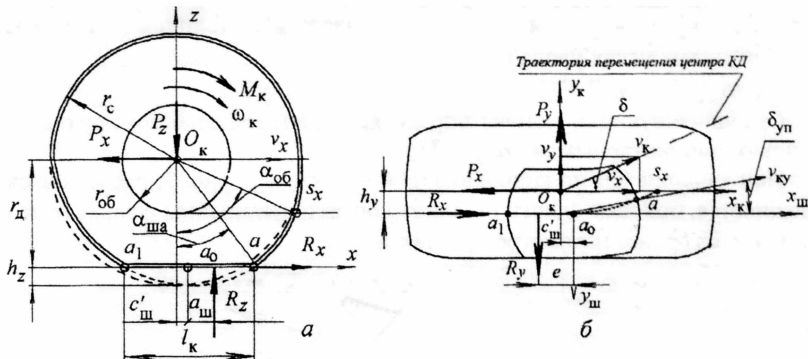


Рис. 6

Вводятся дополнительные допущения, рис. 6:

- плоскость вращения КД перпендикулярна опорной поверхности;
- под действием боковой силы P_y , обод КД перемещается в боковом направлении относительно центра контакта на величину боковой деформации шины КД h_y со скоростью $v_{y,уп}$, который в свою очередь скользит по ОП в боковом направлении на величину бокового сдвига j , со скоростью $v_{y,ск}$;

- угол бокового увода δ состоит из упругой (шинной) $\delta_{уп}$ и сдвиговой δ_j составляющих $\delta = \delta_{уп} + \delta_j$;

- боковое смещение h_y середины беговой дорожки в каждом радиальном сечении передней части шины относительно оси $x_{ш}$ изменяется линейно от 0 до h_y (при линейной траектории центра обода);

- вектор скорости центра обода т. O_k , обусловленный только упругой боковой деформацией – $v_{к,уп}$, параллелен линии, проходящей через точки середины (т. a_0) и начала контакта (т. a).

Функциональная зависимость $P_y = f(p_w, P_z, \delta)$ при различном сцеплении с опорной поверхностью определяется машинным интегрированием элементарных сил по длине и ширине контакта. При заданном угле увода δ , задаваясь различными значениями сдвиговой составляющей угла увода δ_j и радиусом качения r_k , определяются необходимые параметры взаимодействия, упругая составляющая $\delta_{уп}$, расчетный угол увода $\delta_r = \delta_{уп} + \delta_j$, добиваемся заданной точности $\epsilon_\delta \geq |\delta - \delta_r|$.

Элементарные боковой сдвиг $j_y = (x_a - x_i) \tan \delta_j$ и напряжения τ_{xy} , определяются по (6) при параметрах: $c_{0,y}; \mu_{ск,y}; j_{my}; \mu_{п,y}; j_{0,y} \approx 0,1 j_{m,y}; a_{t,y} \approx 0,05 j_{m,y}$.

Суммарное расчетное напряжение сдвига $\tau_{xy} = (\tau_x^2 + \tau_y^2)^{0,5}$, ограничено предельным напряжением $\tau_{xy(j_{xy})}$ по сцеплению в направлении суммарного

рующих параметров КД, радиальной деформации КД h_z и глубины погружения в грунт h_r :

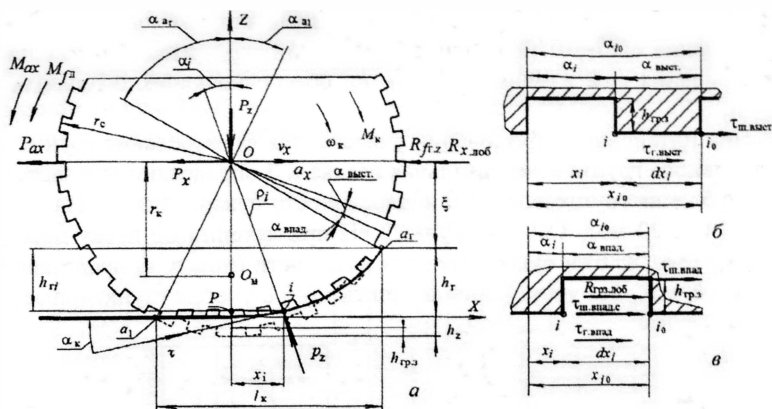


Рис. 8

– в продольно-вертикальной плоскости задняя часть контакта плоская с координатой конца контакта a_1 , передняя описывается уравнением эллипса:

$$a_r = (r_c^2 - \xi^2)^{0.5}; \quad a_1 = (2r_c h_r - h_r^2)^{0.5}; \quad \xi = r_c - h_r - h_r; \quad \text{при } \xi < 0, \text{ принимаем } \xi = 0;$$

$$a_3 = (a_r^2 - h_r \xi) / (a_r^2 - 2h_r \xi)^{0.5}; \quad b_3 = h_r / [1 - (1 - (a_r/a_3)^2)^{0.5}]; \quad \text{при } \xi \leq 0: \quad b_3 = r_c - h_z;$$

$$h_{r,i} = h_r - b_3 [1 - (1 - (x/a_3)^2)^{0.5}];$$

– в поперечно-вертикальных сечениях профиль контакта состоит из плоской зоны, определяемой деформацией беговой дорожки, и сложной кривой контакта боковин;

– площади горизонтальных проекций всего F_k и "плоской" части $F_{кп}$ определяются интегрированием по длине l_k и ширине b_k контакта;

– нормальные напряжения в поперечных сечениях распределяются равномерно, а в продольном сечении в зонах нагрузки и разгрузки определяются радиальной деформацией и изгибом шины КД, аналогично (5);

– касательные напряжения определяются уравнением (6);

– значение j определяется интегрированием в пределах от продольной координаты т. a_r до x_i с приращением сдвига: $dj = [((dp/d\alpha)^2 + p^2)^{0.5} - r_k/\cos \alpha_k] d\alpha$.

Значения результирующих сил P_z , P_x , момента M_k и сил сопротивления качению, обусловленных вертикальной $R_{f,z}$ и горизонтальной $R_{x,лоб}$ деформацией грунта, его липкостью $R_{f,l}$ определяются машинным интегрированием элементарных нормальных и касательных сил по длине контакта с учетом расчетных нормальных p_{xp} и касательных τ_p напряжений, условной ширины контакта $b_{кп,i}$.

При наличии высоких грунтозацепов нормальные элементарные и касательные силы в зонах выступов и грунтозацепов определяются с учетом их

заглублений, поверхностного трения и лобового отпора на грунтозацепах, рис. 8, б, в.

Деформация грунта определяется по контакту, приведенному к плоско-му с равномерным распределением нормальных напряжений.

Решение системы нелинейных уравнений находится при заданном радиусе качения r_k и изменяемых h_r и h_z , обеспечивающих выполнение $P_z = R_{z,ш} = R_{z,r}$.

При интенсивном буксовании учитывается фрезерование грунта. Объем фрезеруемого грунта и вертикальная осадка КД определяются в зависимости от заглубления грунтозацепов и интенсивности буксования s_{60} . На рис. 9 для шины 14.00-20 мод. ОИ-25 с $P_z = 22$ кН при качении по песку пылеватому рыхлому (поз. а, б) и супеси средней влажности (поз. в, г) представлено изменение h_r и K_r без учета (сплошные линии) и с учетом (пунктирные) фрезерования грунта.

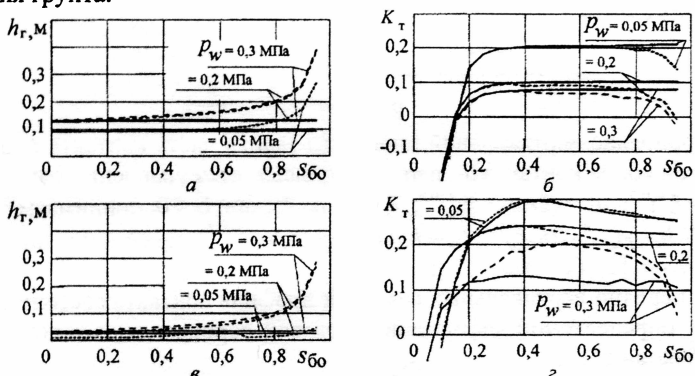


Рис. 9

При последовательных проходах КД нормальная деформация грунта определяется относительно недеформированной поверхности ($0 - 0$) $h_{r0,i}$ при нагружении приведенного плоского штампа нагрузками (P_z, P_x, P_y), с учетом времени действия нагрузки от движителя ТС через снижение нормального расчетного давления. Исходные параметры грунта считаются неизменными.

Длина контакта, с параметрами плоской зоны и криволинейной, описываемой уравнением эллипса, определяется аналогично КД при ($i - 1$)-ом проходе, при заглублении КД относительно поверхности грунта предыдущего прохода $h_{r,i}$. Реакция на прокладывание колеи при последующий проходах $R_{f,i,j}$ определяется разностью работ на вертикальную деформацию $h_{r0,i}$ при i -м и $h_{r0,i-1}$ при ($i - 1$) проходе КД.

При буксовании и фрезеровании грунта учитывается дополнительная осадка КД $h_{r0,i,p}$. Глубина колеи после прохода КД, исходя из допущения о неизменности объема грунта при разрушении, определяется выражением: $h_{r0,i} = h_{r0,i,p} - dh_{r,экс}$.

Для грунтов с низкой связность (сухой сыпучий песок) или малым углом

внутреннего трения ϕ_0 (перенасыщенные связные грунты, сухой снег) при расчетах учитывается обрушение стенок колеи от предыдущего прохода. Обрушенный грунт заполняет колею и последующий КД взаимодействует с грунтовой массой несколько большей, чем находящейся в зоне контакта предыдущего КД. На рис. 10 представлено изменение $h_{г0,i}$ и K_T по осям 8-осного КТС с шиной 14.00-20 и $P_z = 22$ кН при движении по песку пылеватому $H_r = 0,5$ м (линии сплошные с учетом обрушения стенок, пунктирные – без учета обрушения).

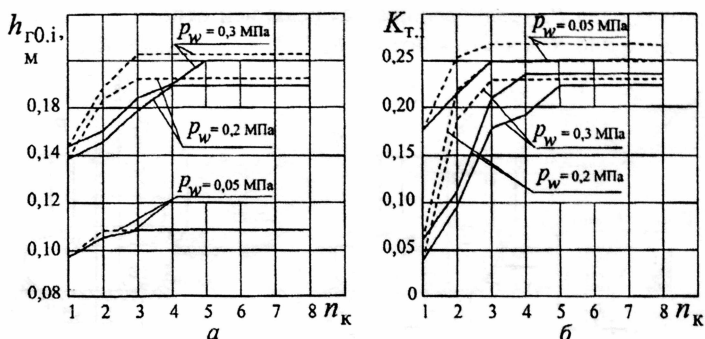


Рис. 10

Представлен анализ влияния основных исходных параметров грунта и параметров шины, описывающих процесс взаимодействия с грунтом, на параметры опорной проходимости КД.

Правомочность расчетной модели доказана на сравнении расчетных и экспериментальных данных качения различных КД по песку и рыхлой пахоте.

На примере шины близкой к базовой 1600x600-685 ($P_z = 70$ кН, $h_{гн} = 80$ мм) в приложении к работе представлен анализ влияния основных параметров колесного движителя на характеристики его взаимодействия с 27-ю ДОП толщиной слоя 0,5 м.

Исследовалось влияние параметров: беговой дорожки КД (ширины $b_{бл}$, коэффициента насыщенности k_n , высоты $h_{гp,з}$ и количества $n_{гp,з}$ (шага $t_{гp,з}$) грунтозацепов); геометрических r_c , B_n , H_n , $d_{об}$; эксплуатационных p_w и P_z .

Наиболее интенсивно улучшение параметров опорной проходимости КД проявляется в зоне малых значений геометрических параметров.

Количественно, улучшение выходных параметров опорной проходимости от изменения геометрических параметров КД зависит от типа опорной поверхности и изменяется от нескольких процентов до нескольких раз.

Модель криволинейного качения КД по деформируемой ОП [18].

При действии боковой силы шина КД искривляется, и центр обода перемещается в боковом направлении на h_y относительно центра контакта, рис. 11. Профиль поперечного сечения шины в зоне контакта изменяется.

В зависимости от эластичности шины боковины профиля шины могут “наклоняться” относительно плоской зоны контакта или профиль может перекачиваться в боковом направлении. В первом случае боковые деформации отпора грунта $h_{г.у.отп.i}$ “линейно” увеличиваются с уменьшением глубины заглабления профиля, во втором – “постоянны” по глубине.

Плоская зона контакта может скользить (сдвигаться) в боковом направлении на величину бокового сдвига $j_y > 0$. При малой несущей способности грунта в боковом направлении при этом возможна дополнительная вертикальная деформация грунта $h_{г.з.доп}$.

Боковая сила P_y уравнивается реакцией отпора боковин $R_{y.отп}$ и бокового сдвига плоской части контакта $R_{y,j}$: $P_y = R_y = R_{y.отп} + R_{y,j}$.

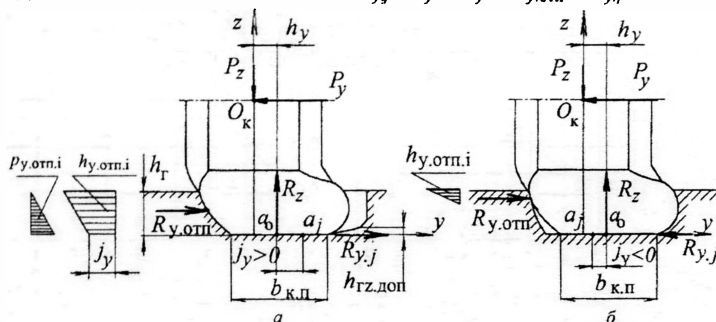


Рис. 11

Допущения:

- для шины зависимость $h_g(P_y)$ не зависит от глубины заглабления боковин h_g (отпора боковин);
- реакция отпора $R_{y.отп}$ зависит от профиля боковин, боковых перемещений $h_{г.у.отп.i}$ и давлений отпора грунта по боковине $p_{y.отп.i}$;
- реакция отпора боковин $R_{y.отп}$ определяется интегрированием равнодействующих пассивного давления p_n^* на заглаблении боковины по длине контакта, значение p_n^* определяется для вертикальной стенки ($U_{ст} = 90^\circ$), боковые перемещения стенки и увеличение объема нагрбаемого перед стенкой грунта в первом приближении не учитываются;
- боковая реакция сдвига плоской части контакта $R_{y,j}$ и боковой сдвиг j_y , а также продольная реакция R_x определяются по методике, рассмотренной при криволинейном движении КД по ТОП с учетом предельных возможностей по сцеплению в зоне контакта и нижних слоях грунта.

При оценке вертикальной деформации грунта $h_{г.сум}$ сравниваются возможные вертикальные деформации при действии горизонтальных сил R_x и $R_{y,j}$ по двум направлениям x и y : $h_{г.з.х}$ и $h_{г.з.у}$, за нормальную расчетную деформацию $h_{г.сум}$, принимается наибольшая $h_{г.з.i}$ по несущей способности грунта.

При прямолинейной траектории движения центра КД возникают только линейные боковые сдвиги $j_{y,i}$ точек контакта относительно опорной поверх-

ности.

При криволинейной траектории движения центра КД, рис. 12, суммарные расчетные боковые сдвиги точек контакта относительно опорной поверхности $j_{\text{вр}}$ определяются линейными боковыми сдвигами $j_{\text{л}}$ и криволинейными сдвигами $j_{\text{ук}}$, обусловленными поворотом контакта относительно опорной поверхности, $j_{\text{вр}} = j_{\text{л}} + j_{\text{ук}}$.

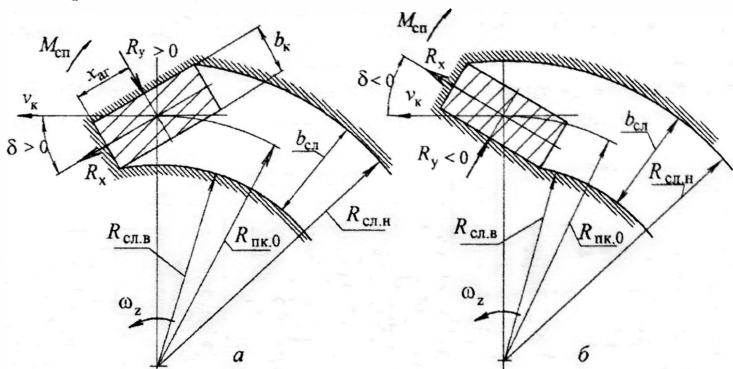


Рис. 12

Продольная R_x и боковая R_y реакции, обусловленные сдвигами в контакте, определяются касательными напряжениями τ_x и τ_y , с учетом ограничений по сцеплению.

Сила сопротивления качению $R_{\text{ф.з.сл}}$, обусловленная образованием следа колеи шириной $b_{\text{сл}}$, определяется аналогично силе сопротивления $R_{\text{ф.з}} = R_{\text{ф.з.к}}$ на образование колеи шириной b_k (вместо $b_{\text{к.п.мах}}$ устанавливается значение $b_{\text{сл}}$).

Представлены результаты расчета параметров криволинейного движения шины 1300х530-533 ($P_z = 40$ кН, $p_w = 0,05$ МПа) по песку пылеватому рыхлому толщиной 0,5 м с различными значениями углов увода δ и радиусами поворота $R_{\text{пк.0}}$.

Последовательные проходы при криволинейной траектории, рис. 13.

При деформации грунта меньше глубины колеи от предыдущего прохода $h_{\text{г0},i} < h_{\text{г0},i-1}$, рис. 13, б, КД взаимодействует только с недеформированным грунтом, образуя дополнительную колею в области ($R_{\text{сл.в.}i} \dots R_{\text{сл.в.}i-1}$), рис. 13, а. Ширина следа в недеформированной области грунта $b_{\text{сл.}i,0} = R_{\text{сл.в.}i-1} - R_{\text{сл.в.}i}$. Где радиусы: $R_{\text{сл.в.}i-1}$ — минимальный внутренний от следа предыдущего КД; $R_{\text{сл.в.}i}$ — внутренний следа i -го КД. Поверхность контакта имеет сложную форму, длины и ширина передней и задней частей контакта переменны и зависят от многих параметров.

При $h_{\text{г0},i} > h_{\text{г0},i-1}$, рис. 13, в, КД взаимодействует с недеформированным грунтом в отмеченной ранее области ($R_{\text{сл.в.}i-1} \dots R_{\text{сл.в.}i}$) и с ранее деформированным грунтом, область ($R_{\text{сл.в.}i} \dots R_{\text{сл.н.}i}$), рис. 13, а. Ширина следа в ранее деформированной области грунта $b_{\text{сл.}i} = R_{\text{сл.н.}i} - R_{\text{сл.в.}i}$. Радиус наружный следа i -го КД $R_{\text{сл.н.}i}$ определяется с учетом заглубления $h_{\text{г.}i}$ относительно предва-

нительно деформированной поверхности.

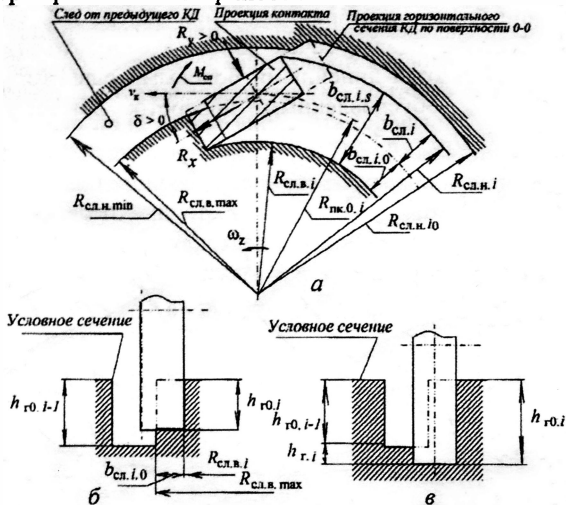


Рис. 13

В обоих случаях при определенных параметрах возможна деформация (боковой сдвиг) грунта задней частью КД радиусом окружности $R_{\text{слн},i,0}$.

Усложняется задача по определению параметров качения последующих КД при больших значениях угла увода δ .

Вводится допущение, что для обеих областей контакта продольный профиль передней зоны контакта описывается уравнением эллипса с точкой начала контакта $a_{r,0}$ на недеформированной поверхности грунта.

Элементарные нормальные p_{zi} , касательные τ_x и τ_y напряжения определяются, с учетом ограничений по сцеплению, аналогично качению КД при первом проходе.

Представлены уравнения, необходимые для расчетов при произвольном угле увода δ .

Разработанные методики расчета параметров прямолинейного и криволинейного движения КД по твердым и деформируемым опорным поверхностям позволяют выбрать геометрические, нагрузочные и эксплуатационные параметры КД, обеспечивающего эффективное выполнение поставленных задач при движении по местности.

Глава 3. Взаимодействие колесного транспортного средства с деформируемой опорной поверхностью

Вводятся допущения об идеальности силовой установки, трансмиссии, системы поддрессирования и рулевого управления, т. е. считается, что они обеспечивают необходимые нам характеристики для преодоления внешних сопротивлений и возмущений.

Прямолинейное движение КТС по деформируемой ОП [8, 9, 10, 14, 15, 16, 17], рис. 14.

При расчетах и на схеме в качестве продольной реакции в контакте представлена $R_{x,усл}$ – условная продольная реакция в контакте КД и ДОП – продольная реакция за вычетом сил сопротивления качению на деформации грунта, реально обеспечивающая создание продольной силы P_x на оси КД и продольное ускорение массы КД.

В качестве основных параметров, определяющих положение КТС по отношению к ДОП, принято: $z_{баз}$ – базовое расстояние от базовой т. $O_{тс}$ над 1-й осью до БГОП “ $O_r - O_r$ ”; $h_{r0,i}$ – полная вертикальная деформация грунта после прохода i -го КД; $z_{к0,i}$ – расстояние от базовой горизонтали корпуса до поверхности контакта КД и ДОП при движении КТС.

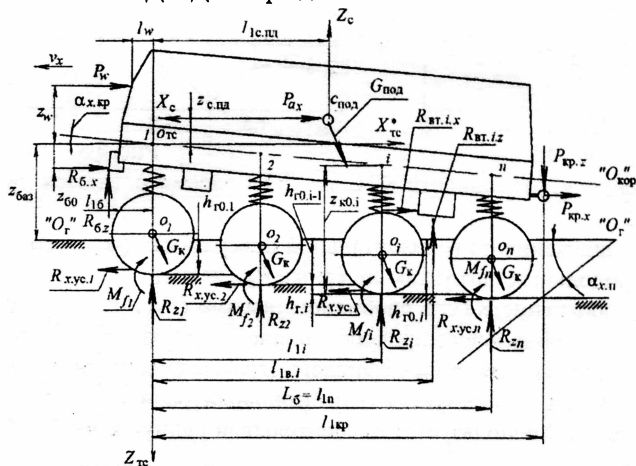


Рис. 14

Система уравнений равновесия сил по осям X_c и Z_c , системы координат $X_c O_c Z_c$ (т. O_c совпадает с т. $c_{под}$, а ось X_c параллельна “ $O_r - O_r$ ”), и моментов сил относительно точки контакта КД 1-й оси для КТС с числом осей $n_{ос}$ и выступов $n_{выс}$ учитывает все представленные на рис. 14 силы и реакции.

Нормальные реакции R_{zi} определяются суммарной деформацией системы “оси” (шины КД и УЭП): $h_{с0,i} = z_{с0,i} + r_c - z_{к0,i}$; $z_{к0,i} = z_{баз} - l_{1i} \operatorname{tg}(\alpha_{х,кр}) + h_{r0,i}$.

Решение поставленной задачи заключается в определении параметров взаимодействия отдельных колесных движителей с опорной поверхностью при заданных значениях P_{zi} , ω_{ki} , M_{ki} и удовлетворении уравнений равновесия КТС.

При заданной нормальной нагрузке $P_{zi,z}$ значения h_{zi} , h_{ri} , R_{xi} определяются радиусом r_{ki} или относительным радиусом качения $r_{ki} = r_{ki}/r_c$ колесного движителя (аргумент).

В зависимости от законов управления силовыми потоками в трансмис-

син, значения заданных угловых скоростей $\omega_{ki,z}$, крутящих моментов $M_{ki,z}$, мощностей $N_{ki,z}$, скольжений $s_{6ki,z}$ могут быть различными, причем один из этих параметров задается, а остальные определяются процессом взаимодействия КД с опорной поверхностью.

При линейной зависимости $R_{xi}(r_{ki})$ решение достаточно просто.

При больших нелинейностях, обусловленных скольжением КД по опорной поверхности, решение значительно усложняется, особенно при наличии пиковых значений R_{xi} в диапазоне $1,5 \leq r_{ki}^* < 0$, рис. 15. Задача решается методом последовательных приближений.

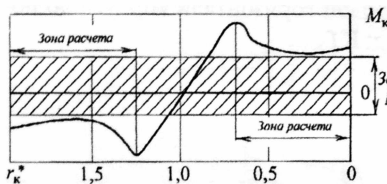


Рис. 15

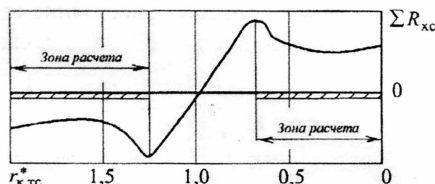


Рис. 16

При оценке эффективности КТС на ДОП рассматриваются два направления:

первое – движение по горизонтальной поверхности ($\alpha_{х,п} = \text{const} = 0$) при различных продольных нагрузках на крюке $P_{кр,х} = \text{var}$;

второе – движение КТС в свободном режиме ($P_{кр,х} = 0$) по ДОП с различными углами продольного профиля опорной поверхности ($\alpha_{х,п} = \text{var}$).

В качестве аргумента, определяющего тяговые способности i -го КД (или КТС) при расчетах используется относительный радиус качения КД $r_{k,i}^* = r_{k,i}/r_c$, для всего КТС используется относительный радиус качения КТС $r_{k,тс}^* = r_{k,тс}/r_c$.

При расчетах по первому направлению определяются параметры движения КТС в заданном диапазоне изменения относительного радиуса качения КТС ($r_{k,тс,макс}^* \leq r_{k,тс}^* \leq r_{k,тс,мин}^*$) с заданным шагом $\Delta r_{k,тс}^*$. При расчетах по второму направлению изменяя значение $r_{k,тс}^*$ добиваемся выполнения условия $P_{кр,х} = 0$ ($\Sigma R_{хс} = 0$), при этом значительно возрастает время счета, рис. 16.

Для оценки параметров опорной проходимости КТС определяются суммарные значения: $M_{тс}$ – крутящего момента; $N_{тс}$ – мощности; $P_{z,тс}$ – нормальной нагрузки; $f_{N,тс}$ – коэффициента подведенной мощности; $P_{f,тс}$ – силы сопротивления движению, и средние коэффициенты: $K_{т,тс}$ – свободной силы тяги; $f_{N,тс}$ – мощности сопротивлений; $s_{6,тс}$ – продольного скольжения.

Рассмотрен вопрос о правомочности переноса результатов экспериментальных данных, полученных на горизонтальной поверхности, на реальное движение КТС по местности с $\alpha_{х,п} = \text{var}$ (сравнение двух направлений при оценке эффективности КТС на ДОП) [10].

Приемлемая точность расчетной модели подтверждена сравнением с экспериментальными данными [15, 16, 17].

По изменению коэффициента продольной силы $K_{т.тс}$ от коэффициента непосредственного продольного скольжения $s_{б,тс}$ для Урал-4320, ЗИЛ-131, ГАЗ-66 на весенней размокшей пахоте, песке сухом сыпучем, снежной целине, рис. 17.

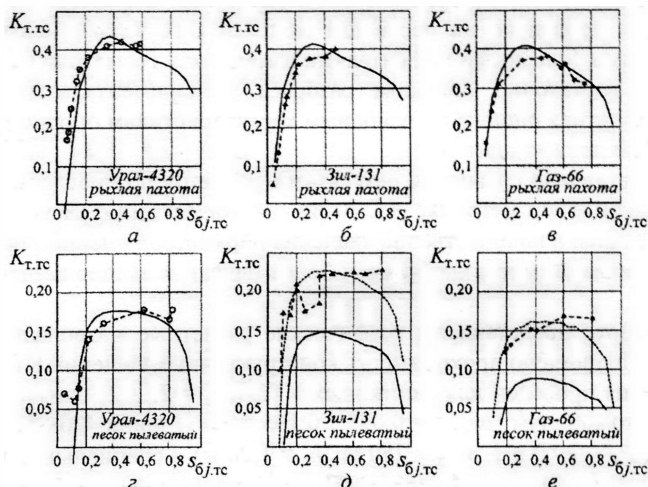


Рис. 17

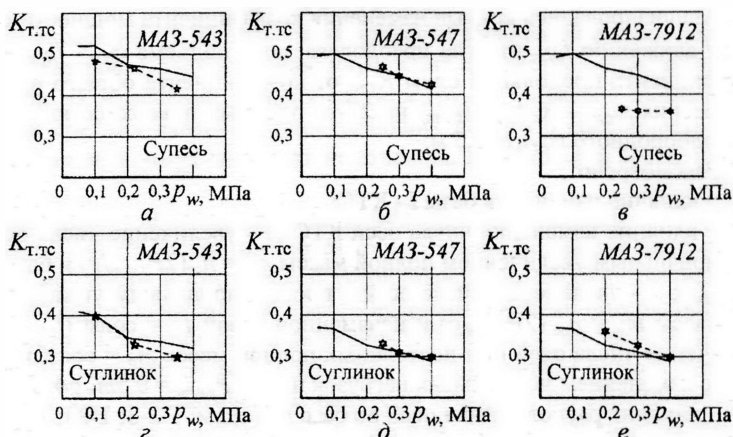


Рис. 18

Для 16-ти многоцелевых автомобилей Урал, Камаз, БАЗ различной массы ($P_{zi} = 20 \dots 45$ кН) и осности ($n_{ос} = 2 \dots 4$) с нормальными средними давлениями колесного движителя ТС $p_{z,ср.тс} = 0,095 \dots 0,195$ МПа сравнение проведено на размокшей пахоте, снежной целине песке сухом сыпучем в различных состояниях по максимальным значениям коэффициента продольной силы $K_{т.тс, \max}(p_w)$. Аналогичное сравнение проведено для большегрузных КТС

МАЗ ($P_{zi} = 50...75$ кН, $n_{oc} = 4...7$, $p_{z,ср.тс} = 0,141...0,327$ МПа) сравнение проведено по $K_{т.тс.макс}(p_w)$ на супеси и суглинке, рис. 18.

При малых нормальных нагрузках $P_{zi} = 300...150$ Н ($p_{z,ср.тс} = 0,007...0,03$ МПа) сравнение экспериментальных и расчетных параметров опорной проходимости проведено на песке для моделей СТС (8x8 и 6x6) с металлоэластичными колесными движителями изменяемой геометрии (МЭКДИГ).

При достаточно большом разбросе экспериментальных параметров грунта расчетная ошибка по основным характеристикам опорной проходимости КТС не превосходит 18 %.

Представлено сравнение результатов расчетов по предлагаемой методике и близкой к ней методике Я.С.Агейкина. Качественно расчетные параметры идентичны, а количественно значения параметров опорной проходимости по предлагаемой методике ниже и более близки к экспериментальным данным.

В работе представлены графические расчетные материалы по анализу влияния на опорную проходимость конструктивных решений КТС.

Анализ проведен для фиктивных КТС ($n_{oc} = 2...12$) близких к многоцелевым автомобилям ($p_{z,ср.тс} = 0,095...0,195$ МПа – шина 425/85R 21 мод. Кама-1260; $P_{zi} \approx 29,0$ кН, $m_{н.п} = 250$ кг, $h_c = 1,96$ м) и специальным большегрузным шасси ($p_{z,ср.тс} = 0,14...0,35$ МПа – шина 1600x600-685 мод. В-178; $P_{zi} = 72,2$ кН, $m_{н.п} = 720$ кг, $h_c = 2,6$ м).

Анализировались кривые изменения коэффициента мощности сопротивления движению $f_{N,тс}$ от угла преодолеваемого подъема $\alpha_{х.п} - f_{N,тс} = f(\alpha_{х.п})$ и коэффициента продольной силы $K_{т.тс.}$ от коэффициента общего продольного скольжения $s_{бо.тс} - K_{т.тс.макс}(s_{бо.тс})$ на 27-ти опорных поверхностях с толщиной слоя однородного грунта 0,5 м.

Рассмотрено:

- влияние изменения базы L_6 КТС;
- влияние изменения числа осей КТС (1 - увеличение числа осей с пропорциональным увеличением полной массы $m_n = n_{oc}(2P_{z,ном}/g)$ и базы $L_6 = (n_{oc} - 1)l_{i,i+1}$; 2 - увеличение числа осей с пропорциональным увеличением полной массы $m_n = n_{oc}(2P_{z,ном}/g)$ и неизменной базой $L_6 = \text{const}$ ($l_{i,i+1} = \text{var}$); 3 - увеличение числа осей при постоянных полной массе $m_n = \text{const}$ и базе $L_6 = \text{const}$ с изменением нормальных нагрузок на КД $P_{z,ном} = 0,5m_n g/n_{oc}$;
- влияние расположения осей по базе для схем: 1-2-3; 1-23; 12-3; 1-2-3-4; 12-34; 1-234;
- влияние распределения нормальных реакций по осям (равномерное расположение осей по базе и смещение центра масс относительно середины базы);
- влияние габаритов и числа КД при заданных массе и базе КТС ($m_n = 29440$ кг и $L_6 = 6,6$ м, КТС – шина: 4 x 4 - 1600x600-685; 8 x 8 - 1300x530-533; 8 x 8 - 425/85R 21; 10 x 10 - 425/85R 21; 12 x 12 - 12,00-20; 12 x 12 - 14,00-20; 12 x 12 - 1200x400-533; КТС 16x16 $m_n = 117760$ кг с одинарной (шина –

1600х600-685) и двоянной (шина – 1300х530-533) ошиновкой);

– влияние внутреннего давления воздуха в шинах (при изменении: числа осей, размеров колесного движителя, нормальных нагрузок, типа опорной поверхности);

– влияние законов распределения силового потока по КД (постоянство на КД: $\omega_k = \text{const}$; $M_k = \text{const}$; $N_k = \text{const}$; $s_{б.к} = \text{const}$; $s_{б.к} = \text{const}$, рис. 19, шина 425/R80 21 с внутренним давлением воздуха 0,1 МПа на сухом рыхлом песке).

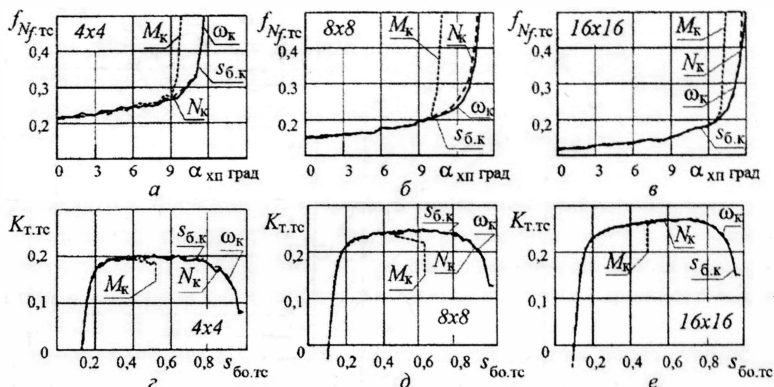


Рис. 19

Рамки автореферата не позволяют привести выводы о влиянии перечисленных параметров. Количественное улучшение параметров опорной проходимости при их изменении зависит от типа грунта, размеров движителя и нормальных средних давлений, определяющих несущую способность грунтового основания, и могут достигать нескольких, десятков или сотен процентов.

Криволинейное движение КТС по деформируемой ОП [18].

В данной работе рассматриваются только задачи по оценке маневренности, затрат мощности и статической устойчивости по опрокидыванию КТС при криволинейном движении по деформируемым опорным поверхностям.

Параметры криволинейного движения КТС с колесной базой L_6 и колеи B_k , рис. 20, в первую очередь определяются положением полюса рулевого управления т. O_k , кинематическим радиусом поворота R_k , схемой рулевого управления – цифровым рядом осей, в котором цифры отличные от «0» определяют оси с управляемыми КД.

В работе представлены уравнения движения КТС в плоскости опорной поверхности и поперечной плоскости.

Решение системы уравнений осложняется тем, что неизвестны нормальные $R_{z,ij}$, продольные $P_{x,ij}$ и боковые $P_{y,ij}$ реакции на КД, деформации шин $h_{z,ij}$ и грунта $h_{г0,ij}$, моменты сопротивления качению M_{fij} , которые являются функциями нормальных реакций $R_{z,ij}$.

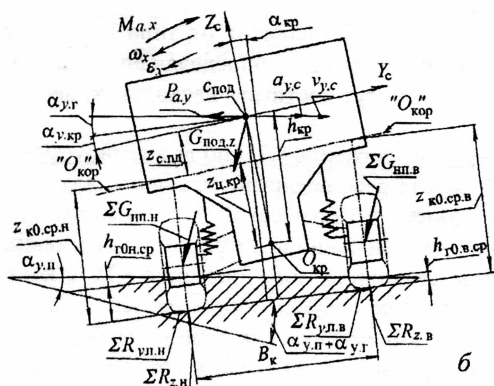
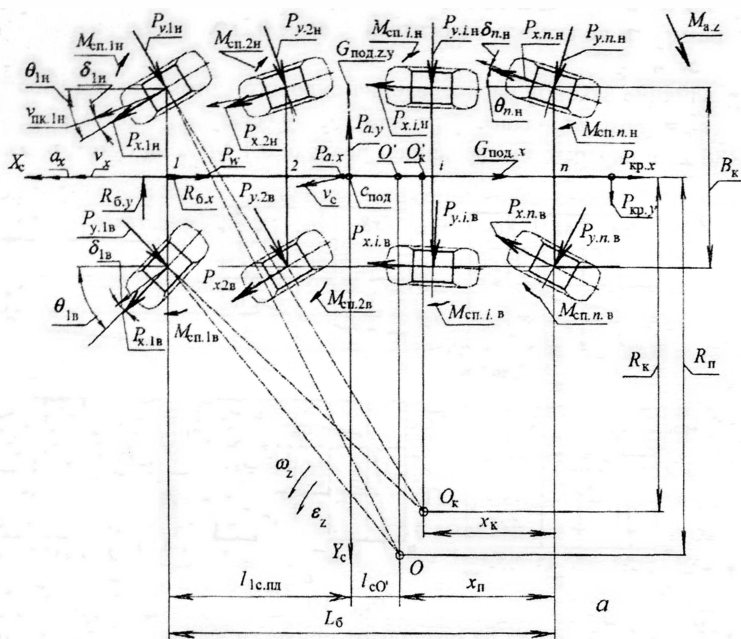


Рис. 20

При решении задачи по определению $R_{z,ij}$, $h_{z,ij}$, $h_{r0,ij}$ и M_{fj} предлагается использовать метод последовательных приближений, состоящий из нескольких шагов.

При заданных скорости $v_{x,m}$ и угле поворота θ_{1b} внутреннего КД 1-ой оси ($j = 2$), определяются углы поворота остальных КД θ_{ij} , кинематический радиус поворота R_k .

На первом шаге расчета определяем R_{xij} , введя допущения: $R_n = R_k$; $x_n = x_k$; $h_{r0,ij} = 0$; $P_{x,ij} = 0$; $M_{fij} = f(R_{z,ном})$.

Последующие шаги необходимы для определения и уточнения деформаций грунта при действии вертикальной, боковой и продольной нагрузок на КД.

Для приближенной оценки деформаций грунта на этом этапе вводится допущение о равномерном распределении боковых реакций по борту, а боковые силы $P_{y,δi}$, воспринимаемые КД бортов пропорциональны нормальным нагрузкам по бортам:

Вводится допущение, что $s_{60,ij}$ для всех КД одинаково $s_{60,ij} = \text{const} = 0,15$, т.к. максимальные продольные реакции $R_{x,ij}$ на КД при отсутствии интенсивного фрезерования грунта, определяющего максимальные деформации грунта, достигаются при коэффициенте общего продольного скольжения $s_{60,ij} \approx 0,15$.

Определяются значения угла крена в поперечной плоскости $\alpha_{y,кр}$, угла крена в продольной плоскости $\alpha_{x,кр}$, базового расстояния $z_{баз}$ от т. $O_{тс}$ над передним наружным КД до БГОП « $O_r - O_r$ », обеспечивающие выполнение равновесия сил и моментов сил относительно точки контакта наружного КД 1-й оси в продольно-вертикальной плоскости.

Нормальные реакции КД $R_{x,ij}$ по бортам определяются через суммарные деформации систем "оси" (шины КД и УЭП): $h_{co,ij} = h_x(R_{xij}) + h_{y3n}(R_{xij})$.

На втором шаге при известных R_{xij} , $P_{y,ij}$ и одинаковых коэффициентах продольного скольжения $s_{60,ij} = \text{const}$ определяем параметры взаимодействия всех КД и уточняем значения R_{xij} с учетом деформации грунта.

На третьем и четвертом шагах проводим операции, аналогичные второму шагу с учетом распределения силового потока по КД.

Число шагов, зависит от деформируемости грунта. Для наиболее деформируемых грунтов увеличение числа шагов более 4-х для дальнейшего уточнения деформаций грунта и КД, нормальных нагрузок R_{xij} мало оправдано, т.к. их изменение не превышает 0,01 %. На изменение R_{xij} , как показывают расчеты, незначительно сказывается и изменение положения действительного мгновенного центра поворота КТС. Поэтому при дальнейших расчетах значения R_{xij} можно принять неизменными и не возвращаться к их корректировке.

Дальнейшее решение сводится к удовлетворению уравнений равновесия, с определением действительных значений деформаций, сил и моментов на каждом КД. Возможна потеря подвижности по продольному буксованию или скольжению, потеря устойчивости по опрокидыванию, управляемости по боковому скольжению.

При криволинейном движении КТС, траектории КД различны. Отличаются линейные скорости проекций на плоскости вращения ободов $v_{xk,ij}$, деформации шины h_{zj} и грунта $h_{r0,ij}$, $h_{r,ij}$, ширина следа колеи, затраты энергии на передвижение. Наибольшую сложность вызывает определение параметров

контакта и ширины следа колеи, в которую попадают зоны недеформированного и деформированного грунта от предыдущих проходов КД, рис. 13. В работе представлены возможные расчетные схемы качения последующих КД и уравнения для определения необходимых для дальнейшего расчета параметров.

Учет распределения силового потока по КД проводится по алгоритму аналогичному, рассмотренному при исследовании прямолинейного движения.

Особенностью криволинейного движения КТС является более существенное перераспределение силовых и кинематических параметров по КД, что усложняет и увеличивает время расчета.

Разработаны методика и программа расчета на ЭВМ параметров криволинейного движения многоосных КТС с различными законами распределения силового потока по КД, схемами рулевого управления и произвольными углами наклона деформируемой опорной поверхности.

Проведено сравнение расчетных и экспериментальных характеристик криволинейного движения КТС и влияния на них параметров опорной поверхности и скорости движения. Сравнение проведено для: Урал-375Д ($m_n = 13,2$ т, $p_w = 0,1$ МПа – сухой песок, пахота, снежная целина); экспериментального автомобиля 8х8 ($m_n = 25,9$ т, 12-00, шина 1300х530-533, $p_w = 0,1$ МПа – рыхлая пахота $H_r = 0,3$ м); автомобили «Камаз-4350» (4х4); «Камаз-5350» (6х6); «Камаз-6350» (8х8) на сухом сыпучем песке, рыхлой пахоте, снежной целине.

Анализ представленных материалов позволяет сделать вывод о достаточно приемлемом (при большом количестве принятых допущений) количественном совпадении расчетных и экспериментальных данных (0...18 %).

Доказано большое влияние на параметры криволинейного движения КТС толщины однородного слоя грунта H_r и скорости движения v_k .

В работе представлен анализ влияния законов распределения силового потока по КД на параметры криволинейного движения КТС по ТОП и ДОП при различных заглублениях грунтозацепов и деформируемости грунта.

На основе большого объема расчетного материала с большим диапазоном изменения конструктивных и эксплуатационных параметров, проведен анализ влияния: отношения базы и колеи; схемы поворота и расположения осей по базе; числа осей КТС (увеличение числа осей и соответственно полной массы КТС при постоянной базе $L_6 = \text{const}$ и колее $B_k = \text{const}$; увеличение числа осей с увеличением полной массы с сохранением одинакового расстояния между осями $L_{ij} = \text{const}$); положения центра масс; полной массы КТС и параметров КД.

Созданные методики и программы расчета параметров опорной проходимости КТС позволяют производить оценку их подвижности на местности и выбирать оптимальные конструктивные и эксплуатационные параметры для эффективного выполнения поставленных перед ними задач.

Глава 4. Оценка эффективности взаимодействия колесного транспортного средства с деформируемой опорной поверхностью

Для оценки эффективности КТС на маршруте движения без учета эксплуатационных затрат используется абсолютный показатель производительности (эффективности), т км²/(л ч): $P_{\text{пр}} = m_{\text{гр}} v_{\text{ср}} / Q_s$, где $m_{\text{гр}}$ – масса груза, $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость, Q_s – путевой расход топлива.

В качестве критериев оценки эффективности движения КТС на маршрутах движения предлагается использовать средние значения скорости $v_{\text{ср}}$, путевого расхода топлива $Q_{s, \text{ср}}$ и коэффициента подведенной к колесному движителю (необходимой для движения) мощности $f_{N, \text{ср}}$.

Средние значения параметров на маршруте, например $v_{\text{ср}, m}$, с числом участков p определяется как средневзвешенное значение частных скоростей $v_{\text{ср}, i}$ на элементарных участках s_i в зависимости от известного распределения частных участков пути s_i по вероятности их прохождения по времени или пути.

В качестве безразмерного коэффициента, определяющего эффективность колесного движителя, используется коэффициент затрачиваемой (подведенной) мощности: $f_{N, \text{тс}} = N_{\text{кд}, \text{тс}} / (m_{\text{тс}} g v_{\text{км}})$.

Для оценки эффективности всего КТС, с учетом внутренних потерь, предлагается использовать коэффициент полезной мощности силовой установки: $f_{N, \text{сy}} = N_{\text{дв}} / (m_{\text{тс}} g v_{\text{км}})$, где $N_{\text{дв}}$ – мощность силовой установки, расходуемой на движение КТС массой $m_{\text{тс}}$ со скоростью $v_{\text{км}}$. Коэффициент $f_{N, \text{сy}}$ дает более полное представление об эффективности КТС по совершению полезной работы, учитывает эффективность трансмиссии и колесного движителя. Он незаменим при анализе алгоритмов распределения силового потока, когда достижение максимальной эффективности КД может войти в противоречие с минимумом потерь в системе распределения силового потока в трансмиссии.

В работе представлена методика определения параметров движения на заданном элементарном участке маршрута и на переходных режимах при изменении сопротивлений и скорости движения.

Для определения основных параметров (скорости и путевого расхода) на маршрутах движения предлагается последовательность: создание матриц параметров движения КТС по различным опорным поверхностям с определенным шагом изменения параметров грунта, углов наклона местности, кривизны и полосы движения, скорости движения - выборка необходимых данных - определение окончательных интегральных характеристик.

Предварительное создание матриц параметров движения на отдельных опорных поверхностях, скоростях, радиусах поворота и изменяемых параметрах самого КТС (например, давление воздуха в шинах, схемы распределения силового потока и рулевого управления) позволяет решить четыре задачи:

- сгладить (усреднить) данные, полученные расчетным путем с предварительно заданной точностью при изменении угла поворота задающего КД

(радиуса поворота);

- значительно сократить определение искомых параметров движения на различных маршрутах;

- упростить выбор изменяемых параметров КТС, обеспечивающих наилучшие выходные характеристики (максимальная скорость и минимальные энергозатраты):

- определить (наметить) пути повышения эффективности КТС за счет совершенствования его основных узлов и агрегатов.

В работе, в качестве примера, представлены в графическом виде матрицы основных выходных характеристик ($f_{N, \text{пол}}$ и $N_{\text{тс, пол}}$) многоосного шасси МАЗ-7922 (16х16) полной массой 120 т при движении на опорных поверхностях с одним типом грунта (сухой песок $H_r = 0,1; 0,2; 0,5; 1,5$ и $3,0$ м), $p_w = 0,2$ и $0,4$ МПа и $v_{\text{хм}} = 1; 3; 5; 7$ и 9 м/с. В качестве аргументов используются $\theta_{1в}$ и $R_{п.н.}$.

Имея расчетные матрицы характеристик движения КТС на различных опорных поверхностях можно определить параметры движения на любом выбранном маршруте движения, выбрать оптимальный маршрут и изменяемые параметры КТС.

ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований установлено, что повышение эффективности колесных транспортных средств на этапе проектирования и в эксплуатации может быть достигнуто прогнозированием показателей опорной проходимости на основе разработанной совокупности теоретических методов оценки:

- деформируемости грунтов различными деформаторами при произвольном нагружении;

- качения эластичного колесного движителя по прямолинейным и криволинейным траекториям на твердой и деформируемой опорных поверхностях;

- характеристик прямолинейного и криволинейного движения многоосного колесного транспортного средства по деформируемым опорным поверхностям.

2. Получены аналитические зависимости изменения основных физико-механических параметров деформируемых опорных поверхностей (песков, супесей, суглинков, глин, лессов, торфяных залежей и снега), упрощающие и расширяющие возможности оценки опорной проходимости КТС на маршруте движения.

3. На базе фундаментальных работ механики грунтов создана новая методика расчета нормальных и горизонтальных деформаций грунта при различных видах нагружения, параметрах деформаторов и грунта, учитывающая процессы уплотнения и сдвигов частиц дисперсных тел и позволяющая описывать процессы деформаций под движителями транспортных средств в

нормальном, продольном и боковом направлениях.

4. Разработана новая методика расчета параметров качения эластичного КД по твердой опорной поверхности при наличии непосредственного скольжения с учетом распределения нормальных и касательных напряжений по поверхности контакта. Путем сравнения расчетных и экспериментальных данных установлено качественное и близкое количественное (0...12 %) совпадение основных выходных параметров качения КД.

В отличие от известных методик, описывающих изменение продольной реакции R_x эмпирическими функциями, в разработанной методике R_x определяется расчетным путем при известных параметрах трения $\mu_{пб}$ и $\mu_{ск}$ беговой дорожки протектора и опорной поверхности.

Методика позволяет определять и анализировать тяговые и экономические характеристики КД при изменении его геометрических и жесткостных характеристик, нагрузочных режимов и параметров опорной поверхности.

5. Разработана новая методика расчета параметров криволинейного качения эластичного КД по твердой опорной поверхности.

Установлено, что при отсутствии скольжения, помимо параметров, необходимых для расчета прямолинейного движения (геометрических и элементарных нагрузочных $h_z = f(P_z, p_w)$; $f_{шв} = f(P_z, p_w)$), достаточно иметь значения боковой деформации $h_y = f(P_z, p_w, P_y)$. При наличии скольжения необходимо дополнительно знать параметры кривой скольжения в боковом ($c_{о,у}$; $\mu_{ск,у}$; $j_{тy}$; $\mu_{п,у}$) и продольном ($c_{о,х}$; $\mu_{ск,х}$; $\mu_{п,х}$; $j_{тх}$) направлениях.

Получены основные зависимости и методики определения параметров криволинейного качения эластичного КД по ТОП с учетом силового и кинематического увода, наличия зон продольного, бокового и углового скольжения.

Достоверность предлагаемого подхода подтверждена качественной идентичностью расчетных и экспериментальных данных изменения основных выходных параметров и количественной близостью (погрешность 0...7 %) коэффициентов сопротивления бокового увода в линейной зоне.

6. Разработана методика расчета параметров движения эластичного колесного движителя по деформируемой опорной поверхности при прямолинейном движении с учетом физико-механических характеристик грунта, толщины деформируемого слоя грунта, экскавации и обвала грунта в колею, числа проходов по колее. Особенностью методики является новый подход к формированию напряжений в зоне контакта и определения деформаций грунта.

Доказана достоверность и точность методики расчета для различных КД и деформируемых опорных поверхностей. Погрешность расчета зависит от режима силового нагружения и колеблется в диапазоне 0...21%.

На основе методики проведен анализ влияния геометрических, жесткостных и эксплуатационных параметров КД, а также параметров беговой дорожки (высота, шаг, насыщенность грунтозацепов) на эксплуатационные ха-

рактеристики при движении по ДОП, позволяющий в зависимости от назначения выбирать оптимальный по тягово-экономическим характеристикам КД.

7. Разработана методика расчета параметров криволинейного движения КД по деформируемой опорной поверхности с учетом силового и кинематического увода КД, его скольжения в продольном, боковом и угловом направлениях, бокового отпора грунта. Методика базируется на новом подходе к формированию напряжений в контакте и деформаций грунта при произвольном нагружении.

Впервые разработана методика расчета криволинейного движения КД по предварительно деформированному грунту от предыдущих проходов КД при не совпадении их траекторий движения.

8. Созданы методики и программы расчета на ЭВМ параметров прямолинейного и криволинейного движения многоосных КТС по деформируемым опорным поверхностям при наличии скольжения, фрезерования и обвала грунта в зоне контакта, учитывающие уклоны и параметры деформируемости опорной поверхности, основные конструктивные параметры многоосного КТС и колесного движителя, скорость движения, кривизну траектории, движение последующих КД по произвольной колее. Особенностью методики является учет большого числа нелинейностей при определении реакций в зоне контакта отдельных колесных движителей.

9. Доказана достоверность и приемлемая точность предлагаемых методик расчета параметров движения КТС по ДОП в широком диапазоне изменения нормальных нагрузок (давлений) для КТС различной грузоподъемности при прямолинейном (ПРД) и криволинейном (КРД) движении: сверхнизкой $P_{zi} < 0,3$ кН ($p_{z,cr,tc} = 0,007...0,03$ МПа) - ПРД, средней (многоцелевые автомобили) $P_{zi} < 50$ кН ($p_{z,cr,tc} = 0,095...0,195$ МПа) - ПРД и КРД, высокой (специальные шасси) $P_{zi} = 50...75$ кН ($p_{z,cr,tc} = 0,141...0,327$ МПа) - ПРД.

При большом количестве принятых допущений количественная погрешность расчетных и экспериментальных данных составляет 0...45 %.

10. На базе методик проведен анализ влияния основных конструктивных и эксплуатационных параметров КТС на параметры опорной проходимости при прямолинейном и криволинейном движении. Определены пути выбора оптимальных компоновочных (базы, отношения базы и колеи, числа осей, расположения осей по базе, габаритов и числа КД при заданных массе и базе КТС, схем поворота и распределения силового потока) и эксплуатационных решений (положения центра масс, внутреннего давления воздуха в шинах, скорости и радиуса кривизны движения).

11. Разработана методика расчета параметров эффективности КТС на маршруте движения использующая в качестве критериев средние значения скорости v_{cp} , путевого расхода топлива $Q_{z,cr}$ и коэффициента подведенной к колесному движителю (необходимой для движения) мощности $f_{N,cr}$.

Для оценки эффективности всего КТС, с учетом внутренних потерь,

предлагается использовать коэффициент полезной мощности силовой установки.

12. Предлагаемое в работе предварительное создание матриц параметров движения КТС по различным опорным поверхностям возможного маршрута позволяет:

- значительно сократить определение искомых параметров движения на различных маршрутах;

- упростить выбор изменяемых параметров КТС, обеспечивающих наилучшие выходные характеристики (максимальная скорость и минимальные энергозатраты);

- определить (наметить) пути повышения эффективности КТС за счет совершенствования его основных узлов и агрегатов.

13. Установлено, что оптимальные конструктивные и изменяемые в процессе эксплуатации параметры КТС (давление воздуха в шинах, схемы распределения силового потока и управления) существенно зависят от маршрутов движения, полной массы и поставленных при выполнении конкретных задач. Разработанные методики позволяют решить комплекс возможных задач связанных с опорной проходимостью КТС на местности.

Публикации

Основные положения диссертации отражены в 29 печатных и 29 рукописных работах. Из них в двух учебных пособиях и трех авторских свидетельствах.

1. Ларин В.В. Приближенная оценка тягово-сцепных свойств металло-эластичного колесного движителя с изменяющейся геометрией // Изв. вузов. Машиностроение. - 1977. - № 10. - С. 122 - 125.

2. Ларин В.В. Экспериментальное исследование тягово-сцепных свойств металло-эластичного колесного движителя с изменяемой геометрией // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. - 1979. - Вып. 288. - С. 53 - 59.

3. Ларин В.В. Аналитические зависимости для расчета характеристик металло-эластичного колесного движителя изменяемой геометрии // Изв. вузов. Машиностроение. - 1985. - № 7. - С. 72 - 76.

4. Ларин В.В. Зависимости изменения основных физико-механических показателей почвенно-грунтовых поверхностей // Изв. вузов. Машиностроение. - 1987. - № 3. - С. 82 - 85.

5. Ларин В.В. Зависимости вертикальной осадки штампа-двигателя от нагрузки // Изв. вузов. Машиностроение. - 1987. - № 1. - С. 51 - 56.

6. Ларин В.В. Математические зависимости нормальной осадки и сдвига грунта под движителем транспортного средства // Оптимальное взаимодействие: Доклады Международного симпозиума по термомеханике. – Суздаль, 1992. - С. 9 - 15.

7. Ларин В.В. Прикладная теория систем водитель-машина-среда. Методические указания к лабораторным работам. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.

Баумана, 1997. - 38 с.

8. Ларин В.В. Оценка тягово-экономических характеристик транспортных средств при движении по деформируемым опорным поверхностям и местности // Изв. вузов. Машиностроение. - 1998. - № 10-12. - С. 75 - 84.

9. Ларин В.В. Влияние параметров колесного шасси на показатели его эффективности // 170 лет МГТУ им. Н.Э. Баумана: Доклады международной научно-технической конференции. - М., 2000. - С - 173.

10. Ларин В.В. Оценочные показатели тягово-экономической эффективности транспортных средств на местности и их сравнение при движении на подъеме и горизонтальной поверхности // Автомобильная промышленность. - 2001. - № 9. - С. 9 - 12.

11. Ларин В.В. Деформация грунтового основания под движителями транспортных средств // Оборонная техника. - 2003. - № 1 - 2. - С. 53 - 60.

12. Ларин В.В. Модель качения колесного движителя по твердой и деформируемой опорным поверхностям // Сборник трудов кафедры колесных машин. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2003. - С. 13 - 17.

13. Ларин В.В. Модель прямолинейного качения колесного движителя // Проблемы шин и резинокордных композитов: Доклады международного 14 симпозиума. - М., 2003. - С. 42 - 51.

14. Ларин В.В. Многоопорное шасси и его проходимость // Автомобильная промышленность. - 2003. - № 9. - С. 10 - 12.

15. Ларин В.В. Математическая модель оценки и прогнозирования параметров опорной проходимости многоосных колесных машин // Проектирование колесных машин: Доклады Международного симпозиума. - М., 2005. - С. 70 - 80.

16. Ларин В.В. Математическая модель оценки и прогнозирования параметров опорной проходимости многоосных колесных машин // Образование через науку: Сборник тезисов докладов Международного симпозиума, - М., 2005. - С. 634 - 635.

17. Ларин В.В. Математическая модель оценки и прогнозирования параметров опорной проходимости многоосных колесных машин // Образование через науку: Сборник докладов Международного симпозиума, - М., 2005. - С. 156 - 164.

18. Ларин В.В. Метод расчета параметров криволинейного движения колесного движителя по деформируемой опорной поверхности // Проектирование колесных машин: Материалы международной научно-технической конференции. - М., 2006. - С. 4 - 13.

19. Ларин В.В. Метод расчета параметров криволинейного движения колесного движителя по твердой опорной поверхности // Проектирование колесных машин: Материалы международной научно-технической конференции. - М., 2006. - С. 14 - 24.