

На правах рукописи

УДК.629.1.073



ВОЛЬСКАЯ НАТАЛЬЯ СТАНИСЛАВОВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОПОРНО-ТЯГОВЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕСНЫХ МАШИН ПО ЗАДАНЫМ
ДОРОЖНО-ГРУНТОВЫМ УСЛОВИЯМ В РАЙОНАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.05.03. – Колесные и гусеничные машины

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

Москва - 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Московский государственный индустриальный университет (ГОУ МГИУ)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Степанов Алексей Павлович

доктор технических наук, профессор Беляков Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор Ларин Василий Васильевич

Ведущее предприятие: АМО ЗИЛ

Защита состоится « 20 » октября 2008г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.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 « __ » _____ 2008г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Г.И. Гладов



1453

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В работе рассматриваются проблемы, связанные с оценкой эффективности движения транспортных средств высокой проходимости (ТСВП). Эти транспортные средства (ТС) движутся как на местности так и по дорогам общего назначения по прямолинейной и криволинейной траекториям. В зависимости от типа движителя, колесного или гусеничного, решение проблемы оценки проходимости ТС имеет свою специфику. Данное исследование направлено на решение проблем и задач, связанных с общим случаем движения колесных машин (КМ).

Опыт показывает, что изменение конструктивных параметров машины для повышения проходимости приводит к снижению ее эксплуатационных свойств на автомобильных дорогах. Поэтому важно уметь выбирать основные конструктивные параметры КМ: тип трансмиссии, формулу управления, формулу и размеры колесного движителя, характеристики подвески, обеспечивающие необходимую проходимость при движении на местности при минимальном снижении эксплуатационных свойств машины на дорогах.

Влияние конструктивных параметров КМ на проходимость по различным грунтовым поверхностям неоднозначное (существенно различное). Поэтому, чем конкретнее задаются предполагаемые дорожно-грунтовые условия (ДГУ) поверхности движения, тем в большей мере может быть приспособлена к движению в этих условиях разрабатываемая (или выбираемая на рынке) КМ.

К настоящему времени достаточно глубоко исследованы вопросы прямолинейного движения КМ по ровным грунтовым поверхностям. Однако большинство реальных грунтовых поверхностей неровные с непостоянными, как по протяженности так и по времени года, физико-механическими свойствами, а характер движения по ним КМ преимущественно криволинейный.

Процессы взаимодействия КМ с неровной грунтовой поверхностью значительно сложнее, чем с ровной, и они исследованы недостаточно.

В связи с этим актуальным является решение проблемы оценки проходимости КМ по грунтовым поверхностям региона в общем случае, с учетом неоднородности грунта, неровности поверхности и криволинейных траекторий движения.

От точности оценки проходимости и других, связанных с ней, эксплуатационных свойств колесной машины на грунтовых поверхностях зависит эффективность их использования во многих отраслях народного хозяйства и в армии. Поэтому работа является актуальной.

Цель работы: Повышение проходимости многоосных колесных машин при движении по неоднородным, неровным грунтовым поверхностям, с изменяющейся траекторией движения.

Для достижения цели работы сформулированы следующие задачи:

- 1) разработать метод оценки механических свойств грунтовой поверхности предполагаемого района эксплуатации, обеспечивающий расчеты на проходимость на стадии проектирования транспортного средства;

2) разработать методику оценки проходимости многоосной колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности;

3) разработать методику оценки проходимости при криволинейном движении по грунту многоосной колесной машины, позволяющую учитывать любой тип механической трансмиссии;

4) разработать методику оценки эффективности движения транспортного средства высокой проходимости для конкретного района эксплуатации.

Решение поставленных задач должно основываться на едином подходе к оценке физико-механического состояния грунта.

Объект исследований. Полноприводная многоосная колесная машина.

Предмет исследования. Система «трансмиссия – подвеска – движитель – дорога».

Методы исследования. Механика грунтов, прикладная теория автомобиля, теория колебаний, теория вероятностей, теория случайных процессов и статистическая динамика, математическое и физическое моделирование, методы решения систем линейных уравнений, инженерный эксперимент.

Научная новизна:

- разработан новый метод оценки механических свойств грунтовой поверхности предполагаемого района эксплуатации транспортного средства, основанный на использовании физических характеристик грунтов представленных в вероятностной форме; в качестве источников информации используются многолетние наблюдения на метеостанциях, топографические и почвенные карты, результаты натурных экспериментов;

- разработана методика оценки взаимодействия колеса с грунтом, учитывающая скорость движения, действие нормальной, продольной и боковой сил, пригодная для колес со всеми известными типами шин;

- предложен метод оценки взаимодействия многоосного колесного движителя с грунтовой поверхностью с учетом изменения физико-механических свойств грунта в результате прохода колес;

- разработана методика оценки проходимости многоосной колесной машины по деформируемому грунту, отличающаяся от всех ранее предлагаемых, возможностью учета неровности опорной поверхности;

- разработана методика расчета параметров и критериев эффективности криволинейного движения многоосной колесной машины по деформируемому грунту, позволяющая оценивать поворотливость с возможностью изменения основных конструктивных решений: числа ведущих осей и их расстановку по базе, формулу управления, линейных и нелинейных характеристик распределительных механизмов в механической трансмиссии;

- предложен метод вероятностной оценки эффективности движения многоосной колесной машины по эталонному расчетному маршруту, отражающему специфические ДГУ предполагаемого района эксплуатации транспортного средства.

Все эти положения отвечают критериям новизны и выносятся на защиту.

Квалификационная формула работы. В диссертационной работе автором на основании экспериментально-теоретических исследований, предложено решение научно-практической проблемы: расчет опорно-тяговой проходимости многоосных колесных машин при движении по естественным грунтовым поверхностям, отличающимся неоднородностью физико-механических свойств и неровностью поверхности, изменяющейся траекторией движения. Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при выборе оптимальных параметров колесной машины для конкретных ДГУ на стадии проектирования; при выборе модели колесной машины из числа имеющихся на рынке.

Основные положения, выносимые на защиту. 1. Уточненная методика оценки времени действия нагрузки и цикличности нагружения грунта. 2. Разработанный метод оценки механических свойств грунта с помощью статистически обработанных материалов многолетних наблюдений на метеостанциях, агрогидрологических справочников и почвенных карт. 3. Теоретические положения и методы: оценки влияния неровности грунтовой поверхности на показатели проходимости при движении многоосной КМ; оценки эффективности криволинейного движения многоосной КМ на деформируемом грунте, характеристики которого заданы с помощью независимых физико-механических параметров. 4. Математическая модель эталонного расчетного маршрута по оценке эффективности движения КМ. 5. Методика оценки вероятностной средней скорости движения КМ на маршруте, включающем типичные участки дорог с твердым покрытием, грунтовых дорог и местности.

Достоверность результатов подтверждена с помощью оценки адекватности математических моделей взаимодействия эластичного колеса с деформируемым грунтом и результатов расчета показателей проходимости движущегося многоосного полноприводного автомобиля результатам натурного эксперимента. Экспериментальные исследования проводились на колесных машинах УРАЛ-375Д, ЗИЛ-49061, ПЭУ 1Б на суглинистых грунтах полигона НАТИ в Московской области, на песчаных грунтах в пойме реки Оки, на илистых и песчаных грунтах полигона ЗИЛ в Феодосии. Испытания проведены кафедрой «Автомобили и двигатели» с участием автора, представителей ОГК ЗИЛ и ПГО Гидроспецгеологии, обеспечивающих квалифицированную оценку физико-механических параметров грунта.

Практическая ценность.

1. Разработанная методика оценки взаимодействия колесной машины с неровной грунтовой поверхностью является новой ступенью развития науки о проходимости колесных машин.

2. Математические модели прямолинейного и криволинейного движения колесной машины по неровной грунтовой поверхности и полученные количественные значения влияния основных конструктивных параметров шасси на эффективность колесной машины позволяют определять оптимальные параметры ходовой части машины при проектировании и выбирать целесо-

образные рыночные модели колесных машин для использования в конкретных дорожно-грунтовых условиях.

3. Разработанные методики, алгоритмы, математические модели, программное обеспечение, связанные с расчетом проходимости колесных машин, существенно дополняют курсы дисциплин «Теория автомобиля», «Специальные главы теории автомобиля», что позволяет поднять на современный уровень профессиональные знания выпускников вузов по специальности «190201-Автомобиле- и тракторостроение».

Реализация работы. Результаты экспериментально-теоретических исследований по теме диссертации внедрены при разработке ТСВП в ОГК СТ АМО ЗИЛ, в КЭИР АМО ЗИЛ при разработке автомобилей ЗИЛ-4334А1, ЗИЛ-4327А1, ОАО КАМАЗ, ОАО АВТОВАЗ, ФГУП НИЦИАМТ, в учебном процессе кафедры «Автомобили и двигатели» ГОУ Московского государственного индустриального университета в дисциплинах «Теория автомобиля» и «Специальные главы теории автомобиля», на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, на кафедре «Эксплуатация и ремонт строительной и дорожной техники» Военно-технического университета при Спецстрое России.

Апробация работы. Основные результаты и основные положения по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на: I Всесоюзном научно-техническом совещании «Динамика и прочность автомобиля», Москва, 1984г.; II Всесоюзном научно-техническом совещании «Динамика и прочность автомобиля», Минск, 1986г.; IV Международной научно-практической конференции ЮНЕСКО «Механизмы внедрения новых направлений науки и технологий в системе образования», Москва, 2004г.; 62-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (ГТУ), Москва, 2004г.; Международном научном симпозиуме, посвященном 175-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 2005г.; 64-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (ГТУ), Москва, 2006г.; VI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса», Екатеринбург, 2008г.; научных семинарах кафедры «Автомобили и двигатели» ГОУ МГИУ в 2005г., 2008г.; 46-ом заседании Учебно-методической комиссии по специальности «190201-Автомобиле- и тракторостроение», 2008г.; расширенном заседании кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э.Баумана, от 14 апреля 2008г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 30 печатных и 5 рукописных работах. В том числе две монографии и 10 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов, списка использованной литературы из 211 наименований. Общий объем работы составляет 370 страниц, из них основной текст работы изложен на 263 страницах, 110 рисунков на 86 страницах, список литературы на 21 странице, 32 таблицы. Представлены акты внедрения на 7 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научная проблема, цель и задачи диссертационной работы.

Глава 1. «Постановка научно-практической проблемы»[5]. Обоснованы практическая ценность и научная актуальность проводимых исследований.

Решению проблем, связанных с оценкой проходимости, посвящены работы многих ученых в СССР и России:

Агейкин Я.С., Аксенов П.В., Антонов А.С., Антонов Д.А., Бабков В.Ф., Бахраханов Л.В., Безбородова Б.Г., Белоусов Б.Н., Беляков В.В., Бируля А.К., Бочаров Н.Ф., Бриллинг Н.Р., Брянский Ю.А., Бухарин Н.А., Виравов Р.В., Водяник И.И., Горячкин В.П., Гришкевич А.И., Гуськов В.В., Добромиров В.Н., Забавников Н.А., Зимелев Г.В., Ишлинский А.Ю., Кацыгин В.В., Келдыш М.В., Кемурджян Л.А., Кнороз В.И., Колесников К.С., Коротоношко Н.И., Кошарный Н.Ф., Крагельский И.В., Крживицкий А.А., Кристи М.К., Ксенович И.П., Кутыков Г.М., Ларин В.В., Летошнев М.Н., Литвинов А.С., Ляско М.И., Малыгин В.А., Медведков В.И., Наумов В.Н., Петрушов В.А., Пирковский Ю.В., Платонов В.Ф., Полетаев А.Ф., Полунган А.А., Рукавишников С.В., Саакян С.С., Семенов В.М., Скотников В.А., Смирнов Г.А., Софьян А.П., Степанов А.П., Троицкая М.Н., Ульянов Н.А., Фаробин Я.Е., Фалькевич Б.С., Фуфаев Н.А., Хачатуров А.А., Чистов М.П., Чудаков Е.А., Шуклин С.А., Шухман С.Б., Яценко Н.Н. и многие другие.

Среди зарубежных ученых наиболее известны: М.Г. Беккер, Дж.Вонг, Г. Крик, А.Ринс, А.Солтынский, Р.Янг.

Практической реализации теоретических и экспериментальных исследований по проходимости посвящена работа многих конструкторских отделов под руководством: Астрова Н.А., Грачева В.А., Николаева А.Ф., Розова Р.А., Рукавишникова С.В., Соловьева В.П., Шапошника Б.Л., Чвялева В.Е. и др.

К настоящему времени разработано большое число математических моделей движения автомобиля по мягким грунтам. Они отличаются друг от друга различными моделями деформируемости грунта, т.е. механическими параметрами, вводимыми в расчетные системы в качестве характеристик грунта. Эти параметры должны характеризовать только грунт и не зависеть от движителя автомобиля. В качестве таких характеристик выбраны: влажность W , объемная плотность грунта ρ , модуль деформации E , угол внутреннего трения ϕ_0 , внутреннее сцепление в грунте c_0 , толщина мягкого слоя H_f .

Исследования показывают, что грунты неоднородны прежде всего по влажности и по плотности. На метеостанциях ведутся многолетние наблюдения по влажности и плотности грунта. По этим данным можно констатировать, что влажность по месяцам изменяется по нормальному закону с флуктуацией относительно математического ожидания не превышающей 6%. Таким образом для различных регионов страны можно прогнозировать физико-механические характеристики грунтов в вероятностно-статистической форме. При этом границы распространения того или иного типа грунта можно определить из почвенных карт, местоположение метеостанций известно по данным метеосправочников, характер пересеченности местности оценивается по топографическим картам.

Для описания деформативных свойств грунтов предложено около десяти моделей взаимодействия индентора с деформирующейся поверхностью. Описываются характеристики: вертикальная нагрузка – глубина погружения и зависимость сопротивления грунта сдвигу. Из всех рассмотренных моделей выбрана широко известная модель Я.С. Агейкина. Ее основное достоинство заключается в использовании физико-механических характеристик грунтов, по которым накоплены базы данных.

Практически все исследователи, занимающиеся проблемами оценки проходимости КМ, изучают процесс взаимодействия колеса с деформирующимся грунтом в статической постановке. На практике любое ТС, при его эксплуатации как на твердом покрытии так и на местности, движется испытывая продольно-угловые колебания, источником которых служат неровности поверхности движения. Специалистами в области колебаний автомобиля предложены статистические модели оценки неровностей не только дорог с усовершенствованным покрытием, но и для местности.

Известны методики оценки влияния неровности твердого покрытия дорог, грунтовых недеформирующихся дорог и основных конструктивных параметров шасси на плавность хода многоосных КМ. Эти проблемы рассмотрены и решены в исследованиях советских ученых: Аксенова П.В., Антонова А.С., Беленького Ю.Б., Бухарина Н.А., Галашина В.А., Гришкевича А.И., Груздева Н.И., Дмитриева А.А., Контанистова П.А., Ломако Д.М., Малинина С.И., Певзнера Я.М., Попова Д.А., Прозорова В.С., Прутчикова О.К., Ротенберга Р.В., Рудни М.Я., Силаева А.А., Сергеева Л.В., Усольцева Е.А., Фрумкина А.К., Фурунжиева Р.И., Яценко Н.Н.

Тем не менее нет сведений по теоретико-экспериментальным работам, посвященным оценке влияния на показатели проходимости полноприводных автомобилей неровности местности.

В общем случае полноприводный автомобиль движется на местности по криволинейной траектории. Оценке проходимости многоосного колесного ТС в этом случае движения по нашим сведениям посвящены несколько работ. Это исследования Брянского Ю.А., Добромирова В.Н., Ларина В.В. и Шухмана С.Б. Пока решение проблемы, связанной с оценкой криволинейного движения КМ можно считать незавершенной, т.к. не разработана методика оценки влияния ДГУ на основные конструктивные параметры и показатели эффективности ТСВП. В этом случае взаимодействие колес с грунтом осложняется действием на колесо боковых сил, помимо продольных и нормальных. Возможны разные варианты качения колес второй и последующих осей: по колее передних колес, по целинному грунту, или только частично по колее с измененными механическими свойствами грунта.

Установлено, что все ранее проведенные исследования и разработанные теории и методики оценки проходимости многоосных колесных машин не решили всех поставленных перед данной работой задач.

Глава 2. «Характеристика грунтовых поверхностей» [11]. По систематизированным техническим источникам рассмотрены математические спосо-

бы описания моделей деформируемости грунта при вертикальном нагружении и сдвиге. В зависимости от типа и физического состояния грунтов эти две модели дают разный отклик на нагружение (рис. 1, а: 1 – пористый грунт, 2 – плотный грунт; 3 – грунт с твердым основанием; рис. 1, б: 1 – грунт, обладающий малым внутренним сцеплением; 2 – грунт с высокими внутренними сцепными свойствами).

В результате выбраны модели деформируемости грунта, предложенные Я.С.Агейкиным и Г.Ю.Ястребовым:

$$q_{\beta} = \left[\frac{(H_r - z)}{b(1 + 1,75\varphi_0)(k_{\beta_1} \cdot b \cdot \rho \cdot X_1 + k_{\beta_2} \cdot c_0 \cdot X_2 + k_{\beta_3} \cdot \rho \cdot X_3 \cdot z) \cdot \cos \beta} + \frac{a \cdot b}{E \cdot z} \operatorname{arctg} \frac{(H_r - z)}{a \cdot b \cdot \cos \beta} \right]^{-1};$$

$$\tau = \left[q_{\beta} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 + c_0 \left(1 - \frac{S_{t_0}}{S_t} \right) \right] \left[1 - \exp \left(- \frac{S_{t_0}}{k_r} \right) \right], \text{ где } k_{\beta_1} = \frac{\pi - 4 \cdot \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi_0}{\pi + 4 \cdot \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi_0}, \quad (1)$$

$$k_{\beta_2} = k_{\beta_3} = \frac{3 \cdot \pi - 2 \cdot \beta}{3 \cdot \pi + 2 \cdot \beta}, X_1 = \frac{1 - X^4}{X^6}; X_2 = \frac{1,3[X^2 + 1]}{X^4}; X_3 = \frac{1}{X^6}, \text{ где } X = \operatorname{tg}(\pi/4 - 0,5\varphi_0);$$

a - коэффициент, характеризующий затухание напряжений в грунте; b - ширина контакта шины с грунтом, м; k_r - коэффициент тангенциальной эластичности грунта; S_t - шаг грунтозацепов, м; S_{t_0} - сдвиг грунтозацепов, м; β - угол между вектором нагрузки и нормалью к поверхности грунта, рад. Эти зависимости подтверждены экспериментами, проведенными на песке, иле, супеси.

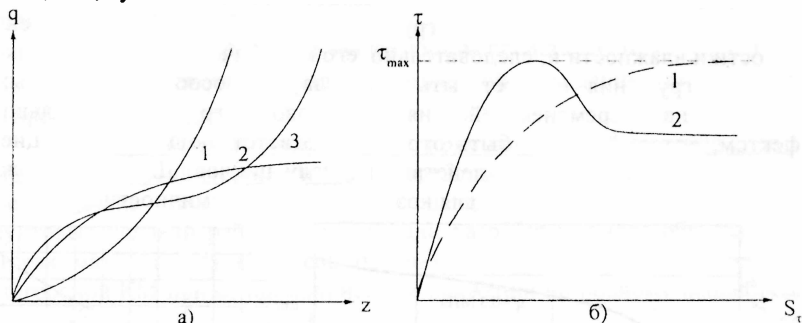


Рис. 1.

В эти уравнения входят механические параметры грунта φ_0 , c_0 , E , H_r . Статистических данных по этим параметрам накоплено мало. Вместе с тем имеются большие возможности по накоплению для конкретных регионов статистических данных по физическим параметрам грунтов. Чтобы использовать эти возможности автором проведены исследования связи между физическими и механическими параметрами грунтов. В результате получены следующие уравнения:

$$E = K_E \cdot \frac{W_T \cdot \rho_c^2}{(W - 0,05)} - K_E \cdot (W \cdot W_T)^2; \varphi_0 = K_{\varphi_1} \sqrt{\frac{K_{\varphi_2}}{W_T}} - K_{\varphi_1} \cdot \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_r} \right) - K_{\varphi_1} \cdot W \cdot \sqrt{\frac{W_T}{K_{\varphi_2}}} \quad (2);$$

$$c_0 = K_{c_1} \cdot \frac{W_T}{W} \rho_c - K_{c_2} \cdot W \cdot W_T; \quad \text{где: } K_{E_1} = 25 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^5}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}; \quad K_{E_2} = 6 \cdot 10^3 \text{ МПа};$$

$$K_{\varphi_1} = 42 \text{ град}; \quad K_{\varphi_2} = 40 \text{ град}; \quad K_{\varphi_3} = 10 \text{ град}; \quad K_{\varphi_4} = 0,44; \quad K_{c_1} = 60 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2};$$

$K_{c_2} = 5 \cdot 10^4 \text{ МПа};$ W_T - влажность предела текучести; ρ_c и ρ_T - объемная плотность скелета и твердых частиц грунта, кг/м^3 .

В работе показано, что накоплен большой статистический материал на метеостанциях по типу и влажности грунтов. Влияние времени действия нагрузки (скорости движения машины) на деформацию грунта определяется преимущественно фильтрационной способностью грунта, которая снижается при уменьшении размеров пор (при увеличении количества глинистых частиц и соответственно при уменьшении угла внутреннего трения в грунте φ_0). Поэтому предлагается учитывать влияние времени действия нагрузки на деформативные свойства грунта введением в уравнение $q_n = f(z)$ коэффициента динамичности k_d в зависимости от угла внутреннего трения:

$$q_d = q_n \cdot k_d, \quad k_d = \frac{1}{1 + \frac{l}{V \cdot \varphi_0 \cdot 2n}}, \quad t = \frac{l \cdot n}{V} \quad (3), \quad \text{где: } \varphi_0, \text{ град}; \quad l -$$

длина контакта, м; n - число проходов по одному следу (или номер оси); V - скорость движения КМ, м/с; t - время действия нагрузки, с.

При движении даже одиночной колесной машины характерно циклическое нагружение грунта. При нагружении грунта происходит изменение плотности и влажности и, следовательно, его механических свойств. Цикличность нагружения n может быть учтена двумя способами. Во-первых - отождествлена со временем действия одноразовой нагрузки, но с большим эффектом, который может быть отражен соответствующим коэффициентом перехода от времени ее действия к числу циклов. Для этого может быть использовано выражение для коэффициента динамичности k_d (3).

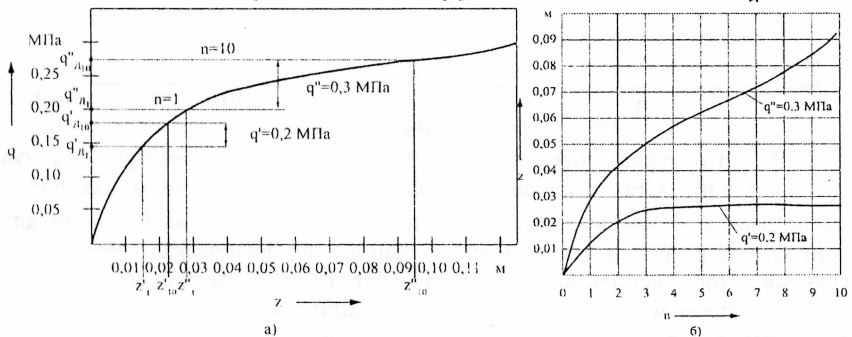


Рис. 2.

Пример влияния цикличности нагружения (числа проходов) и времени действия нагрузки t на глубину колеи z приведен на рис. 2, а, б. Глу-

бина колес определялась динамическим давлением q_d , рис. 2, а по заданным V , l , φ_0 , n и $q_p = f(z)$.

Более доступным является способ, основанный на определении изменения физико-механических свойств грунта в результате воздействия колес. Предлагается использовать определение изменения плотности суглинистого грунта по уравнению $\rho_{cn} = \rho_{c,n-1} + \rho_r \cdot \frac{q_d}{q_d + E \left(1 + \frac{a^2 H_r^2}{3F} \right)}$, (4) где $\rho_{c,n-1}$

- объемная плотность скелета грунта до прохода n -ого колеса; F - площадь пятна контакта, m^2 .

Затем определяются значения φ_0 , c_0 и E по уравнениям связи, приведенным выше (2).

Методика представления базы данных по физико-механическим характеристикам каждого типа грунта, распространенного на территории предполагаемого района эксплуатации транспортного средства, выглядит следующим образом:

1. По почвенным картам определяются основные типы грунтов (это может быть один или два грунта). Грунты классифицируются на: глины, суглинки, супеси, пески, снег.

2. По материалам метеостанций статистически представляется влажность $F(W)$, плотность $\rho(W)$ для конкретно выбранного месяца (например, время распутицы - апрель).

3. По вышеприведенным зависимостям представляются графики $F(W)$, ρ , E , φ_0 , c_0 . Графический вид статистической базы данных по грунту типа ил представлен на рисунке 3.

Глава 3. «Математическая модель прямолинейного движения колесной машины на ровной местности» [3]. Разработаны две модели. Первая модель предназначена для интегральной оценки неоднородности дорожно-грунтовых условий района эксплуатации разрабатываемого образца ТСВП. Вторая математическая модель предназначена для оценки проходимости многоосной КМ при ее прямолинейном движении по ровному неоднородному грунту.

При создании многоосных КМ высокой проходимости необходимо учитывать специфику дорожно-грунтовых условий эксплуатации абсолютно разных районов Земного шара. Из технических литературных источников можно получить достаточно достоверные результаты испытаний по деформативным свойствам грунтов по методикам, отличным от рассматриваемой в данном исследовании. Сравнение, взаимные переходы и оценка численных значений предлагаемых констант грунтов по моделям Я.С.Агейкина, М.Беккера, Д.Вонга, С.С.Саакяна, Р.Берштейна, А.Рииса, В.В.Кацыгина и В.В. Ларина приведены в диссертации.

Таким образом возможно накопление информации по механическим характеристикам грунтов и по техническим литературным источникам.

3.1. Математическая модель дорожно-грунтовых условий района эксплуатации. Предлагается оценивать неоднородность дорожно-грунтовых условий района эксплуатации с помощью виртуального эталонного маршрута. Математическая модель такого маршрута состоит из нескольких участков. Прежде всего, по почвенным картам определяются границы и площади распространения основных типов грунтов предполагаемого района эксплуатации. Это может быть один или несколько типов грунтов. Принимая гипотезу о равновероятности движения ТС в любой точке местности, можно определить плотность распределения типов грунтов:

$$P(j) = \frac{S_j}{S_{\text{общ}}}$$
, где S_j - площадь распространения j -ого грунта; $S_{\text{общ}}$ - площадь, рассматриваемого региона. В результате анализа почвенных карт по оценке распространенности того либо другого типа грунта, принимается решение о введении его в характеристики участков.

Эталонный маршрут – это набор участков, каждый из которых характеризуется «весовым коэффициентом» - относительной протяженностью P_i (выбирается путем анализа почвенных, топографических и дорожных карт). Преобладающий тип грунта (или несколько грунтов) закрепляются за номерами участков. Каждый участок характеризуется вероятностными характеристиками параметров грунта, уклонов, степени ровности. На одном из участков в вероятностной форме задается криволинейное движение. Средняя вероятностная скорость на эталонном маршруте определяется:

$$V_{cp} = \sum \frac{1}{\frac{P_i}{V_{срi}}} \quad (5), \text{ где } P_i - \text{относительная протяженность участка в эталонном маршруте; } V_{срi} - \text{вероятностная средняя скорость на } i - \text{ом участке.}$$

Таким образом определена структура математической модели эталонного маршрута, критерием эффективности движения транспортного средства является средняя вероятностная скорость движения.

3.2. Математическая модель взаимодействия колесного движителя ТСВП с деформируемым грунтом при прямолинейном движении.

3.2.1. Разработана математическая модель взаимодействия единичного колеса с грунтом. Расчетная схема взаимодействия колеса с грунтом представлена на рис.4.

Математическая модель взаимодействия пневматической шины с деформируемой ровной поверхностью разработана для решения задачи об определении взаимных деформаций шины и грунта. Напрямую по заданным параметрам шины и осевой нормальной нагрузке P_z решить ее невозможно. Задача носит нелинейный характер и решается с помощью пакета прикладных программ MatchCad. Для определения z - глубины колеи и h - деформации шины решается система следующих уравнений:

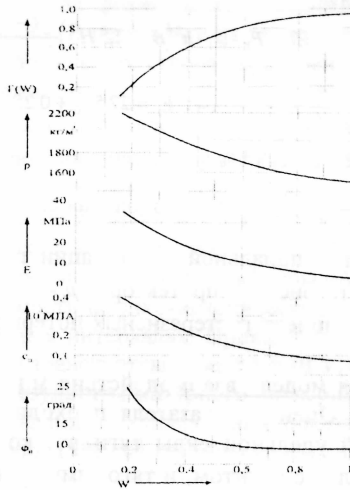


Рис. 3.

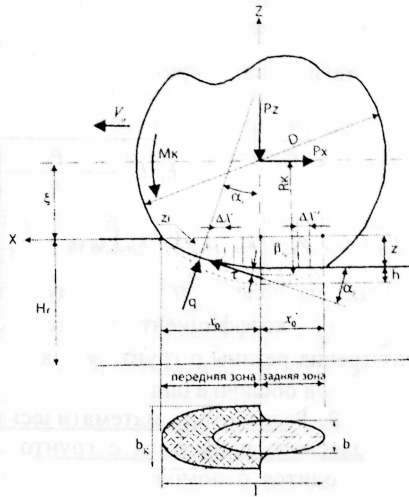


Рис. 4.

$$q_w = \pi \cdot h \cdot \frac{(p_0 + p_w)}{2 \cdot b} \cdot \left(\frac{B}{H} + \frac{3 \cdot H}{2 \cdot B} \right) \cdot \left(1 - \frac{h}{B} \right); \quad q_d = \frac{q_w}{1 + \frac{V}{l \cdot 2n \cdot \varphi_0}}; \quad (6)$$

$$q_d = \frac{E \cdot z}{0,5 \cdot a \cdot (b + b_k) \cdot \arctg \left[\frac{H_r - z}{0,5 \cdot a \cdot (b + b_k)} \right] + \frac{2 \cdot l \cdot E \cdot z \cdot \arctg \left[\frac{\pi \cdot (H_r - z)}{b + b_k} \right]}{\pi \cdot (I_1 \cdot X_1 \cdot k_{\beta 1} \cdot b + I_2 \cdot X_2 \cdot k_{\beta 2} \cdot c_0 + X_3 \cdot z)}$$

$P_z = 0,25 \cdot \pi \cdot q_w \cdot \left[(1 - 0,5\xi) \cdot 2 \cdot b \cdot \sqrt{D \cdot h - h^2} + \xi \cdot b_k \cdot \sqrt{D(h + z) - (h + z)^2} \right]$, где q_w - давление в пятне контакта, выраженное через деформацию шины, МПа; D - диаметр колеса, м; B и H - ширина и высота профиля шины, м; p_0 - давление на грунт от жесткости каркаса шины, МПа; p_w - внутреннее давление воздуха в шине, МПа; P_z - нормальная нагрузка на колесо, Н; b_k - ширина колеи, м; I_1, I_2 - коэффициенты, учитывающие влияние формы и размеров поверхности контакта на деформацию грунта.

Определив глубину колеи и деформацию шины для передней оси КМ, для последующих осей, при условии постоянства колеи, определяются те же параметры контактной задачи колесо-грунт, но физико-механические характеристики грунта пересчитываются согласно номеру оси (или прохода) по зависимостям $\rho_n = f(n; q_n; \rho_n)$; $E, \varphi_0, c_0 = f(\rho_n; W; W)$ (2), (4).

После определения h и z для каждого колеса многоосной машины определяются: коэффициент сопротивления качению шины, $f_{ш}$; коэффи-

коэффициент сопротивления качению грунта, f_r ; суммарный коэффициент сопротивления качению f ; коэффициент буксования S_6 ; свободная удельная сила тяги на крюке ψ_T : $f_{ш} = 1,75 \cdot P_x \cdot \psi_1 \cdot h^2 (B^2 + 1,5 H^2) \frac{B - 0,3h}{P_z \cdot H \cdot B^2}$;

$$f_r = q \cdot z \cdot 0,3 \left(\frac{b + b_k}{P_z} \right); S_6 = \frac{0,5}{E_1 \cdot l \cdot \left[\frac{P_z}{(P_x + P_z \cdot f) \cdot q} - \left(\frac{1}{q \lg \phi_0 + c_0} \right) \right]}; E_1 = 22,5 c_0 + 0,25; \quad (7)$$

$f = f_{ш} + f_r$; $\psi_T = \left[k_H \cdot \mu_1 + (1 - k_H) \left(\lg \phi_0 + \frac{c_0}{q} \right) \right] - f_r$, где P_x - продольная сила, действующая на колесо, H ; E_1 - модуль тангенциальной деформации грунта, 10^{-1} МПа ; k_H - коэффициент насыщенности рисунка протектора; μ_1 - коэффициент трения резины о грунт; ψ_1 - коэффициент гистерезисных потерь в резинокордной оболочке шины.

3.2.2. Разработана математическая модель взаимодействия многоосного колесного движителя с грунтом. Оценка показателя проходимости КМ проводится с помощью свободной удельной силы тяги ψ_T , которая может быть ограничена сцеплением колес с грунтом, и тяговыми возможностями машины: $\psi_T = \frac{1}{G_a} (P_{сч} - P_{fл})$, где G_a - вес автомобиля. Реализуемая

сила тяги на различных колесах определяется характером связи осей и колес внутри мостов. Для эффективного движения КМ необходимо обеспечение запаса по ψ_T , т.е.: $P = \psi_T - \lg \alpha \geq 0$, где α - определяется уклоном местности. Расчетная скорость движения в заданных дорожно-грунтовых условиях определяется из уравнения мощностного баланса: $V = \frac{k_* \cdot \eta_T \cdot N_r}{G_a \cdot \psi + k_* \cdot F \cdot V^2}$,

где $\psi = \frac{(\sum P_{f_{r,i}} + \sum P_{f_{ш,i}})}{G_a} + \sin \alpha \quad (8)$.

Глава 4. «Экспериментально-теоретические исследования взаимодействия штампов с деформируемым грунтом и проходимости специальных полноприводных колесных машин» [11]. Приведена методика оценки адекватности математической модели деформируемости грунта, основанной на использовании независимых физико-механических параметров грунта, и математической модели взаимодействия пневматического колеса с деформируемой поверхностью. Экспериментально определены максимальные скорости движения, глубина колеи под осями четырех колесных транспортных средств на двухслойном грунте «ил-ракушечник».

В качестве примера приведены комплексные испытания, проведенные на берегу залива Сиваш, полигона СКБ ЗИЛ.

Поверхность залива, где проводились испытания, образована двумя грунтами: верхняя часть – ил ($H_r = 0...35 \text{ см}$) и нижняя часть – твердый ракушечник. Длина створа, на территории которого было установлено постоянное

наблюдение за влажностью грунта, как по протяженности, так и по ширине – 1,5 км. Специалистами ПГО Гидроспецгеология проведены многолетние наблюдения за физико-механическими параметрами грунта данного участка местности. В результате их экспериментальных исследований на каждом пикете центрального створа определены по слоям (каждые 10 см до глубины в 1 м) влажность W , плотность ρ , удельное сопротивление пенетрации R_F , удельное сопротивление зондированию q_F , удельное сцепление c_0 и удельное сопротивление вращательному срезу τ .

Параллельно с исследованиями ПГО Гидроспецгеологии проведены штамповые испытания как на недеформированном грунте, так и в колее, после проходов соответствующих осей автомобилей с помощью оригинального задавливающего прибора кафедры «Автомобилей и двигателей» ГОУ МГИУ. Зависимости физико-механических характеристик грунта приведены в доверительных интервалах. Приведены результаты испытаний на проходимость четырех транспортных средств в ДГУ, оцененных экспериментом и расчетами.

Результаты натурного эксперимента и компьютерного моделирования дают разницу в определении показателей проходимости ТСВП не превышающую: 15% для глубины колеи, ошибки в расчете ожидаемой скорости не более 20%.

В диссертации приведены результаты аналогичных испытаний на грунтах типа суглинок и песок.

Глава 5. «Движение колесной машины по неровной грунтовой поверхности» [4, 7]. Из-за колебаний подрессоренных и неподрессоренных масс машины процесс взаимодействия колес с грунтом значительно усложняется. Поэтому дополнительно к изложенному в предыдущих главах рассмотрены следующие три вопроса: 1) изменение параметров колебаний КМ из-за деформаций грунта; 2) определение дополнительных нагрузок на колеса, вызываемых колебаниями; 3) определение показателей взаимодействия колес с грунтом с учетом действия периодически изменяющихся нагрузок.

Приняты следующие допущения:

1. Статистический микропрофиль грунтовых поверхностей оценивается спектральной плотностью, выражаемой простейшей зависимостью $S_\theta(\theta) = A \cdot \theta^{-b}$ (9), где A и b - коэффициенты спектральной плотности, определяющие тип микропрофиля; θ - путевая частота, рад/м .

2. Колесо катится без отрыва от грунтовой поверхности.

3. Рассматривается плоская колебательная система, включающая жесткость подвески C_p , жесткость шин $C_{ш}$, жесткость грунта C_r , сопротивление амортизаторов k_a , коэффициент демпфирования шины $k_{ш}$, коэффициент демпфирования грунта k_r .

4. В вариантах колебательных моделей рассматривается линейная система подрессоривания. Она идеальна, стационарна и устойчива. Динамические свойства рассматриваемой линейной системы подрессоривания можно

описать частотной характеристикой $H(\nu)$. Спектральные плотности сигналов $y(t)$ и $x(t)$ удовлетворяют условию: $S_y(\nu) = H^2(\nu) S_x(\nu)$ (10), где ν - частота по времени, $\text{рад}/\text{с}$.

5.1. Рассмотрены особенности учета колебательного процесса на распределение нормальной нагрузки по осям КМ при движении по грунту. Деформации грунта и показатели колебаний КМ взаимообусловлены. Изменение глубины колеи определяется диапазоном колебаний нормальной нагрузки, действующей на колеса, и характеристикой деформируемости грунта. Пример такой взаимной связи представлен в диссертации.

Рассмотрены типичные характеристики деформируемости грунтов с различной толщиной мягкого слоя $H_r (H_{r1} > H_{r2})$. В первом случае при увеличении и уменьшении нагрузки на ΔP глубина колеи изменяется на 50% и 30% соответственно. Для второго грунта та же дополнительная нагрузка ΔP и разгрузка на ΔP изменяют глубину колеи на 10% и 30% соответственно. При этом грунт является дополнительным упругим и гасящим элементом.

Рассмотрена задача о вертикальных колебаниях двухмассовой системы (M – подрессоренная масса, m - неподрессоренная масса) на упруго-вязкопластичном грунте. Приведены амплитудно-частотные характеристики, отличающиеся от известных решений значениями: - приведенной жесткости шины и грунта $C_{rш} = \frac{C_{ш} \cdot C_r}{C_{ш} + C_r}$ вместо $C_{ш}$; - приведенного коэффициента демпфирования шины и грунта $k_{rш}$:

$$k_{rш} = \frac{(1 - \xi_1) \cdot \int_0^z 0,25 \cdot \pi \cdot q(z) \cdot \left[(1 - 0,5 \cdot \xi_1) \cdot 2 \cdot b \cdot \sqrt{D \cdot h - h^2} + \right.}{4 \cdot \nu \cdot (h + \xi_1 \cdot z)^2} + \left. \xi_2 \cdot b_k \cdot \sqrt{D \cdot (h + z) - (h + z)^2} \right] \cdot dz + \frac{0,5 \cdot \pi \cdot b \cdot \psi_1 \cdot P_0}{P_0 + P_w} \cdot \int_0^h q(h) \cdot \sqrt{D \cdot h - h^2} \cdot dh}{(11), \text{ где } \xi_1 -$$

часть упругой деформации грунта; ξ_1 и ξ_2 - параметры, учитывающие кривизну характеристики деформируемости шины и грунта.

ψ_1 - коэффициент гистерезисных потерь в резинокордной оболочке шины.

5.2. Определены дополнительные вертикальные нагрузки на колесо и грунт (ΔP_c). $\Delta P_c = \ddot{z}_c \cdot M + \ddot{\xi}_c \cdot m$ (12), где $\ddot{z}_c$ и $\ddot{\xi}_c$ - среднеквадратические ускорения подрессоренной и неподрессоренной масс, ΔP_c - среднеквадратическое значение дополнительной нагрузки.

Рассчитаны вероятностные характеристики дополнительной нормальной нагрузки на колесо при разных скоростях движения на суглинке с $A = 10^{-4}$; определены допустимые по плавности хода скорости движения.

5.3. Оценено влияние колебаний на показатели взаимодействия колеса с грунтом. Для поверхности, неровность которой задана случайным микро-

профилем, рассмотрены случаи движения по суглинку $W_0 = 80\%$ с $H_f = 0,35$ м и $H_f = 0,5$ м и неровностями, характеризуемыми коэффициентом $\lambda = 10^{-2,5}$ и худшими условиями $\lambda = 10^{-2,5}$, $\rho_c = 1050 \text{ кг/м}^3$, $p_w = 0,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $V = 2,5 \text{ м/с}$. Получены расчетные значения изменения глубины колеи и деформации шины, характеристики сопротивления качению, уплотнения грунта в вероятностной форме.

5.4. Приведена методика оценки взаимодействия колес с неровным грунтом при прямолинейном движении след в след. Для расчета взаимодействия с грунтом колес следующей оси используются те же зависимости, которые определяли взаимодействие колес с грунтом первой оси. В исходные данные вводятся новые значения ρ_n , H_{fn} , P_{zn} , P_{xn} , p_w (по методике главы 2).

Проведены расчеты по оценке влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на показатели взаимодействия колесного движителя двухосной машины с грунтовой поверхностью, неровность которой задана случайным микропрофилем.

Результаты расчетов показывают, что если решать задачу по оценке проходимости (например, при определении оптимальных параметров движителя в заданных дорожных условиях эксплуатации), то в вероятностной постановке будет получено решение, значительно отличающееся от конечного результата в осредненной постановке.

5.5. Исследовано взаимодействие с неровным грунтом многоосной колесной машины при прямолинейном движении. Приведены методика и результаты расчетов на примере четырехосного автомобиля. В основу методики заложены следующие принципы:

1. Определение параметров взаимодействия многоосного движителя с грунтом без учета колебаний. Рассматривается плоская модель многоосного автомобиля. Из его развесовки известны нормальные нагрузки по осям P_{z1} , P_{z2} , ..., P_{zn} . По этим статическим нагрузкам при известных параметрах колеса и физико-механических характеристик грунта определяются их взаимные деформации.

2. Определение параметров колебаний многоосной КМ при движении по неровной твердой поверхности. Микропрофиль поверхности, по которой движется КМ, представляется как случайная функция, удовлетворяющая допущениям: функция стационарна и эргодична; ординаты микропрофиля подчиняются нормальному закону распределения; длины неровностей ограничены по верхнему и нижнему пределам; микропрофиль меняется случайным образом только в вертикальной продольной плоскости дороги.

Колебания многоосного автомобиля в вертикальной плоскости представлены следующим векторным уравнением: $M \ddot{Z} + K \dot{Z} + C Z = B \dot{q} + D \ddot{q}$ (13), где M - матрица инерции; Z - вектор обобщенных координат; $K = \|k_{ij}\|$ - матрица приведенных коэффициентов линейного трения; $C = \|c_{ij}\|$ - матрица при-

веденных коэффициентов жесткости; $\mathbf{B} = \|c_{w i j}\|$ - матрица приведенных коэффициентов жесткости шин и упругих элементов подвески; $\mathbf{D} = \|k_{w i j}\|$ - матрица приведенных коэффициентов линейного трения амортизаторов и шин; $\mathbf{q}$ - вектор обобщенных сил.

При преобразовании векторного уравнения в скалярную форму для четырехосной колесной машины, имеем шесть дифференциальных уравнений второго порядка. Причем первые четыре уравнения описывают вертикальные колебания неподдресоренных масс, пятое и шестое уравнения соответствуют математическому описанию колебательного процесса поддресоренной массы машины.

Целью решения этого уравнения является определение виброускорений центра масс автомобиля и точек корпуса, соответствующих верхним опорам крепления подвесок, а также определение деформаций упругих элементов подвесок по осям автомобиля. Доказано, что для многоосных КМ влияние колебаний неподдресоренных масс в общем процессе невелико. Поэтому введено еще одно допущение: пренебрегаем колебаниями колес автомобиля. Тогда система уравнений сводится к двум несвязным дифференциальным уравнениям второго порядка:

$$\ddot{\mathbf{Z}} + 2n_z \dot{\mathbf{Z}} + \omega_z^2 \mathbf{Z} = \omega_z^2 \left(\sum_{i=1}^4 \frac{c_i}{\sum_{j=1}^n c_j} q_{ki} + \sum_{i=1}^4 \frac{k_i}{\sum_{j=1}^n c_j} \dot{q}_{ki} \right); \quad \ddot{\alpha} + 2n_\alpha \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha = \omega_\alpha^2 \left(\frac{\sum_{i=1}^4 c_i l_i}{\sum_{j=1}^4 c_j l_j^2} q_{ki} + \sum_{i=1}^4 \frac{k_i l_i}{\sum_{j=1}^4 c_j l_j^2} \dot{q}_{ki} \right) \quad (14)$$

где $2n_z = \frac{\sum_{i=1}^4 k_i}{M}$; $2n_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^4 k_i \cdot l_i^2}{J_{cy}}$; $\omega_z^2 = \frac{\sum_{i=1}^4 c_i}{M}$; $\omega_\alpha^2 = \frac{\sum_{i=1}^4 c_i l_i^2}{J_{cy}}$; M - поддресоренная масса; J_{cy} - момент инерции поддресоренной массы относительно оси y ; n_z и n_α - коэффициенты затухания; ω_z и ω_α - собственные частоты колебаний.

Тогда: $q_i = q_0 \sin v(t - \tau_i)$, $\dot{q}_i = q_0 v \cos v(t - \tau_i)$, где $\tau_i = \frac{l_1 - l_2}{V}$; q_0 - случайная амплитуда K -ой гармонической составляющей профиля.

Вертикальные среднеквадратические виброускорения i - точки корпуса КМ определяются по следующим известным из теории случайных колебаний механических систем зависимостям: - для центра масс автомобиля

$\ddot{z}_c = \left[S_z(v) \cdot dv \right]^{0.5}$, где $S_{z_i}(v) = S_q(v) \cdot |H_{z_i}(v)|^2 \cdot v^4$ - спектральная плотность

виброускорения; $S_q(v) = \frac{A \cdot V}{v^2}$ - спектральная плотность микропрофиля; $H_{z_i}(v)$ - передаточная функция по Z , - среднеквадратическое значение вертикальных колебаний: $Z_u = \left[\int S_{z_i}(v) \cdot dv \right]^{0.5}$ для точек корпуса l_i , соответствующих верхним опорам крепления подвесок, где $S_{z_{li}}(v) = S_q(v) \cdot |H_{z_{li}}(v)|^2$, где $H_{z_{li}}$ - переда-

точная функция преобразования микропрофиля в перемещения на расстояние l_i от центра масс.

По среднеквадратическим виброускорениям определяются среднеквадратические значения дополнительной среднеквадратической нагрузки (динамической нагрузки), приходящейся на каждую из осей автомобиля.

Таким образом, по осям многоосного (в данном примере - четырехосного) автомобиля определяются дополнительные динамические вертикальные нагрузки и динамические прогибы упругих элементов подвесок.

3. Определение параметров взаимодействия многоосной КМ при движении по неровной грунтовой поверхности. Физическая модель колебательного процесса при движении многоосного колесного транспортного средства на неровном деформируемом грунте представлена на рис.5.

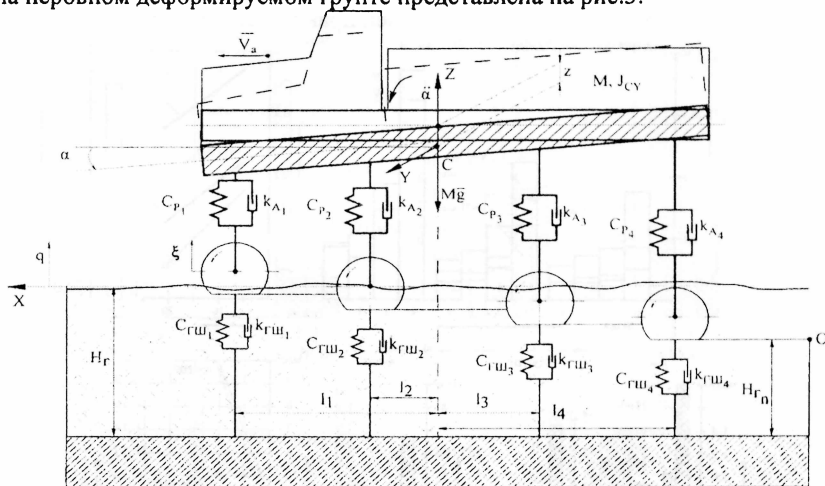


Рис. 5.

В связи с тем, что уточнены реальные нагрузки по осям многоосной машины расчеты по определению глубины колеи z_i и деформациям шин h_i повторяются вновь.

По новым значениям z_i и h_i определяются показатели проходимости: коэффициент сопротивления качению f_i , свободная удельная тяга ψ_T и коэффициент буксования машины S_8 .

4. Оценивается влияние параметров ходовой части машин и поверхности движения на проходимость КМ по неровным грунтовым поверхностям. Исследования проведены на примере колесной машины 8x8 со следующими базовыми значениями характеристик грунта и транспортного средства:

- параметры грунта (суглинок, $W = 80\%$, $\rho_c = 1150 \text{ кг/м}^3$, $H_g = 0,6 \text{ м}$);

И. И. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

- параметры КМ (шасси $l_1 = 3,15 \text{ м}$; $l_2 = 0,8 \text{ м}$; $l_3 = -0,8 \text{ м}$; $l_4 = -3,15 \text{ м}$; $J_{cy} = 70000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; колесо: $P_{Z_1} = 20125 \text{ Н}$; $D = 1,27 \text{ м}$; $B = 0,37 \text{ м}$; $p_w = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $p_0 = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$; подвеска $h_p = 0,1 \text{ м}$; $k_n = 8550 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}$).

Результаты расчетов представлены на рис. 6, а, б и 7, а, б.

С увеличением скорости движения глубина деформации грунта существенно уменьшается рис. 6, а. На относительно ровном грунте $A = 10^{-4}$ увеличение скорости с 5 м/с до 20 м/с приводит к уменьшению глубины колеи под передней осью на 65 %, а под задней на $\approx 50 \%$. При увеличении степени неровности опорной поверхности до $A = 10^{-2}$ качественно картина остается той же, но динамические нагрузки существенно растут и это приводит к тому, что при увеличении скорости с 5 м/с до 13 м/с глубина колеи под передней осью уменьшается на 15 %, а под задней практически не изменяется.

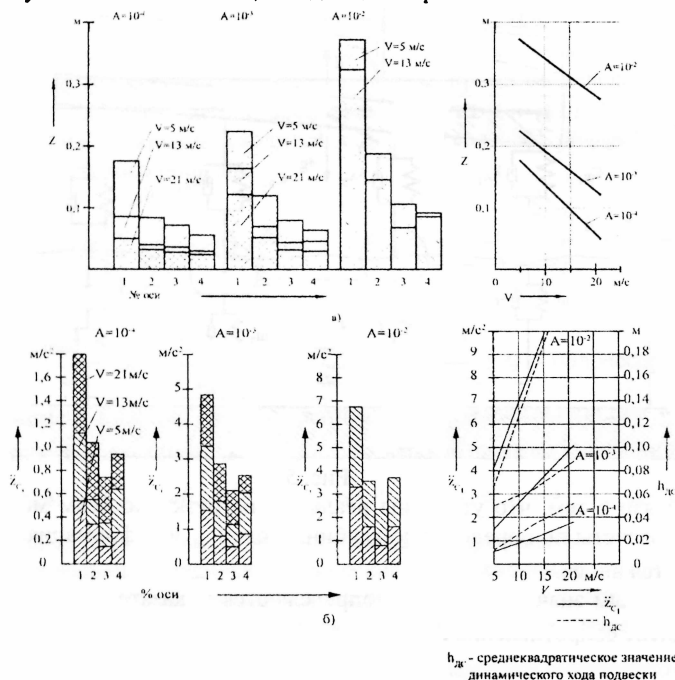


Рис. 6.

Виброускорения корпуса также наибольшие над первой осью, рис.6, б. Они больше чем над задней осью, так как у передней оси знаки угловых и вертикальных колебаний центра масс совпадают, а у задней оси они противоположны.

Над передней осью (рис. 6, б) при увеличении скорости движения с 5 м/с до 15 м/с на неровном грунте с $A = 10^{-4}$ среднееквадратические виброу-

скорения центра масс увеличиваются примерно в два раза. В том же интервале скоростей движения на грунте со степенью неровности $A=10^{-2}$ при $V=5 \text{ м/с}$ значение виброускорений выше в 5 раз и достигает 4 м/с^2 ; при $V=15 \text{ м/с}$, $\ddot{z}_{c1} = 10 \text{ м/с}^2$.

Для среднеквадратического динамического хода подвески характер его изменения от скорости и степени неровности грунта такой же, как и у среднеквадратических виброускорений (рис.6, б).

Зависимость глубины колеи, деформации шины и соответственно коэффициентов сопротивления качения грунта и шины от степени неровности опорной поверхности и скорости движения машины показаны на рис. 7, а, б. Неровность опорной поверхности существенно влияет на все показатели опорной проходимости.

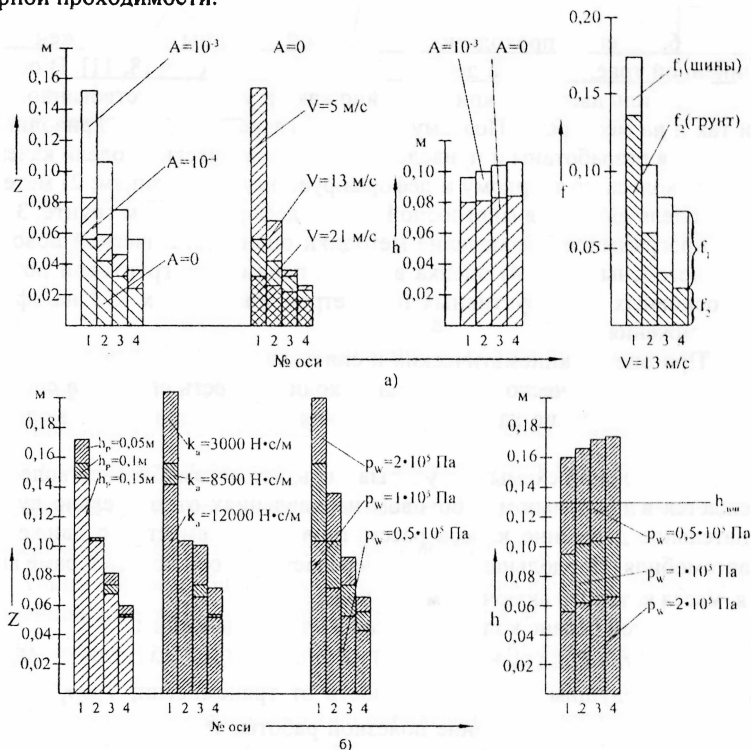


Рис. 7.

Сопротивление качению f определяется затратами энергии на деформацию грунта f_2 и деформацию шины f_1 рис. 7, а. У колес первой оси преобладают затраты энергии на деформацию грунта, у 3-ей и 4-ой осей - на деформацию шины.

Зависимости глубины колеи z и деформации шины h от статического хода подвески h_p , сопротивления амортизаторов k_a и внутреннего давления воздуха в шинах p_w приведены на рис. 7, 6. Жесткость упругого элемента подвески мало влияет на глубину колеи. Снижение коэффициента сопротивления амортизатора в 2,5 раза приводит к увеличению глубины колеи под передней осью колесной машины, примерно, на 20 %, что можно считать незначительным влиянием.

Наибольшее влияние оказывает давление воздуха в шинах по всем четырём осям машины. При давлении воздуха в шинах $p_w = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ деформация шин превышает допустимые значения (допустимые нормальные деформации не должны иметь значения более 0,35 H , в данном примере $\approx 0,13 \text{ м}$).

Глава 6. Оценка проходимости колесной машины при движении по криволинейной траектории на деформируемой поверхности [8, 11]. В общем случае автомобиль движется криволинейно как на усовершенствованном покрытии так и на местности. Поэтому в данной главе для случая криволинейного движения разработаны и приведены: 1) математические модели качения эластичного колеса по твердому и деформируемому основаниям; 2) математическая модель движения многоосной КМ на деформируемом грунте; 3) алгоритм и программное обеспечение методики оценки статической поворотливости многоосных КМ; 4) оценка влияния параметров грунтовой поверхности и основных конструктивных параметров многоосных КМ на эффективность движения.

6.1. При оценке кинематических и силовых параметров криволинейного движения пневматического колеса необходимо учесть его более сложное нагружение и изменение характера движения по сравнению с прямолинейным.

При составлении схемы сил учитывалось, что автомобильное колесо не перемещается в продольном и боковом направлениях относительно кузова. Поступательное движение колеса рассматривается совместно с движением всего автомобиля. Продольная сила P_x передается от оси колеса к раме автомобиля, масса которого включает массу колес.

Мощностной баланс колеса записан в следующем виде:

$M_k \omega_k = P_x \omega_k r_k + P_z f_0 r'_k \omega_k + P_x \omega_k (r'_k - r_k) + K_v \delta^2 \omega_k r_k + M_{\mu} \omega_k$ (15), где $M_k \omega_k$ - подводимая к ведущим колесам мощность от трансмиссии; $P_x \omega_k r_k$ - мощность, затраченная на совершение полезной работы; $P_z f_0 r'_k \omega_k$ - потери на сопротивление качению от радиальной деформации шины в свободном режиме; $P_x \omega_k (r'_k - r_k)$ - потери на сопротивление качению от тангенциальных деформаций и скольжения в пятне контакта в продольном направлении; $K_v \delta^2 \omega_k r_k$ - потери обусловленные боковым уводом; $M_{\mu} \omega_k$ - потери на разгон.

6.2. При оценке кинематических и силовых параметров криволинейного движения пневматического колеса по деформируемому грунту необходимо учитывать деформируемость в трех направлениях как самого колеса так и грунта. В отличие от деформируемости пневмоколеса, деформируемость грунта в нормальном, тангенциальном и боковом направлениях необходимо рассматривать во взаимосвязи. Расчетная схема представлена на рис. 8.

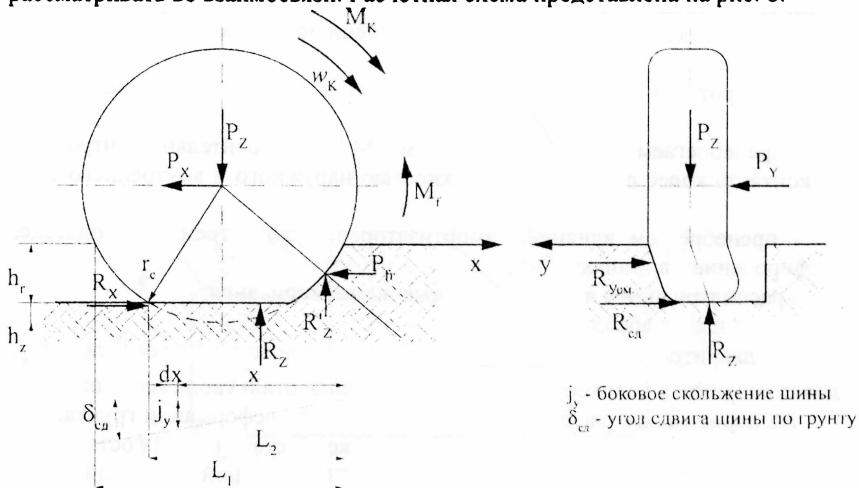


Рис. 8.

Общая сила сопротивления качению P_f колеса при повороте на мягком грунте определяется как сумма сил: скольжения (буксования) колеса, P_{f_s} ; сопротивления грунта качению, P_{f_r} ; сопротивления шины качению, $P_{f_{ш}}$; трения в боковом направлении, $P_{f_{y_{тр}}}$; сопротивления боковому уходу шины, $P_{f_{y_{ш}}}$; смятия грунта боковой стенки колеи, $P_{f_{y_{см}}}$; затраченной на дополнительное увеличение глубины колеи за счет боковой силы, $P_{f_{y_{\Delta h}}}$.

Таким образом общий момент сопротивления качению колеса по криволинейной траектории на деформируемом грунте M_f :

$$M_f = (P_{f_s} + P_{f_r} + P_{f_{ш}} + P_{f_{y_{тр}}} + P_{f_{y_{ш}}} + P_{f_{y_{см}}} + P_{f_{y_{\Delta h}}}) \cdot r_k^c \quad (16),$$
 где r_k^c - радиус чистого качения.

Все расчетные зависимости по определению вышеприведенных составляющих приведены в тексте данного исследования и основаны на результатах теоретических и экспериментальных разработок Д.А. Антонова, Я.С. Агейкина, А.С. Литвинова и Я.Е. Фаробина.

6.3. Математическая модель движения колесной машины по криволинейной траектории на деформируемом грунте. В разработанной модели учитывается перераспределение нормальных реакций как между бортами КМ,

так и между осями, а также заглубление колес в грунт на разную глубину. Первый этап определения неизвестных решается с помощью одномассовой модели равновесия рамы. Расчетная схема поворота многоосной КМ представлена на рис. 9.

Подвижная система координат связана с центром масс (ЦМ) т.С. При определении реакций в пятне контакта приняты следующие допущения:

- каждое колесо прокладывает собственную колею, без учета ранее прошедших колес;
- поворот КМ на деформируемой поверхности происходит с малой скоростью;
- пренебрегаем боковым смещением ЦМ КМ относительно центров пятен контакта колес с опорной поверхностью наружного и внутреннего бортов;
- пренебрегаем влиянием амортизаторов, сухого трения в подвеске, демпфированием в шинах;
- рассматривается линейная система поддрессоривания;
- рама шасси абсолютно жесткая.

Предварительно определяются нормальные реакции по осям колес R_{zy} , угловая скорость в плоскости поворота, углы поворота и увода всех колес.

На первом шаге расчеты проводятся без учета деформации грунта. Все кинематические и силовые параметры определяем в статической постановке.

Необходимо задаться: количеством осей i ; колесной формулой; количеством и номерами управляемых осей; средним углом поворота передней управляемой оси θ ; линейной скоростью КМ, V ; теоретическим смещением полюса поворота, x_r ; геометрическими характеристиками шасси относительно ЦМ, l_i ; характеристиками шины; коэффициентом сопротивления качению f , жесткостями подвесок и шин, коэффициентами блокировки распределительных механизмов в узловых точках трансмиссии.

Тангенциальные и боковые реакции каждого колеса КМ определяются характером связей во всех узловых точках трансмиссии, кинематическими и силовыми параметрами взаимодействия колес с опорной поверхностью, внешними силами и конструктивными параметрами шасси.

Для определения этих реакций, а также крутящих моментов и угловых скоростей колес и ветвей трансмиссии составлена система уравнений. Она основывается на теореме о движении центра масс механической системы и комплексе уравнений, связывающих силовые и кинематические параметры узловых точек трансмиссии, и законах взаимодействия колес с грунтом.

Криволинейное движение многоосной колесной машины можно представить в общем виде:

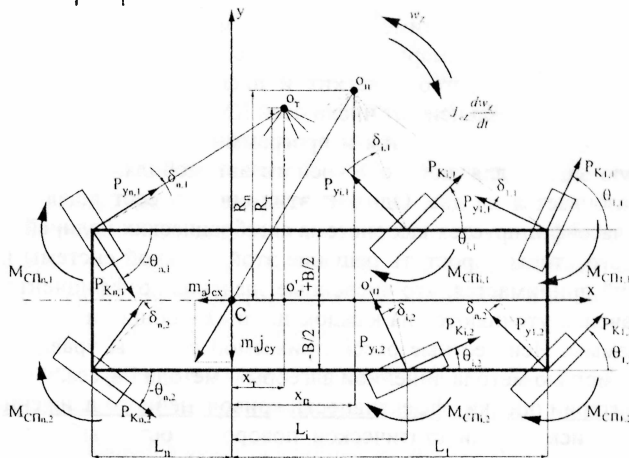
$$M \cdot \ddot{j} = f$$

$$K \cdot p = 0$$

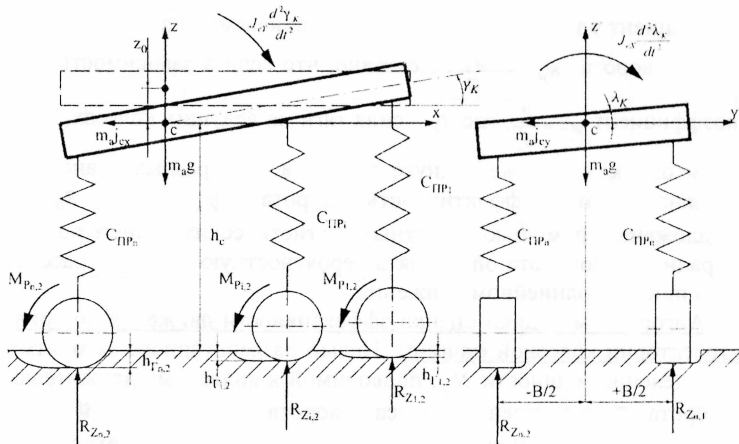
$$D \cdot Z = 0$$

$$Z = \begin{pmatrix} W \\ A \cdot R \\ B \\ T \\ X \cdot R \\ F \end{pmatrix} \quad (17),$$

где M - матрица инерции; j - вектор обобщенных координат КМ как механической системы; f - вектор обобщенных сил; K - матрица КПД и коэффициентов, характеризующих распределительный механизм, размерностью 3×6 ,



а) Схема силовых факторов, действующих на КМ в плане



б) Схема силовых факторов, действующих на КМ в продольной и поперечной плоскостях

Рис. 9.

где l - количество узлов; p - матрица моментов и угловых скоростей на входных валах и ветвях распределительных механизмов; D - матрица коэффициентов при неизвестных в уравнениях кинематической связи и силового баланса колес, размерностью 2×6 ; Z - блочная матрица угловых скоростей и крутящих моментов, состоящая из подматриц размерностью ixj , где $i = 1, \dots, l$ $j = 1, 2$ - порядковый номер борта КМ; W - угловых скоростей колес; R - свободных радиусов качения колес; A - коэффициентов изменения угловой скорости колеса за счет передаваемого момента; B - угловых скоростей колес, движущихся на свободном режиме; T - тяговых моментов на колесах; X - тяговых сил на колесах; F - суммарных моментов сопротивления качению.

Число нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений, входящих в эту модель, зависит от числа осей КМ и определяется по формуле – $(10n)$. Разработанные алгоритм и программное обеспечение позволяют решить общую задачу для любого n -осного автомобиля. Система из $(10n)$ уравнений разбивается на две. Одна из этих систем, состоящая из $(10n-2)$ уравнений, классифицируется как система алгебраических нелинейных уравнений. Для того чтобы упростить решение этой сложной системы нелинейных уравнений принимается, что численные значения коэффициентов постоянны. Их значения уточняются на каждом шаге « k » общих итераций в алгоритме программы. Неизвестные рассматриваемой системы уравнений определяются с помощью метода линейной алгебры – метода Гаусса.

6.4. Критерии оценки эффективности криволинейного движения КМ. В качестве критериев оценки статической поворотливости выбраны: момент сопротивления повороту M_c и мощность, подводимая к колесному движителю N_n . В качестве единого критерия конструктивного совершенства КМ берется коэффициент удельной энергии K_N , затрачиваемой на единицу угловой скорости ее поворота: $K_N = \frac{N_n}{\omega_z \cdot G_a}$. Показано, что если в зависимость для K_N

ввести коэффициент $\psi_n = \frac{P_k}{G_a}$, где P_k - сила тяги на ведущих колесах; G_a - вес

КМ, то при одном и том же радиусе поворота для разных транспортных средств можно оценивать эффективность поворота по ψ_n : $K_N = \psi_n \cdot R_n$.

Предложено с помощью известных статистических данных по распределению радиусов поворота определять вероятностную скорость рассматриваемой КМ при криволинейном движении.

6.5. Алгоритм методики оценки эффективности движения по криволинейной траектории колесной машины. Целью разработанного алгоритма является определение мощности N_n , подводимой к колесному движителю, радиуса поворота R_n и смещения полюса поворота x_n при заданной линейной скорости V колесной n -осной машины в заданных физико-механических параметрах ДГУ.

Оценка точности разработанной математической модели криволинейного движения КМ проведена по результатам испытаний, известных из технических источников. Все примеры оценки взаимосвязи кинематических и силовых факторов статической поворотливости многоосной колесной машины дают сходимость расчетов и эксперимента не менее 80%.

6.6. Анализ влияния параметров грунтовой поверхности и общих конструктивных решений многоосного шасси на критерий эффективности криволинейного движения КМ. Анализ проведен на примере автомобиля МАЗ 543, движущегося по криволинейной траектории с заданной линейной скоростью $V = 4 \text{ м/с}$. Типы грунтов: песок, супесь, суглинок (базовые значения $W = 0,3$; $H_r = 0,4 \text{ м}$). В расчетах рассмотрено семь вариантов компоновок четырехосного шасси рис. 10 (0 – симметричный дифференциал; 1 – муфта свободного хода; 2 – блокированная связь). Базовые значения параметров шасси 8х8: $G_a = 400000 \text{ Н}$; шина 1500х600-635; $p_w = 0,35 \text{ МПа}$; средний угол поворота управляемых колес передней оси $\theta = 30^\circ$.

Рассмотрено: - влияние плотности грунтов ρ_c на глубину колеи z , на коэффициент сопротивления повороту ψ_n , на затрачиваемую мощность на поворот N_n , критерий эффективности при повороте K_n , коэффициент использования сцепной силы движителя K_ϕ ;

- влияние толщины мягкого слоя грунтов H_r на K_n , N_n , K_ϕ , z ;
- влияние влажности грунтов W на K_n , N_n , K_ϕ , R_n ;
- влияние давления воздуха в шинах p_w на K_n , N_n , K_ϕ , R_n .

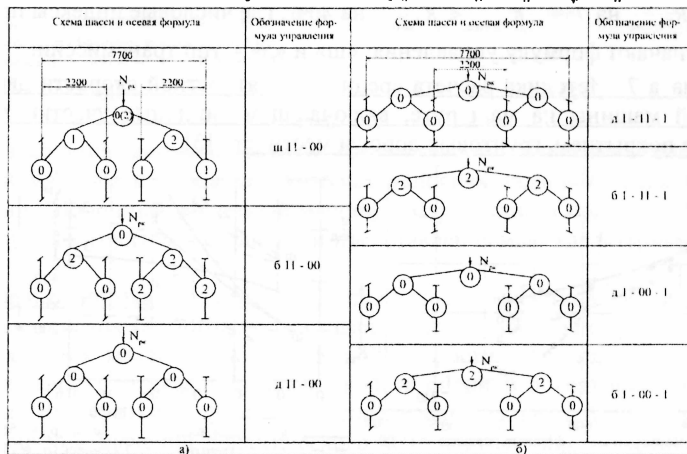


Рис. 10.

Примеры результатов расчетов представлены на рис. 11, а, б, в, г, д, е.

Из анализа результатов расчетов установлено, что при увеличении плотности песка и супеси на 25% от минимального значения, глубина колеи

z , K_N , N_H уменьшаются в среднем в три раза. На суглинке такое же изменение плотности скелета грунта дает уменьшение z , K_N , N_H только на 30%. На песке радиус поворота R_H при той же скорости движения КМ может быть снижен на 15%.

Установлено, что влияние толщины мягкого слоя H_f на связных грунтах (суглинке и глине) на z , K_N , N_H при высокой влажности грунта $W = 0,8$ менее заметно, чем для песка и супеси. Например, в одном и том же интервале изменения H_f , глубина колеи на суглинке в два раза меньше.

Рассмотрено влияние типов трансмиссии рис. 11 (штатной-«ш»; дифференциальной-«д»; блокированной-«б») на показатели и критерии эффективности. Установлено, что на суглинке оцениваемая эффективность выше у штатного варианта.

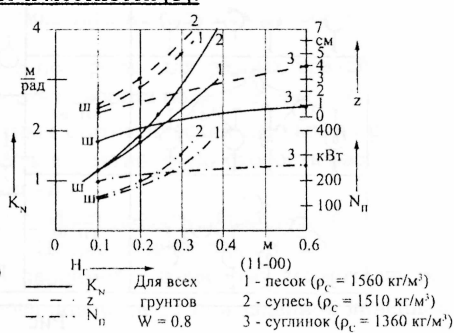
Расчеты показали, что на песке оптимальное давление воздуха в шинах $p_w = 0,25 \text{ МПа}$, оно дает значение $R_H = 14,5 \text{ м}$. На супеси увеличение давления с $p_w = 0,2 \text{ МПа}$ до $p_w = 0,4 \text{ МПа}$ дает уменьшение R_H на 10%, не влияя на затрачиваемую мощность.

Установлено влияние формулы управляемости КМ на R_H и K_N . По расчету, независимо от плотности, влажности и типа грунта, наименьший радиус поворота у шасси со всеми управляемыми колесами с дифференциальной схемой привода. Штатный вариант обладает наихудшей статической поворотливостью. Шасси с передними и задними управляемыми осями занимает среднее положение по R_H и K_N . При этом в равных грунтовых условиях $R_{H_{д-ш}} < R_{H_{ш-ш}}$ на 75%, $K_{N_{д-ш}} < K_{N_{ш-ш}}$ на 40%, где числовые индексы при R_H и K_N обозначают формулу управления; «ш» и «д» - тип трансмиссии.

Глава 7. Методика расчета средней вероятностной скорости движения колесной машины на маршруте, включающем типичные участки дорог с твердым покрытием, грунтовых дорог и местности [3].



а)



б)

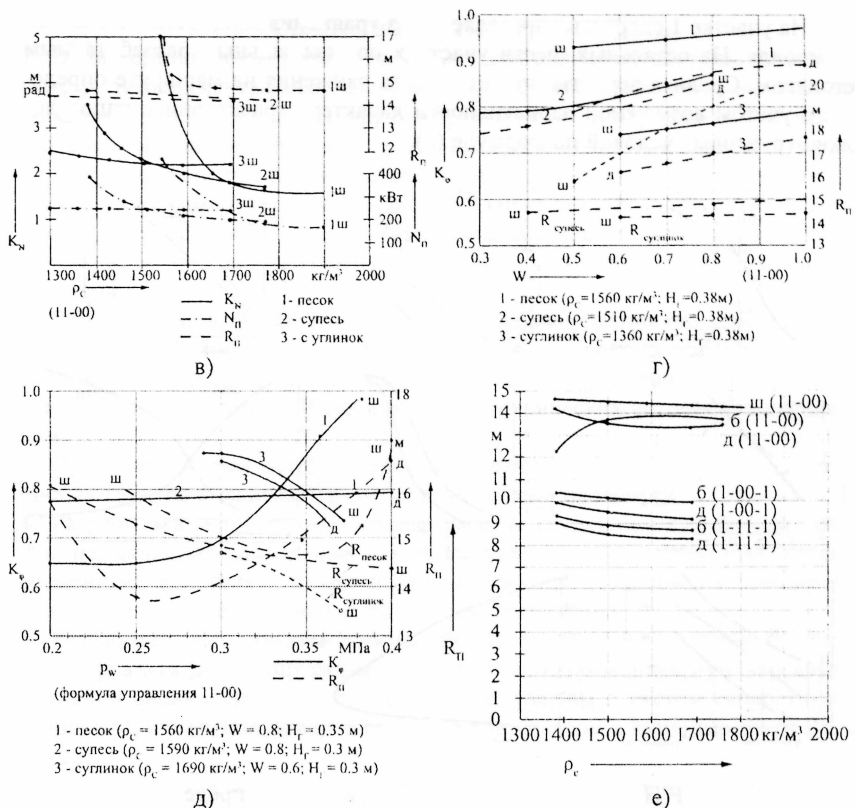
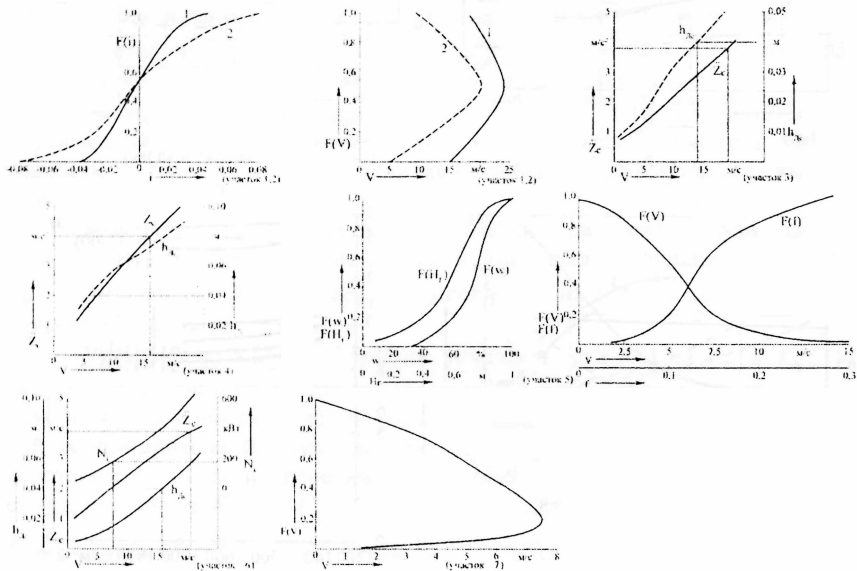


Рис. 11.

Разработана методика оценки эффективности движения многоосной колесной машины в дорожно-грунтовых условиях заданного региона эксплуатации. Эталонный расчетный маршрут разработан на примере ДГУ, характеризующихся грунтом - суглинок и представлен семью характерными участками.

Характеристика участков. Протяженность участков и дорожно-грунтовые условия каждого участка заданы в вероятностной форме. Методики определения максимально возможной скорости движения на участках разные и зависят от деформативных свойств опорной поверхности и ее неровности. Интегральные функции распределения скоростей $F(V)$, средне-квадратических значений динамического хода подвески $h_{де}$ и вертикальных виброускорений $\ddot{Z}_c$ в зависимости от скорости движения для рассматриваемого автомобиля 8х8 на каждом из участков маршрута представлены на рис. 12, а, б, в, г, д, е, ж, з.

На участке 1 скорость определяется из уравнения мощностного баланса автомобиля. На остальных шести участках по специальным разработанным методикам. Средняя вероятностная скорость движения на маршруте определена с учетом возможной вариативности характера траектории и типов дорожно-грунтовых условий по формуле (5).



$F(i)$, $F(V)$, $F(W)$, $F(H_r)$, $F(f)$ – интегральные функции распределения уклонов, скорости, влажности, толщины мягкого слоя, коэффициента сопротивления качению соответственно;

N_k – мощность, потребная для движения.

Номер участка эталонного маршрута, N	Характеристика поверхности участка	Относительная протяженность, $P(N)$
1	Дорога с твердым покрытием, ровная	0,3
2	Грунтовая дорога, ровная	0,05
3	Дорога с твердым покрытием, неровная	0,3
4	Грунтовая дорога, неровная	0,2
5	Грунтовая поверхность, ровная (грунт суглинок)	0,1
6	Грунтовая поверхность, неровная	0,025
7	Криволинейные участки грунтовых поверхностей, ровные	0,025

Рис. 12.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В диссертационной работе на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований осуществлено решение научной проблемы, имеющей важное научно-практическое и народно-хозяйственное значение, связанное с оценкой проходимости многоосных колесных машин при их движении по неоднородным по площади, неровным грунтовым поверхностям с изменяющейся траекторией движения и позволяющей осуществлять выбор основных конструктивных параметров шасси на стадии проектирования с учетом конкретных дорожно-грунтовых условий района эксплуатации.
2. Разработан новый вероятностный метод формирования баз данных по физико-механическим характеристикам грунтов конкретных регионов с помощью агрометеорологических ежегодников, агрогидрологических справочников, почвенных и топографических карт и технических источников информации.
3. Предложен новый метод определения механических характеристик суглинистых грунтов в зависимости от их влажности и плотности.
4. Разработана методика оценки деформации грунта при суммарном действии нормальной, продольной и боковой нагрузок, учитывающая влияние времени их действия и цикличности нагружения. Предложена зависимость изменения плотности грунта от количества нагружений.
5. Разработан метод оценки взаимодействия многоосного колесного движителя с ровным деформируемым грунтом, с использованием универсальной методики оценки взаимодействия колеса с грунтом с учетом скорости движения КМ, изменения инвариант грунта под колесом в зависимости от номера оси.
6. Экспериментально (проведением натурных испытаний в полевых условиях) проверена адекватность расчетных моделей оценки деформативных свойств грунта с помощью физико-механических характеристик совместно с оценкой проходимости полноприводных колесных машин. Разница расчетных и экспериментальных значений для четырех типов КМ по глубине колеи с учетом номера оси не превышает 10%, а по максимально возможной скорости движения 20%.
7. Разработана методика оценки проходимости многоосной колесной машины по неровной грунтовой поверхности, деформативные свойства которой заданы независимыми физико-механическими характеристиками. Эта методика может стать базовой при выборе оптимальных параметров колесной машины для конкретного региона использования.
8. Установлено, что на грунтах с большой толщиной мягкого слоя ($H_r > 0,5\text{м}$) в результате действия колебаний машины средние значения глубины колеи и сопротивления качению увеличиваются, при малой толщине ($H_r < 0,25\text{м}$) уменьшаются. При одинаковом уровне неровностей значения параметров колебаний машины на мягком грунте меньше чем на твердой по-

верхности, эта разница существенно зависит от влажности грунта и толщины мягкого слоя.

9. Получены количественные значения влияния конструктивных параметров ТС на параметры взаимодействия колес с грунтом и колебания машины. Наибольшее влияние оказывают: внутреннее давление воздуха в шинах P_w и сопротивление амортизаторов. В рассмотренных примерах при снижении давления в шинах с 0,3 МПа до 0,05 МПа суммарная глубина колеи уменьшается на ровной поверхности - с 0,35 м до 0,13 м, а на неровной - с 0,42 м до 0,14 м, что в процентах составляет 60% и 67% соответственно. Относительные виброускорения $\frac{\ddot{z}}{q_0}$ на передней оси при снижении давления в шинах с 0,3 МПа до 0,05 МПа уменьшаются на 27%, при этом относительные деформации шины увеличиваются на 65%, а коэффициент свободной тяги ψ_T увеличивается на 23%.

При увеличении сопротивления амортизаторов с $3000 \frac{H \cdot c}{M}$ до $12000 \frac{H \cdot c}{M}$ снижение значений по глубине колеи z , коэффициенту сопротивления качению f и среднеквадратическим виброускорениям составляет 45%, 20% и 40% соответственно. Меньшее, но заметное влияние на параметры взаимодействия оказывают: жесткость подвески, параметры шины, число осей и схема расстановки осей по базе.

10. Разработана методика, позволяющая на стадии проектирования, проводить оценку статической поворотливости многоосной колесной машины при криволинейном движении на грунте с учетом: типа механической трансмиссии с любыми линейными и нелинейными характеристиками механизмов в узловых точках; затрат энергии на боковой сдвиг шины относительно грунта, на боковое смятие грунта, на трение боковин шины о грунт, на дополнительное увеличение глубины колеи и на боковую деформацию шины.

11. Установлено влияние типа грунта и его физического состояния на показатели эффективности при криволинейном движении многоосной колесной машины МАЗ 543. При снижении плотности от максимального значения на 35%, увеличении глубины H_f на 76% и увеличении влажности на 75%, N_{II} растет в среднем на 50...57%, а критерий эффективности при повороте K_N растет на 40...56%. Эффективность криволинейного движения ниже всего на песке. При снижении плотности песка, на 23% от максимальной, расчетные значения R_{II} , N_{II} и K_N растут на 17%, 75%, 78% соответственно.

12. Предложено оценивать эффективность колесной машины в районе предполагаемой эксплуатации с помощью расчетного эталонного маршрута. Разработана соответствующая методика. Участки маршрута с определенной относительной протяженностью подразделяются в зависимости от типа дорожно-грунтовой поверхности, степени неровности, пересеченности, параметров грунта. Каждый участок представляется статистическими характеристиками.

Критерием эффективности КМ является средняя вероятностная скорость движения на каждом участке и вероятностная скорость движения на маршруте.

Публикации

Основные положения диссертации отражены в 30 печатных и 5 рукописных работах. В том числе 2 монографии и 10 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 учебных пособий и авторское свидетельство.

1. Вольская Н.С. Оценка проходимости колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности: Монография. – М.: МГИУ, 2007. – 215 с.
2. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Динамика колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности. – М.: МГИУ, 2003. – 124 с.
3. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Приспособленность автомобиля к дороге и его эффективность // Автомобильная промышленность. - 1987. - № 8. - С. 15 – 18.
4. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Особенности движения колесных машин по неровным грунтовым поверхностям // Автомобильная промышленность. - 2004. - № 6. - С. 22 - 24.
5. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Моделирование движения автомобиля по мягким грунтам: проблемы и решения // Автомобильная промышленность. - 2004. - № 10. - С. 24 - 25.
6. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Проблемы представления характеристик грунтов в математических моделях движения колесных машин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2005. - № 1. - С. 44 - 53.
7. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Параметры ходовой части, проходимость и плавность хода // Автомобильная промышленность. - 2005. - № 9. - С. 20 - 23.
8. Вольская Н.С., Игнатушин А.П. Модель поворота многоосной колесной машины на грунте // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Машиностроение», 2005. - № 4 - С. 81 - 91.
9. Вольская Н.С. Вероятностно-статистический метод расчетов проходимости колесных машин // Автомобильная промышленность. - 2006. - № 7. - С. 33 - 35.
10. Дополнительный бесконтактный движитель как средство повышения проходимости колесной машины / Я.С.Агейкин, Н.С. Вольская, А.В. Соловьев и др. // Автомобильная промышленность. - 2008. - № 2. - С. 15 - 16.
11. Вольская Н.С. Влияние грунтовой поверхности и параметров многоосных колесных машин на критерии эффективности при криволинейном движении // Машиностроение и инженерное образование. – М.: МГИУ, 2008. - № 2. – С. 18 – 26.
12. Вольская Н.С., Агейкин Я.С., Ястребов Г.Ю. Оценка деформируемости свойств грунтов при расчете проходимости колесных и гусеничных тракторов // Сборник трудов АПИ. – Барнаул: АПИ, 1989. – С. 106 – 112.
13. Вольская Н.С., Аржанухин Г.В. О дорожном просвете и продольном радиусе проходимости автомобиля // Теория, проектирование и испытание автомобиля. – М.: МАМИ, 1982. – Вып. I. – С. 29 - 35.
14. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Динамика движения колесной машины по неровным дорогам: учебное пособие. – М.: МГИУ, 2003. – 36 с.
15. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Теория автомобиля. Оценка эксплуатационных свойств автомобиля на компьютере: Учебно-методическое пособие. Гриф УМО. – М.: МГИУ, 2005. – 32 с.

16. Вольская Н.С., Агейкин Я.С., Туранский Б.В. Статика и динамика автомобильного колеса: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2005. – 48 с.
17. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Теория автомобиля: Учебное пособие. Гриф УМО. – М.: МГИУ, 2008. – 320 с.
18. Вольская Н.С. Проблемы моделирования движения колесной машины по деформируемым грунтам // Автомобили. Сборник трудов. Выпуск 237. – М.: Изд. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2007. – С. 174 – 177.
19. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Выбор основных параметров движителя и трансмиссии автомобилей повышенной и высокой проходимости // Материалы Всесоюзного научно-техн. совещания «Динамика и прочность автомобиля», окт. 1984г. - М.: МАДИ, 1984. - С. 125 – 130.
20. Вольская Н.С. Лучшая приспособленность конструкции автомобиля к конкретным дорожным условиям эксплуатации – путь к повышению его эффективности // Материалы II Всесоюзного научно-техн. совещания «Динамика и прочность автомобиля», окт. 1986г. - М.: МАДИ, 1986. - С. 233 - 239.
21. Вольская Н.С. Методика представления характеристик грунтовых поверхностей для выбора оптимальных параметров движителя // Международный симпозиум «Проектирование колесных машин», посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. 21-22 марта 2005 г. Доклады. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. - С. 45 - 49.
22. Вольская Н.С. Оценка проходимости колесной машины по грунтовым поверхностям с известными статистическими характеристиками грунта и неровностей // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Механизмы внедрения новых направлений науки и технологий в системы образования». – М.: ГОУ МГИУ, 2004. – С. 113 – 118.
23. Вольская Н.С., Чичекин И.В. Методика расчета показателей проходимости колесной машины при движении по неровным грунтовым поверхностям // Международный симпозиум «Проектирование колесных машин», посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. 21-22 марта 2005 г. Доклады. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. - С. 38 - 44.
24. Вольская Н.С., Чичекин И.В. Влияние параметров колес и подвески на проходимость колесных машин при движении по неровным грунтовым поверхностям // сборник научных трудов 64 Научно-методической и научно-исследовательской конференции. – М.: МАДИ (ГТУ), 2006. – С. 35 – 39.
25. Вольская Н.С., Чичекин И.В. Влияние неровности грунта на показатели проходимости колесных машин // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса». – Екатеринбург: УГТУ, 2008. - С. 48 – 51.
26. Вольская Н.С., Макашев Т.К., Ширяев К.Н. Математическая модель криволинейного движения многоосной колесной машины на грунте // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса». – Екатеринбург: УГТУ, 2008.- С. 51 – 53.
27. Авторское свидетельство II 98373 А, МКИ G 01 В 5/28. Установка для скоростного определения параметров проходимости естественных грунтовых поверхностей транспортными машинами, (ее варианты) / Вольская Н.С., Агейкин Я.С. (СССР). - № 3789269/29-33; Оpubл. 15.12.85, Бюл. № 46. – 2с.: ил.

ВОЛЬСКАЯ НАТАЛЬЯ СТАНИСЛАВОВНА

У1846252

Вольская Н.С.

Разработка методов расчета
опорно-тяговых

ОПОРНО-ТЯГОВЫХ

ЛИН ПО ЗАДАНЫМ

ДОРОЖИ характеристик колесных
машин по заданным дорож...
2008 0-00

УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

1846252

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока
