

На правах рукописи

**НОСОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕСНЫХ, ГУСЕНИЧНЫХ И ДОРОЖНЫХ  
МАШИН С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ОПОРНЫМ ОСНОВАНИЕМ  
(НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ)**

Специальности 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

05.05.04 – Дорожные, строительные и

подъемно-транспортные машины

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Липецкий государственный технический университет"

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор

РОСЛАВЦЕВ  
Анатолий Васильевич

- доктор технических наук, профессор

КУЗЬМИЧЕВ  
Виктор Алексеевич

- доктор технических наук, профессор

МАЛЕНКОВ  
Михаил Иванович

Ведущая организация

ОАО "СПЕЦМАШ" (Санкт-Петербург)

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.24 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, I уч. корп., ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент

Бортяков Д.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Традиционный подход к проектированию колесных, гусеничных и дорожных машин (КГДМ), базирующийся на стремлении к реализации максимальных эксплуатационных качеств, но не учитывающий должным образом особенности взаимодействия машин с внешней средой, способствует развитию энергонасыщенной техники, параметры и режимы работы которой не всегда в состоянии обеспечить экологическую безопасность, нормальное взаимодействие с опорным основанием. Это приводит, например, к переуплотнению, недоуплотнению или разрушению сплошности опорного основания в зависимости от вида выполняемых работ, повышенному буксованию и, в конечном счете, к неэффективной работе.

Рассматриваемая проблема может быть решена путем применения новых прогрессивных методов изучения физико-механических свойств опорного основания, например, использованием одного из традиционных подходов к исследованию реологических свойств деформируемых сред с применением теории наследственной ползучести упруго-вязко-пластичных материалов. Без этого невозможно объективно оценить как характер динамических связей в работе исследуемого объекта, в частности связей между механизмами и системами КГДМ, так и характеристики общей взаимодействующей динамической системы "человек – машина – рабочий орган – объект воздействия – окружающая среда".

Основное внимание диссертации уделено исследованию динамики процессов взаимодействия ходовых систем КГДМ со слоем опорного основания, что позволяет вывести развитие и применение прогрессивных моделей техники на более высокий уровень, поскольку реологические характеристики деформируемого опорного основания имеют прямую связь с характером силового воздействия на него. В свою очередь, характер силового воздействия на опорное основание определяется техническими и эксплуатационными характеристиками КГДМ. При этом необходимо учитывать нелинейность реологических свойств деформируемого опорного основания, а также наличие фактора времени, определяющего продолжительность действия и интенсивность изменения нагрузки на опорное основание со стороны движителей КГДМ.

Вышеотмеченное подтверждает, что тема диссертационного исследования является актуальной и направлена на решение важной научной проблемы определения оптимальных параметров машин с учетом их взаимодействия с деформируемым опорным основанием.

**Цель работы** - разработка методологических основ выбора режимов работы и параметров колесных, гусеничных и дорожных машин, позволяющих повысить эффективность функционирования существующих и прогнозировать показатели работы новых высокоэффективных машин на

основе учета реологии и несущей способности опорного основания, времени и характера действующих на него нагрузок.

Указанная цель определила перечень **основных задач исследований**, согласно которому необходимо было осуществить следующее.

1. Определить критерии эффективности взаимодействия ходовых систем КГДМ с деформируемым опорным основанием.
2. Разработать теоретические положения взаимодействия КГДМ с деформируемым опорным основанием.
3. Разработать модели процессов взаимодействия КГДМ с деформируемым опорным основанием, позволяющие произвести качественную и количественную оценку изменения напряженно-деформированного состояния, оценить кинетику развития деформаций опорного основания при различных законах его нагружения.
4. Разработать способы и методики оценки основных характеристик опорного основания как функционалов от временного фактора, определяющих его деформационную способность, тяговую динамику КГДМ и динамическую нагруженность их отдельных систем.
5. Произвести эксплуатационную оценку физико-механических характеристик опорного основания различного типа – почвы, грунтов, снега, дорожно-строительных материалов и т.п.
6. Разработать технические средства, позволяющие оперативно производить оценку физико-механических характеристик опорного основания или повышать эффективность функционирования КГДМ.
7. Теоретически и экспериментально обосновать технологические режимы работы КГДМ, а также их основные параметры.
8. Разработать методы и рекомендации по выбору режимов работы и параметров КГДМ при учете реологических свойств опорного основания, времени и характера действующих на него нагрузок.

**Объектом исследований** являются колесные, гусеничные и дорожные машины, динамика процессов взаимодействия их ходовых систем с деформируемым опорным основанием, методы выбора режимов работы и параметров КГДМ.

**На защиту выносятся** наиболее существенные результаты диссертационного исследования, составляющие **научную новизну** работы:

1. Концепция выбора параметров и режимов работы КГДМ, позволяющая на основе развития реологии опорного основания, анализа полученных представлений об изменяющихся свойствах опорного основания, интенсивности изменения и времени действия на него нагрузок со стороны движителей машин, а также с учетом конструктивных особенностей машин проводить корректировку процесса выбора режимов работы и параметров КГДМ;
2. Методологический подход к оценке реологических характеристик деформируемого опорного основания КГДМ и методы их определения на основе четырехмерных пространственно-временных представлений, позволившие выйти на определение коэффициента попе-

речной деформации и модулей сдвиговых и линейных деформаций слоя опорного основания;

3. Развитие общей теории взаимодействия с деформируемым опорным основанием движителей КГДМ, позволяющее определять деформации слоя опорного основания и значения плотности его материала с учетом интенсивности изменения и продолжительности действия со стороны ходовых систем КГДМ нагрузок, а также распределения напряжений в слое опорного основания в соответствии с релаксационными процессами. Математические модели частных случаев взаимодействия жесткого вальца, пневматического колеса и гусеничного движителя получаются из общего решения путем подстановки соответствующих значений параметров моделей, что служит методической основой для достоверной оценки показателей взаимодействия.
4. Развитие теории, математические модели и методы оценки тяговой динамики, виброколебаний и плавности хода КГДМ, динамической нагруженности их трансмиссий с учетом реологических характеристик опорного основания, позволяющие количественно оценить эксплуатационные свойства КГДМ, их режимы работы и параметры;
5. Методы выбора режимов работы и параметров КГДМ, основную роль в формировании которых играет взаимозависимость реологических характеристик опорного основания и параметров и режимов работы КГДМ, определяемые на основе концепции и математических моделей, позволяющих производить решения поставленных задач на базе предложенных критериев оптимальности.

**Методы исследований.** В теоретических исследованиях решение поставленных задач базируется на основных положениях аналитической механики, механики сплошных сред, теории упругости и вязкопластичности, теории наследственной вязкоупругости, тензорного исчисления, математической статистики, численных методах решения систем дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, методах математического моделирования и оптимизации параметров, теории уплотнения грунтов и дорожно-строительных материалов и широком использовании ЭВМ. Экспериментальные исследования проводились с применением теории математического планирования эксперимента, методов физического моделирования, с использованием ЭВМ, на серийно выпускаемых машинах, макетных и экспериментальных образцах, установках, устройствах и стендах.

**Достоверность научных положений, результатов, выводов и рекомендаций** обоснована использованием апробированных методов механики сплошных сред, теорий упругости и вязкоупругости, математической статистики, оптимизации, анализа размерностей и планирования эксперимента; правильным выбором методов измерений и составлением измерительных схем; правильным выбором методов и техники тарировки измерительных систем в целом и отдельных их элементов, класса точности аппаратуры и своевременной ее поверкой; правильным учетом погрешностей элементов измерительных схем, методов измерений и обеспечением тех-

нически правильных условий работы измерительных устройств; результатами сопоставления теоретических исследований с данными экспериментов в лабораторных и производственных условиях и их удовлетворительным совпадением.

**Научная значимость работы** заключается:

- в разработке целенаправленного подхода к созданию новых высокоэффективных КГДМ или к применению существующих КГДМ с уточненными режимами работы в соответствии с основными критериями, определяющими эксплуатационные свойства КГДМ и качество выполнения работ на основе методологии и теории описания процессов взаимодействия движителей КГДМ с опорным основанием с учетом реологических свойств его материала;
- в развитии теории и создании ряда новых моделей и методов по оценке эффективности взаимодействия КГДМ с деформируемым опорным основанием, включая оценку эффективности функционирования отдельных систем КГДМ;
- в разработке методов выбора параметров и режимов работы КГДМ на деформируемом опорном основании.

**Практическая ценность работы.** Результаты исследований позволяют лучше понять сущность процессов, происходящих при взаимодействии КГДМ с деформируемым опорным основанием, а также определять пути повышения эффективности работы машин.

Обоснован системный подход к решению проблем взаимодействия КГДМ с деформируемым опорным основанием в рамках пространственно-временных представлений, что дает возможность выявлять эффективные направления исследований и рассматривать на практике различные задачи с единых методологических позиций.

Предложенные рекомендации, математические модели и методы, реализованные в виде пакета программ для ЭВМ, позволяют как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации выбирать рациональные параметры и режимы работы КГДМ, подбирать наиболее пригодную технику для выполнения работ в конкретных условиях эксплуатации.

Предложены способы и созданы устройства для оценки реологических характеристик почвогрунтов и для повышения эффективности работы дорожных катков.

**Реализация результатов работы.** Основные результаты работы:

- Внедрены при укатке верхнего и нижнего слоев асфальтобетонного покрытия в объеме 41 км с использованием виброкатка ДУ-47А с вакуумным устройством на объектах объединения "Ленавтодор" в 1984-1985 годах;
- Переданы в виде сборочных и рабочих чертежей виброкатка с вакуумным устройством на базе серийно выпускаемого катка ДУ-54А в объединение "Ленавтодор" для изготовления опытной партии катков;
- Переданы в виде сборочных и рабочих чертежей бесконтактной вакуумной камеры к дорожным каткам в ЗАО "РАСКАТ";

- Внедрены в ОАО "Липецкий трактор" в виде рекомендаций по проектированию липецких тракторов, программ расчета на ЭВМ и номограмм по оценке эффективности их взаимодействия со слоем почвы;
- Внедрены в ЗАО "Агродело" в виде использования установки динамического нагружения по оценке реологических свойств почвогрунтов (Патент РФ № 2192006), в виде рекомендаций по выбору подходящей сельскохозяйственной техники с использованием программ на ЭВМ и построенных номограмм по оценке эффективности ее взаимодействия со слоем почвы;
- Используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 1902.00 "Автомобиле- и тракторостроение" в Липецком государственном техническом университете;
- Представлены научно-учебной монографией "Мобильные энергетические средства: выбор параметров и режимов работы через реологические свойства опорного основания", изданной в 2006 году, и учебным пособием "Современные методы исследований", изданным в 2000 году в издательстве ЛГТУ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на **двадцати одной** конференции, в том числе на 13 международных научных конференциях (г. Москва, 1996, 2005гг.; г. Калининград, 1997г.; г. Липецк, 1997, 1998гг.; г. Волгоград, 1999, 2002, 2005гг.; г. Курск, 1999г.; г. Тюмень, 1999г.; г. Н. Новгород, 2000г.; г. С.-Петербург, 2006г.), на Международном симпозиуме (г. Москва, 2000г.), на Всесоюзной научной конференции (г. Норильск, 1990г.), на 5 всероссийских научных конференциях (г. Липецк, 1996, 2000гг.; г. Пенза, 2001г.; г. Екатеринбург, 2007, 2008гг.), на Республиканской научно-технической конференции (г. С.-Петербург, 1992г.).

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 16 научных статей в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций результатов исследований докторских диссертаций; монография; учебно-методическое пособие; 8 депонированных рукописей работ, аннотированных в научных журналах; 29 работ в сборниках материалов всесоюзных, всероссийских и международных конференций и симпозиумов. Всего опубликовано 84 печатных работы. Получено 6 авторских свидетельств и патентов на изобретения и зарегистрировано 23 программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов, библиографического списка из 314 наименований, восьми приложений. Общий объем работы 480 страниц, из них основной текст изложен на 322 страницах, 117 рисунков и 16 таблиц на 86 страницах, библиографический список на 30 страницах, 8 приложений на 37 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, основные задачи исследований, результаты исследований, составляющие научную новизну.

**В первой главе** проведенный анализ работ по взаимодействию двигателей КГДМ с опорным основанием, связанных с исследованием уплотняющей способности, тягово-скоростных свойств, плавности хода, проходимости, динамической нагруженности трансмиссии, а также обзор научно-технической литературы по теории автотракторной, дорожно-строительной и специальной техники показывает, что все эксплуатационные свойства КГДМ, независимо от их типа и характера использования, в первую очередь зависят от параметров взаимодействия двигателя с опорным основанием.

В работе определены основные классификационные признаки нагружения опорного основания элементами ходовых систем КГДМ: закономерность основного (вертикального) нагружения, режим движения, число циклов воздействия ходовых систем КГДМ на опорное основание и характер нагружения, определяющий направление (знак) силового воздействия. Установлено, что наиболее целесообразный способ определения функций взаимодействия основывается на получении аналитических зависимостей с использованием четырехмерных математических моделей (включая временное измерение), описывающих напряженно-деформированное состояние опорного основания.

Обзор литературных источников показал, что в различные периоды развития теории разрабатывались и совершенствовались различные методы оценки взаимодействия КГДМ с опорным основанием.

Решением проблемы улучшения показателей взаимодействия КГДМ с опорным основанием занимаются различные институты: ВИМ, НПО НАТИ, ЦНИИМЭСХ, НИИАФИ, ТСХА, УСХА, МГАУ, РАСХН, ВИСХОМ, СПбГАУ, ВНИИстройдормаш, СоюздорНИИ, МАДИ, СибАДИ, СПбГПУ и др.

Большой вклад в решение данной проблемы в разные времена внесли Агейкин Я.С., Анилович В.Я., Анохин А.И., Афанасьев Н.И., Бабков В.Ф., Баловнев В.И., Барский И.Б., Батраков О.Т., Белковский В.Н., Бондарев А.Г., Бойков В.П., Варганов С.А., Васильев А.В., Водяник И.И., Ганькин Ю.А., Горячкин В.П., Гуськов В.В., Докучаева Е.Н., Забродский В.М., Золотаревская Д.И., Зубанов М.П., Иванов Н.Н., Ишлинский А.Ю., Калужский Я.А., Кацыгин В.В., Качинский Н.А., Кононов А.М., Ксенович И.П., Кутьков Г.М., Кушнарев А.С., Ляско М.И., Матюк Н.С., Пигулевский М.Х., Платонов В.Ф., Полетаев А.Ф., Прокопенко Д.Д., Рославцев А.В., Русанов В.А., Скотников В.А., Софиян А.П., Уткин-Любовцов О.Л., Файнлейб А.М., Хабатов Р.Ш., Хархута Н.Я., Чистов М.П., Шестопалов А.А. и др.



Среди зарубежных ученых следует выделить таких как Адамс Е.П., Ангст Х., Беккер М.Г., Вонг Д.Я., Гарботс, Путьк А.И., Тейлор Х.М., Фишер, Форссблад Л., Харрисон И., Хорн Р. и др.

Основная масса работ посвящена решению проблемы улучшения показателей взаимодействия ходовых систем КГДМ с опорным основанием в двух направлениях: повышение тягово-сцепных качеств машин и исследование их уплотняющего воздействия при совершенствовании конструкций КГДМ и их двигателей, рациональном комплектовании машинно-тракторных агрегатов для выполнения работ в различных условиях, выборе рациональных рабочих скоростей, применении блочно-модульного принципа проектирования и т.д.

Многие работы, исходным положением которых является использование подобия действия поступательно перемещающегося деформатора, основываются на различных гипотезах о деформируемости опорного основания элементами двигателей КГДМ.

При исследовании физико-механических свойств опорного основания не ставятся задачи, непосредственно связанные с взаимодействием КГДМ и опорного основания, но рассматриваются отдельные простейшие стороны этого взаимодействия, его физическая суть, основанная на общих законах физики и лежащая в основе больших групп сложных задач, решаемых современной прикладной механикой.

Современные тенденции развития КГДМ, а также накопленный на сегодняшний день багаж научных знаний в области исследований процессов их взаимодействия с опорным основанием позволили откорректировать требования к расчетным моделям опорного основания КГДМ.

Проанализировав выдвинутые требования к расчетной модели опорного основания КГДМ, вытекающие из проблемных ситуаций сегодняшнего дня, в представленной работе предложено использовать один из традиционных подходов к исследованию реологических свойств деформируемых сред с применением теории наследственной ползучести упруго-вязкопластичных материалов, позволяющий выйти на разработку различных математических моделей по выявлению оптимальных параметров и режимов работы КГДМ.

Для описания процесса ползучести применены простейшие соотношения нелинейной теории вязкоупругости, когда уравнение ползучести может быть представлено в виде

$$\varepsilon(t) = \psi[\sigma(t)] + \int_0^t K(t-\tau)\psi(\tau)d\tau, \quad (1)$$

и в этом случае можно говорить о подобии кривых ползучести при различных условиях нагружения. Здесь  $\varepsilon(t)$  - относительная деформация;  $\sigma(t)$  - действующее напряжение;  $K(t-\tau)$  - функция скорости ползучести;  $\psi[\sigma(t)]$  - функция подобия.

Выражение (1) описывает случай подобия кривых ползучести только при разных действующих напряжениях  $\sigma(t) = \text{const}$ . Для полного описания

поведения слоя опорного основания под нагрузкой, соответствующей конкретному характеру взаимодействия ходовых систем КГДМ с опорным основанием, необходимо знать зависимости свойств материала, выражаемые через скорость и величину деформации, от многих факторов, основными из которых могут являться нагрузка, частота колебаний, относительная вынуждающая сила, температура, влажность, толщина и плотность слоя, параметры грунтозацепов и т.д. Поэтому функция подобия должна учитывать все эти факторы, определяющие деформационную способность слоя опорного основания КГДМ и, следовательно, его свойства:

$$\psi = \psi[x_1; x_2; \dots; x_i; \dots; x_n] = \psi[\vec{x}], \quad (2)$$

где  $x_i$  – независимые факторы, определяющие деформационные свойства опорного основания и в совокупности представляющие пространство независимых факторов (факторное пространство).

Отмечено, что вопрос о выборе вида функции влияния при исследовании релаксационных процессов и реологических свойств материалов опорного основания КГДМ на сегодняшний день с новой силой выходит на повестку дня и становится одним из определяющих при выборе параметров и режимов работы указанных мобильных машин.

Удовлетворительное описание процессов релаксации возможно так же, как и описание процесса ползучести, с помощью простого и в то же время достаточно общего слабосингулярного ядра в виде экспоненциально-степенной функции

$$S(t) = A \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot t^{\alpha-1}. \quad (3)$$

Резольвента этого ядра (функция скорости ползучести)

$$K(t) = e^{-\beta \cdot t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[A\Gamma(\alpha)]^n \cdot t^{n\alpha-1}}{\Gamma(n\alpha)}, \quad (4)$$

где  $A, \alpha, \beta$  – параметры ядер ползучести и релаксации;  $\Gamma(\alpha)$  – гамма-функция Эйлера;  $t$  – текущее время.

Обобщив рассмотренный объем научного материала по исследованию развития КГДМ и их взаимодействия с деформируемым опорным основанием, определяющим основные эксплуатационные свойства в процессе работы, выделены основные трудности и недостатки в предлагаемых подходах к решению общей проблемы взаимодействия КГДМ, включая их ходовую часть и другие системы, агрегаты и сборочные единицы, с деформируемым опорным основанием.

Сделан вывод о том, что нет обобщающих моделей и подхода к решению обозначенной проблемы относительно КГДМ, так как многие процессы и машины, относящиеся к ним, однородны и подобны.

Проведенный автором анализ научной литературы по теме диссертации позволил выявить пути дальнейшего совершенствования теории взаимо-

действия КГДМ и их отдельных систем с деформируемым опорным основанием и сформулировать цель и задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрены принципы выбора параметров и режимов работы КГДМ. Рассмотрев взаимоувязанную систему "человек – машина – рабочий орган – объект воздействия – окружающая среда", можно констатировать, что эксплуатационные свойства КГДМ, определяемые их параметрами и режимами работы, в определенной степени зависят от характеристик опорного основания, и наоборот, характеристики опорного основания зависят от режимов работы и параметров применяемых КГДМ.

Разработана общая схема выбора параметров и режимов работы КГДМ, отражающая достаточно тесные взаимные связи между реологическими свойствами опорного основания, параметрами и режимами работы КГДМ и процессом их выбора с учетом особенностей взаимодействия КГДМ с опорным основанием. При переходе от одного уровня проектирования к другому приобретаются дополнительные знания о параметрах и режимах работы КГДМ, изменившихся свойствах опорного основания, что позволяет на основе анализа полученных представлений проводить корректировку процесса выбора параметров и режимов работы КГДМ с учетом особенностей их взаимодействия с опорным основанием, оценивать целесообразность выбора следующего шага.

Разработана концептуальная модель выбора параметров и режимов работы КГДМ, обладающая свойством технологической инвариантности, т.е. позволяющая выполнять нисходящее, восходящее или смешанное, ручное, автоматизированное или интерактивное проектирование. Концептуальная модель позволяет производить решения задачи выбора оптимальных параметров и режимов работы КГДМ, начиная от начального состояния процесса и переходя к их множеству, на основе критериев оптимальности. Модель отражает динамику процесса выбора параметров и режимов работы КГДМ, при этом время остается независимым параметром.

Предложен методологический подход к оценке параметров деформируемого опорного основания, базирующийся на исследовании реологических характеристик через отдельные простейшие стороны его взаимодействия с ходовыми системами КГДМ, при этом физическая суть этого взаимодействия базируется на общих законах физики и лежит в основе больших групп сложных задач, решаемых современной прикладной механикой.

Показано, что при моделировании процесса нагружения опорного основания посредством плоского штампа имеется реальная возможность перехода к описанию процесса деформирования при взаимодействии его с различными ходовыми системами КГДМ. Уравнения сдвигов и объемного деформирования, включающие компоненты тензоров деформаций и напряжений, представленные в матричном виде, а также функции скоростей сдвиговой и объемной ползучести, позволяют определить коэффициент поперечной деформации через функции объемной и сдвиговой ползучести при деформировании опорного основания КГДМ посредством штампа, когда имеется возможность определить функции скоростей продольной и

поперечной ползучести. При этом расчетные значения параметров материала опорного основания – модули сдвиговой и линейной деформации, а также коэффициент поперечной деформации, - инвариантны к методам их определения для получения моделей, пригодных для моделирования взаимодействия КГДМ и их систем с опорным основанием.

Рассматривая процесс взаимодействия опорного основания, обладающего ярко выраженными реологическими свойствами и характеризующегося небольшим промежутком времени (порядка одной секунды или менее) взаимодействия с ходовыми системами КГДМ, следует особенно осторожно подходить к оценке коэффициента поперечной деформации опорного основания. Произвести достаточно корректную оценку коэффициента поперечной деформации в пределах долей секунды можно только путем применения соответствующих методик, основанных на непосредственном привлечении фактора времени. В настоящее время одним из перспективных методологических подходов в этом направлении является подход, основанный на привлечении теории наследственного деформирования упруго-вязко-пластичных материалов.

Таким образом, по измеренным величинам продольной и поперечной деформаций можно построить функции продольной и поперечной ползучести, зная которые нетрудно получить функции сдвиговой и объемной ползучести.

На основе использования нелинейной теории наследственной ползучести упруго-вязко-пластичных материалов выявлена взаимосвязь между развивающейся деформацией и основными законами нагружения слоя опорного основания КГДМ, которые с достаточной степенью точности можно заметить на прямоугольный, трапециевидный и треугольный (рис. 1).

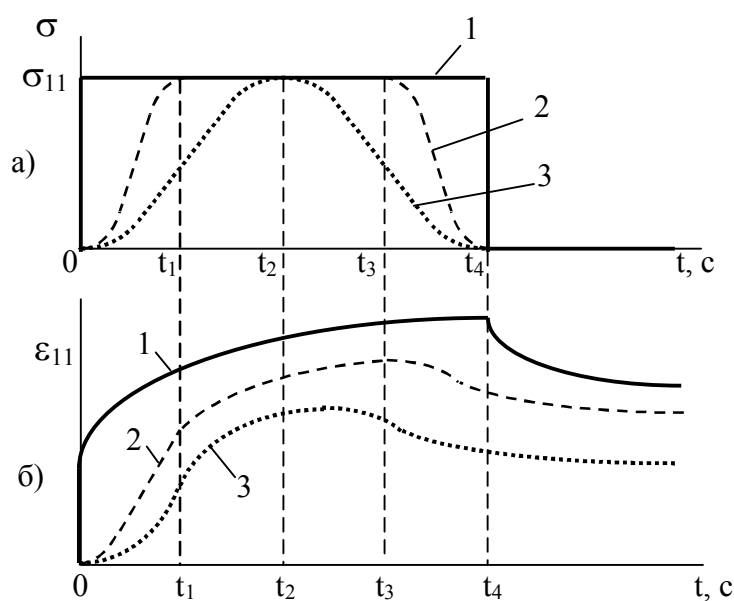


Рис. 1. Законы нагружения (а) и развития полной деформации (б) слоя опорного основания КГДМ

Так, например, если под гусеничным движителем принять равномерное распределение вертикальных контактных давлений (линия 1 на рис.

1,а), то развитие полной деформации вычисляется по закону (линия 1 на рис. 1,б)

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} \left[ \sigma(t) + \int_0^{t_4} K_{11}(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau \right] = \frac{\sigma_{11}}{E} \left[ 1 + \int_0^{t_4} K_{11}(t-\tau)d\tau \right]. \quad (5)$$

Если при взаимодействии слабо накаченного пневматического колеса с деформируемым опорным основанием при свободном режиме качения, когда результирующее воздействие колеса на слой почвогрунта представляется нормальной к направлению движения силой, закон изменения вертикальной нагрузки на слой со стороны движителя представляет собой сплюснутую параболу (линия 2 на рис. 1,а), то с определенной степенью точности его можно заменить трапецевидным законом нагружения. Приняв  $t_l = t_4 - t_3$ , для полной деформации имеем (линия 2 на рис. 1,б)

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E \cdot t_1} \left( \int_0^{t_1} K_{11}(t-\tau)\tau d\tau + t_1 \int_{t_1}^{t_3} K_{11}(t-\tau)d\tau + t_4 \int_{t_3}^{t_4} K_{11}(t-\tau) \left(1 - \frac{\tau}{t_4}\right) d\tau \right). \quad (6)$$

При взаимодействии жесткого или накаченного колеса можно принять параболический закон действия вертикальных контактных давлений в зоне их максимума (линия 3 на рис. 1,а). Тогда с определенной степенью точности его можно заменить треугольным законом нагружения. Приняв  $t_2 = t_4/2$ , для полной деформации имеем (линия 3 на рис. 1,б)

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E \cdot t_2} \left( \int_0^{t_2} K_{11}(t-\tau)\tau d\tau + t_4 \int_{t_2}^{t_4} K_{11}(t-\tau) \left(1 - \frac{\tau}{t_4}\right) d\tau \right). \quad (7)$$

При этом мгновенный модуль деформации

$$E = \frac{0}{\chi_k[\vec{x}] \cdot \varepsilon(t) / \sigma_{11}}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{11}$  – вертикальная относительная деформация слоя;  $\varepsilon(t)$  – вертикальная относительная деформация слоя при любом времени  $t$  и ступенчатом законе нагружения (законе Хевисайда);  $\sigma_{11}$  – максимальное давление под движителем;  $K_{11}(t-\tau)$  – функция скорости вертикальной ползучести;  $t_1, t_2, t_3$  и  $t_4$  – моменты времени, при которых происходит скачок скорости нагружения слоя опорного основания при различных законах нагружения;  $\tau$  – текущее значение времени;  $\chi_k[\vec{x}]$  – функция подобия базовой и любой другой кривой ползучести.

Для наиболее общего случая, когда материал опорного основания КГДМ работает в условиях сложного напряженного состояния, компоненты  $\varepsilon_{ij}(t)$  тензора деформаций  $e_{ij}(t)$  определяются каждый в отдельности в соответствии с особенностями развития деформаций в каждом направлении и закономерностями изменения соответствующей составляющей нагрузки со стороны движителей КГДМ. Главные деформации, определяю-

щие объемную деформацию, находятся из известного кубического уравнения, коэффициентами которого являются инварианты деформированного состояния.

Предложена целевая функция, содержащая обобщенный критерий эффективности функционирования КГДМ. Данный критерий представлен в виде удельных компонент тензора деформаций по отношению к обобщающему функционалу, включающему основные параметры общей взаимосвязанной системы "человек – машина – рабочий орган – объект воздействия – окружающая среда", определяющие эффективность работы КГДМ. При этом минимальное или максимальное значение обобщенного критерия определяется видом и типом КГДМ, характером и условиями его эксплуатации. Предложена также система частных критериев, принимаемых на основе учета реологических свойств опорного основания и представляющих собой обобщенный критерий, реализуемый по отдельным параметрам и режимам работы КГДМ, параметрам состояния опорного основания, а также по временному фактору. Система критериев эффективно обобщает возможные типы связей между реологическими свойствами опорного основания, параметрами, режимами работы КГДМ и процессом их выбора. По отношению к ним устанавливает требования к оптимизации значений искомых величин.

На основе описания и анализа постановок задач выбора параметров и режимов работы КГДМ предложена **концепция** выбора параметров и режимов работы колесных, гусеничных и дорожных машин в иерархических средах системы "человек – машина – рабочий орган – объект воздействия – окружающая среда" на основе развития реологии опорного основания. При этом выделено четыре типа сред: методологическая, технологическая, программная и информационная, а сам термин "среда" обозначает множество приемлемых вариантов решений, из числа которых следует выбрать наиболее подходящий.

**В третьей главе** проведены теоретические исследования взаимодействия ходовых систем КГДМ с опорным основанием.

Установлено, что развитие деформаций от вибрационной и статической нагрузок протекает по различным законам, что объясняется физической природой их развития. На первом этапе цикла нагружения скорость деформации уплотняемого слоя опорного основания при статической нагрузке выше, чем при вибрационной нагрузке, что объясняется превосходящим влиянием увеличенной массы статического рабочего органа (или штампа) по сравнению с вибрационным рабочим органом меньшей массы. На последнем этапе цикла нагружения, когда проявляется превосходящий эффект вибрационного рабочего органа с меньшей массой над статическим уплотнением рабочим органом повышенной массы, скорость развития деформации под последним будет меньше. Обратимая часть деформации при виброуплотнении имеет меньшую величину по сравнению с обратимой деформацией при статическом нагружении в силу меньшего сопро-

тивления упругих сил, возникающих в уплотняемом материале со стороны минеральных частиц (рис. 2).

Оценку относительной эффективности вибрационного и статического воздействий на уплотняемый материал опорного основания по контактными давлениям следует проводить с учетом равенства необратимых деформаций за один цикл нагружения.

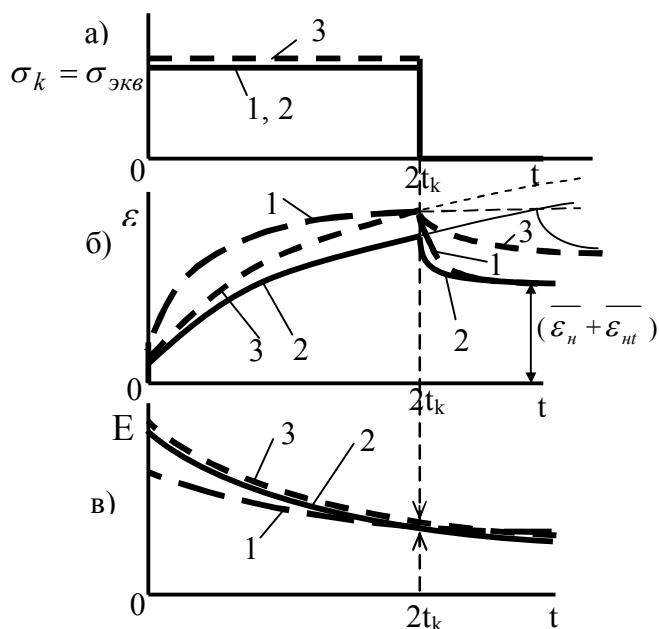


Рис. 2. Диаграммы развития контактных давлений (а), деформаций (б) и модулей деформации (в) во времени при равномерном нагружении слоя опорного основания:

- 1- статическая нагрузка;
- 2, 3 - вибрационная нагрузка

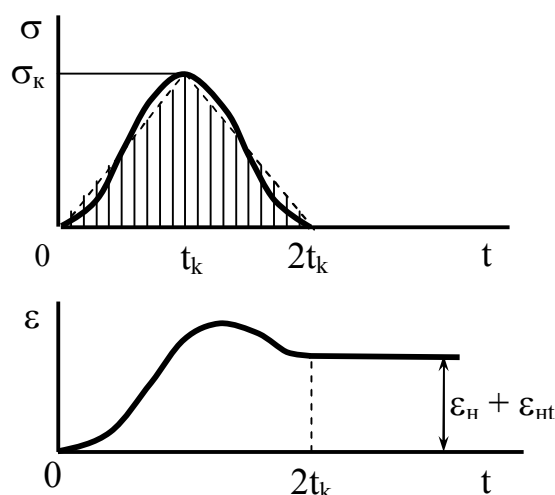


Рис. 3. Диаграммы изменения напряжений и деформаций за один проход вальца катка

Условие равенства скоростей деформаций не может служить критерием при оценке относительной эффективности воздействия статической и вибрационной нагрузок.

При исследовании взаимодействия жесткого вальца со слоем опорного основания на основе разработанной математической модели процесса предложен метод расчета параметров и режимов работы статических и вибрационных гладковальцовых катков, учитывающий изменение физико-механических характеристик уплотняемого слоя, контактных давлений под вальцом во времени и включающий определение предела прочности слоя опорного основания в зависимости от его параметров состояния; расчет рациональных значений максимальных контактных давлений под вальцом статического катка; определение времени воздействия вальца на уплотняемый слой (зная радиус, ширину вальца, скорость движения катка); определение коэффициента эффективности виброкатка, его линейного давления и массы из условия равенства необратимых деформаций слоя опорного основания после прохода статического и вибрационного вальца

(по параметрам вибрации – частоте колебаний и относительной вынуждающей силе).

Для статической нагрузки с учетом функций подобия

$$(\varepsilon_H + \varepsilon_{нт})_{cm} = \frac{\chi_K^{cm}[\sigma_K; T; K_y]}{t_K} \left\{ \chi_o^{cm} \left[ \int_0^{t_K} K_{cm}(t-\tau) \tau d\tau + 2t_K \int_{t_K}^{2t_K} K_{cm}(t-\tau) \left(1 - \frac{\tau}{2t_K}\right) d\tau \right] - \chi_{oOB}^{cm} \cdot t_K \cdot \left[ 1 + \int_{2t_K}^{2t_K+t_p} T_{cm}(t-\tau) d\tau \right] \right\}, \quad (9)$$

для вибрационной нагрузки с учетом функций подобия:

$$(\varepsilon_H + \varepsilon_{нт})_g = \frac{\chi_K^g[\sigma; T; P/Q; f; K_y]}{t_K} \left\{ \chi_o^g \left[ \int_0^{t_K} K_g(t-\tau) \tau d\tau + 2t_K \int_{t_K}^{2t_K} K_g(t-\tau) \left(1 - \frac{\tau}{2t_K}\right) d\tau \right] - \chi_{oOB}^g \cdot t_K \cdot \left[ 1 + \int_{2t_K}^{2t_K+t_p} T_g(t-\tau) d\tau \right] \right\}, \quad (10)$$

где  $\chi_K$  – функции подобия кривых ползучести по параметрам вальца и параметрам состояния опорного основания;  $\chi_o$  – коэффициенты подобия базовой и теоретической кривых ползучести;  $T(t-\tau)$  – функции скорости ползучести для обратимых частей деформации;  $2t_K$  – полное время воздействия вальца на слой (рис. 3).

Проведено исследование взаимодействия пневмоколеса трактора со слоем почвогрунта в рамках четырехмерного подхода на основе разработанной математической модели. В качестве основного критерия эффективности взаимодействия принято приращение плотности почвогрунта после однократного прохода пневмоколеса, определяемое через относительное изменение объема. В рамках принятых допущений, включающих изотропность среды, сплошность среды с отсутствием ее разрушения и линейную зависимость сдвига от глубины слоя опорного основания, относительное изменение объема определяется главными деформациями среды, которые являются корнями кубического уравнения, включающего инварианты деформированного состояния. Каждый компонент относительных деформаций, входящий в инварианты кубического уравнения, определяется как независимая величина в соответствии с принятыми соотношениями нелинейной теории наследственной ползучести упруго-вязко-пластических тел с учетом времени и характера действия соответствующей нагрузки в пятне контакта колеса со слоем почвогрунта, а также с учетом функций подобия кривых ползучести, определяющих соотношения параметров состояния слоя почвогрунта, параметров грунтозацепов и величин действующих нормальных и касательных напряжений в пятне контакта колеса с опорным основанием.



Разработан графоаналитический метод определения величин нормальных напряжений в пятне контакта колеса трактора со слоем опорного основания, а также площади и длины пятна контакта из условия взаимного равновесия сил и реакций, действующих на контактную поверхность со стороны колеса и опорного основания. На основе известного графического метода сходящихся сил в соответствии с заданным режимом качения колеса определяются законы распределения нормальных и касательных напряжений в пятне контакта, а по скорости качения колеса – время взаимодействия колеса со слоем через длину пятна контакта. После определения вертикальной деформации слоя опорного основания за это время в соответствии с принятыми соотношениями развития деформаций на основе нелинейной теории наследственной ползучести определяется новая площадь пятна контакта, а, следовательно, и новые значения нормальных и касательных напряжений, а также времени воздействия колеса на опорное основание. Расчеты повторяются до достижения указанного равновесия.

Установлено, что коэффициент бокового расширения материала опорного основания является величиной непостоянной и зависит от времени действия приложенных нагрузок. Для выщелоченного чернозема получена зависимость изменения коэффициента бокового расширения от времени, согласно которой в интервале времени нагружения 0...0,5 с наблюдается рост его значений, а в последствии, при больших значениях времени нагружения (порядка нескольких секунд и более), коэффициент принимает постоянное значение, характерное для данного типа почвогрунта.

Разработан упрощенный метод определения величины колеи после прохода пневмоколеса по слою почвогрунта (на примере выщелоченного чернозема) для случая небольших сопротивлений передвижению колеса и тяговых нагрузок на крюке трактора, вызывающих незначительные сдвиговые деформации слоя опорного основания, что с достаточной степенью точности расчетов позволило отказаться от учета сдвиговых (касательных) напряжений в пятне контакта колеса со слоем опорного основания. По результатам штамповых испытаний определяются реологические характеристики материала опорного основания методом наложения экспериментальной кривой податливости на семейство теоретических кривых ползучести. Далее определяются полное время воздействия колеса на опорное основание в каждой его точке, мгновенный модуль деформации слоя почвы в соответствии с заданными параметрами состояния слоя и максимальные контактные давления, развиваемые под катящимся колесом. Приняв закон изменения нормальных напряжений, действующих в пятне контакта колеса с опорным основанием (трапециевидный или треугольный), с использованием принятых соотношений развития деформации на основе нелинейной теории наследственной ползучести определяется величина колеи после прохода колеса по слою опорного основания.

При исследовании взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием установлено, что величина колеи после прохода гусеничного движителя существенно зависит не только от положения центра давления,

но и от почвенно-грунтовых условий и конструкции гусеничного движителя, а также от скорости передвижения машины, что определяет скорость изменения напряженно-деформированного состояния опорного основания и время действия нагрузки. Последние два фактора оказывают решающее значение на состояние колеи и плотность материала опорного основания под гусеничным движителем.

Установлено также, что распределение давлений на опорное основание со стороны звена гусеничной цепи при перемещении по нему опорного катка должно определяться с учетом реологических свойств опорного основания через релаксационные процессы, происходящие во времени под разными точками звена. При этом скорости погружения и выглубления шарниров звена примерно постоянны во времени, что позволяет описать траектории их вертикальных перемещений и вертикальные перемещения некоторых точек по длине звена гусеницы треугольным законом деформирования, а для некоторых точек – трапециевидным законом деформирования опорного основания. Используя взаимосвязь процессов ползучести и релаксации, представляется возможным определить расчетным путем величины действующих напряжений и эпюры распределения давлений под звеном в любой момент времени в соответствии с законом деформирования слоя опорного основания.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований физико-механических свойств деформируемого опорного основания различной физической природы.

Установлено, что влияние частоты колебаний на развитие деформации слоя асфальтобетонной смеси проявляется при различных условиях деформирования, причем с увеличением частоты колебаний и уменьшением нагрузки на штампе при всех остальных постоянных условиях деформация снижается по определенному закону. Как показали исследования, расхождение в подобию кривых ползучести не превосходило 7... 10%. Данное обстоятельство в одинаковой степени относится как к вакуумированной, так и к невакуумированной смеси. При анализе полученных зависимостей установлено, что в большей степени влияет частота колебаний на деформацию у мелкозернистой и песчаной невакуумированных асфальтобетонных смесей, чем у вакуумированных, что объясняется образованием более равномерной структуры смеси при вакуумировании.

Величина относительной деформации слоя асфальтобетонной смеси уменьшается по определенному закону с увеличением плотности слоя. Расхождение в подобию кривых ползучести при изменении начальной плотности не превышает 5... 8%. Повышенная деформационная способность песчаной асфальтобетонной смеси по сравнению с мелкозернистой смесью при повышенной плотности объясняется ее более однородной структурой.

Установлено, что влияние величины относительной вынуждающей силы  $P/Q$  на развитие деформации у слоев вакуумированных и невакуумированных асфальтобетонных смесей проявляется по-разному. При уплотне-

нии невакуумированных слоев песчаной и мелкозернистой асфальтобетонных смесей величину  $P/Q$  целесообразно повышать до 3...3,5, а при уплотнении вакуумированных слоев смесей величина  $P/Q$  составляет не более 2,5. Дальнейшее увеличение  $P/Q$  приводит к незначительному росту деформации вакуумированных слоев асфальтобетонных смесей.

Экспериментально установлено, что время релаксации напряжений, по истечении которого обратимая деформация слоя асфальтобетонной смеси принимает установившееся значение, не превышает  $t_p = 1,5...2,0$  с. Поэтому для определения обратимой части деформации расчетным путем рекомендуется принимать  $t_p$  не более 3 с.

Нелинейность свойств уплотняемого материала, проявляющаяся в повышении модуля деформации при возрастании нагрузки, в большей степени выражается у вакуумированных слоев асфальтобетонной смеси. Эта нелинейность тем выше, чем выше температура слоя. При температуре 70°C вакуумирование не эффективно.

Установлено, что вакуумирование оказывает положительное влияние на структуру асфальтобетона. При этом наблюдается увеличение прочности вакуумированных слоев асфальтобетонной смеси по отношению к прочности невакуумированных слоев. Это позволяет производить уплотнение без разрушения сплошности слоя при повышенных нагрузках или при более высоких температурах асфальтобетонной смеси. Так, значение коэффициента превышения предела прочности слоя вакуумированной смеси по отношению к пределу прочности слоя невакуумированной у песчаной смеси составляет 1...1,12, а у мелкозернистой 1...1,15. При этом наибольшие значения как в первом, так и во втором случае находятся при коэффициенте уплотнения 0,88...0,92, температуре смеси 130°C и максимальной толщине слоя асфальтобетонной смеси.

Предложен способ определения физико-механических характеристик слоя почвогрунта [23] и разработано устройство для исследования физико-механических характеристик слоя почвогрунта [24]. В результате лабораторных исследований получены уравнения регрессии, характеризующие изменение деформаций слоя почвогрунта (на примере выщелоченного чернозема) в зависимости от вертикальной и реверсивной горизонтальной нагрузок на штампе с размерами 300x300 мм, влажности и плотности слоя почвы, параметров грунтозацепов – угла установки, шага и высоты грунтозацепов. Установлено, что вертикальная деформация слоя почвогрунта увеличивается с увеличением вертикальной и горизонтальной (сдвиговой) нагрузок, а горизонтальная (сдвиговая) деформация увеличивается с увеличением сдвиговой нагрузки и уменьшением вертикальной нагрузки на штампе. При увеличении влажности и уменьшении плотности почвогрунта деформации увеличиваются. При увеличении численных значений параметров грунтозацепов вертикальные деформации слоя почвогрунта увеличиваются, а сдвиговые деформации увеличиваются при уменьшении угла установки грунтозацепов и их высоты, увеличении шага грунтозацепов. В

результате обработки на ЭВМ экспериментальных данных определены параметры базовых кривых ползучести.

Разработан способ определения реологических характеристик слоя опорного основания и устройство для его осуществления [22], позволяющие определять параметры опытных кривых продольной и поперечной ползучести по величинам деформаций как минимум при трех значениях времени деформирования слоя опорного основания динамической нагрузкой посредством круглого плоского штампа. На основе экспериментальных данных выявлены зависимости развития вертикальной и горизонтальной (поперечной) деформаций почвогрунта от максимальных контактных давлений под штампом, времени действия нагрузки и толщины слоя, которые позволили определить кинетику изменения величины коэффициента поперечной деформации слоя почвогрунта. Предложенный способ апробирован при оценке реологических характеристик слоя почвогрунта средней и низкой плотности.

Дополнительно разработана конструкция переносной установки, позволяющей исследовать реологические свойства слоя почвогрунта небольшой толщины в цилиндрических координатах.

Установлено, что для снега широкий диапазон изменения параметров, характеризующих процессы деформирования и изменчивость его свойств, затрудняет построение единой реологической модели. Именно поэтому для описания напряженно-деформированного состояния снежного покрова удобно использовать теорию наследственной ползучести, которая не разделяет между собой упругие, вязкие и пластичные свойства, а интегрально учитывает их плавное изменение во времени. Установлено также, что исследование реологических свойств снежного покрова при возрастании нагрузки на штампе с постоянной скоростью является самым простым в математическом смысле описанием процесса, а также достоверным методом с точки зрения физических процессов, происходящих в снеге. Однако, как показывают исследования, для снежного покрова с различными параметрами состояния присущи различные предельные скорости нагружения, при которых имеется возможность исследования реологических свойств.

Разработано устройство для определения реологических свойств снежного покрова, позволяющее регулировать его скорость нагружения. Экспериментально установлено, что эта скорость зависит от плотности снега, величины нагрузки и определяется особенностями относительного смещения частиц снега. На основе экспериментальных данных выявлена зависимость, определяющая границу значений скоростей нагружения снежного покрова, при которых отсутствует ступенчатое развитие деформаций. Предельная скорость нагружения снежного покрова, при которой отсутствуют скачки в развитии деформации, уменьшается с увеличением плотности по экспоненциальному закону.

**В пятой главе** проведена оценка эксплуатационных свойств КГДМ при учете реологических характеристик опорного основания.

Установлено, что сопротивление качению, пропорциональное глубине

колеи, и буксование, пропорциональное сдвигу опорного основания под действием касательных сил, являются функционалами, зависящими от времени и характера взаимодействия движителя с опорным основанием, и могут быть определены на основе использования теории наследственной ползучести упруго-вязко-пластичных сред. Значительное влияние изменения параметров состояния материала опорного основания на тяговую динамику КГДМ должно учитываться при их расчетной оценке работы.

Тяговые показатели во всех условиях работы полноприводных колесных машин, определяемые соотношением силовых и кинематических характеристик ведущих колес, нельзя определить только экспериментальным путем, задействовав значительное количество машин при движении их под различной нагрузкой на крюке для различных параметров состояния опорного основания. Для полного анализа необходимо применить математическое моделирование взаимодействия машин с опорным основанием. Характеристики движения переднего колеса и заднего колеса по колее после прохода переднего, включая и процесс буксования, будут отличаться в связи с изменившейся во времени по нелинейным законам плотностью материала опорного основания. Соотношение ведущих моментов на передних и задних колесах можно определить только в каждом конкретном случае как для конкретного транспортно-технологического средства, так и для текущих значений параметров состояния опорного основания. На примере липецких тракторов определены численные значения тяговых усилий, развиваемых каждым мостом и трактором в целом, и отношения ведущих моментов в зависимости от буксования, одинакового для всех колес. Расчеты также показали, что с увеличением буксования тяговая способность переднего и заднего мостов сначала растет быстро, а затем скорость роста снижается.

При снижении тяговой способности передних колес во время движения трактора под нагрузкой на крюке плотность почвы после их прохода увеличивается не так сильно (относительно движения трактора с меньшей нагрузкой на крюке) и задние колеса движутся по более рыхлой почве, что приводит к увеличению их буксования. При больших значениях нагрузки на крюке буксование всех колес увеличивается, а соотношение моментов соизмеримо с нагрузками на колеса.

На основе методов формализации динамических систем разработаны обобщенные динамические модели КГДМ, учитывающие как основные параметры самой машины, так и реологические параметры реального опорного основания, что позволяет произвести не только качественную, но и количественную оценку динамики системы. Параметры опорного основания в модели представлены физико-механическим параметром уплотняемого материала, являющимся отображением модуля деформации на единицу толщины уплотняемого слоя (рис. 4, а).

В зависимости от типов рассматриваемых КГДМ даны рекомендации по учету тех или иных элементов в динамической модели.

С принятием определенных допущений ( $C_2=V=P_1=U_3=0$ , рис. 4,а) рас-

четная схема виброкатка с ВУ может быть описана системой из двух линейных дифференциальных уравнений второго порядка

$$\begin{cases} M_1 \ddot{y}_1 + C_1(y_1 - y_2) = P_B, & (11) \\ M_2 \ddot{y}_2 + E' \left[ y_2 - \int_0^t y_2(\tau) S(t-\tau) d\tau \right] - C_1(y_1 - y_2) = P_2 \sin(\omega t - \varphi), & (12) \end{cases}$$

где  $M_1$  и  $M_2$  - масса части рамы катка, приходящейся на один валец, и масса вибровальца, кг, соответственно;  $y_1$  и  $y_2$  - линейные перемещения масс  $M_1$  и  $M_2$  соответственно, м;  $P_B$  - сила от воздействия вакуумной камеры, равная произведению ее рабочей площади на величину разрежения, Н;  $P_2$  - амплитудное значение вынуждающей силы со стороны вибратора вальца, Н;  $\omega$  - частота колебаний,  $c^{-1}$ ;  $\varphi$  - угол сдвига фаз между перемещением вибровальца и направлением вынуждающей силы, рад;  $C_1$  - жесткость амортизаторов,  $H \cdot m^{-1}$ ;  $S(t-\tau)$  - ядро релаксации,  $S=A \cdot e^{-\beta t} \cdot t^{\alpha-1}$ ,  $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  - параметры ядра,  $e$  - основание натуральных логарифмов;  $E'$  - физико-механический параметр уплотняемого материала,  $H \cdot m^{-1}$ .

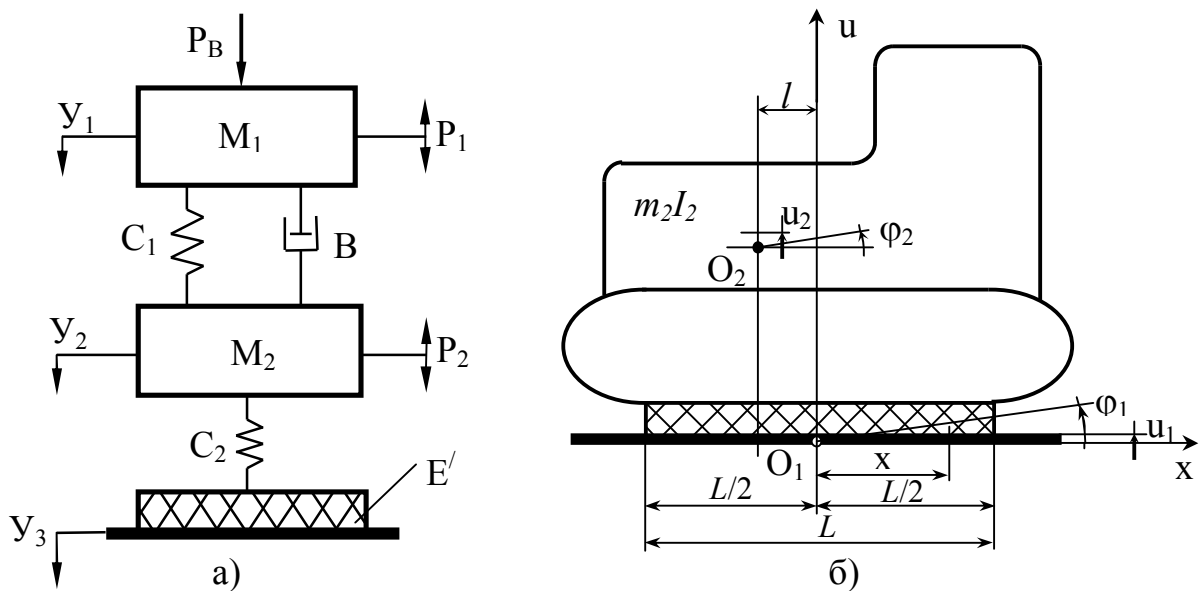


Рис. 4. Динамические модели КГДМ :

а - обобщенная динамическая модель КГДМ для исследования вертикальных колебаний элементов системы; б - динамическая модель гусеничного трактора

С учетом требований, предъявляемых к динамической модели,  $E'$  представляет собой сложную функцию, которая зависит от конструктивных и технологических параметров катка и учитывает нелинейные свойства уплотняемого материала, меняющиеся во времени

$$E' = \frac{E \cdot F_k}{\varepsilon(t) \cdot h_{cl}}, \quad (13)$$

где  $E$  - модуль деформации, определяемый по формуле (8);  $F_k$  - площадь штампа, с помощью которого определяется модуль деформации слоя толщиной  $h_{cl}$ ;  $\varepsilon(t)$  - относительная деформация.

Относительно  $Y_1$  имеем решение для амплитудного значения:

$$y_{01} = \frac{C_1 y_{02}}{C_1 - M_1 \omega^2} \quad (14)$$

Амплитудное значение перемещений вибровальца

$$A = y_{02} = \frac{P_2}{\sqrt{\left[ E' - M_2 \omega^2 + \frac{C_1 M_1 \omega^2}{C_1 - M_1 \omega^2} - E' D(\omega) - \frac{P_B}{A} \right]^2 + \left[ E' C(\omega) - \frac{P_B}{A} \right]^2}} \quad (15)$$

где  $D(\omega)$  и  $C(\omega)$  – косинус- и синус-преобразования Фурье.

Математическое моделирование рабочего процесса вибрационных дорожных катков показало, что первая половина процесса уплотнения асфальтобетонной смеси требует незначительного расхода мощности на поддержание колебаний, но, начиная с коэффициента уплотнения 0,96, указанная мощность постепенно растет от прохода к проходу катков. На начальном этапе процесса уплотнения указанная мощность у виброкатка в 2,5...3 раза выше, чем у виброкатка с ВУ. На завершающем этапе процесса уплотнения это отношение увеличивается до 10...12.

Таким образом, при уплотнении вакуумированных слоев асфальтобетонных смесей виброкатками значительно экономится мощность на привод вибратора, особенно это относится к завершающему этапу уплотнения.

Разработаны динамические модели колесного трактора при вертикальных и продольно-угловых колебаниях на деформируемом опорном основании (рис. 5), а также пропашного колесного трактора при вертикальных колебаниях.

Математическое описание уравнений движения отдельных масс с применением уравнений Лагранжа включает интегро-дифференциальные уравнения, учитывающие реологические особенности опорного основания на основе применения теории наследственной ползучести материала.

Рассмотрена плавность хода гусеничного трактора (рис. 4, б) при учете реологических характеристик опорного основания, определяемых, в свою очередь, параметрами состояния его материала. Динамическая модель позволяет исследовать вертикальные и угловые колебания с учетом предложенного методологического подхода к оценке реологических свойств опорного основания. Аналитическим методом получены математические выражения для колебаний при наличии и отсутствии резонанса.

При этом имеется возможность оценить влияние на колебания трактора параметров состояния слоя опорного основания и таких конструктивных параметров, как масса и момент инерции трактора, длина опорной поверхности гусеницы и смещение центра тяжести трактора относительно середины опорной поверхности гусениц, ширина гусеницы и др.

Теоретически исследованы колебательные процессы колеса, являющегося одним из основных упругих элементов двухмассовой динамической системы и представляющего собой начальное звено силовой передачи и ходо-

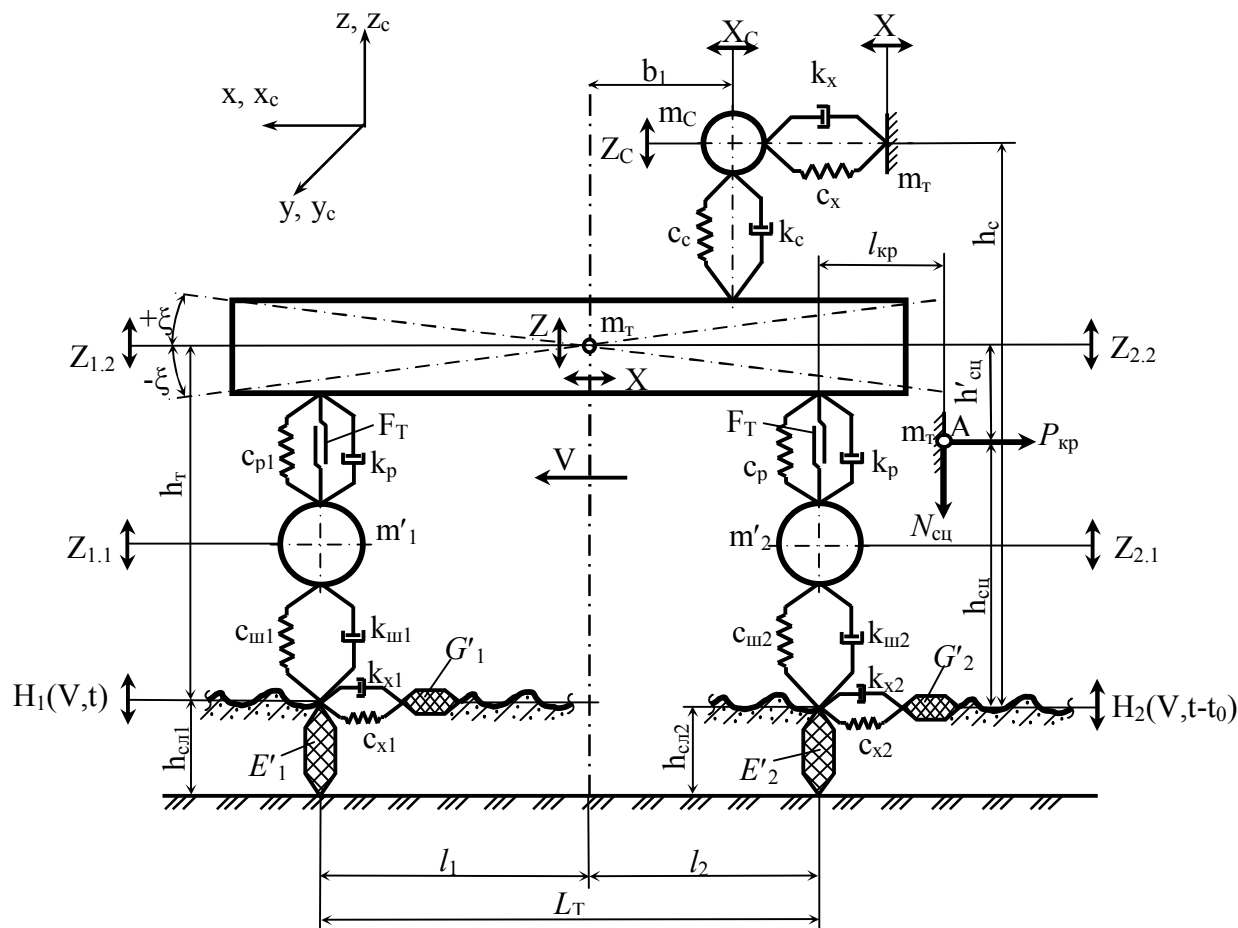


Рис. 5. Динамическая модель колесного трактора при вертикальных и продольно-угловых колебаниях на деформируемом опорном основании

вой части одновременно при расчете трансмиссии на крутильные колебания. Учтено, что через колесо действует и формируется возмущение на систему со стороны поверхности опорного основания, обладающего определенными реологическими свойствами в зависимости от его параметров состояния, таких как плотность, влажность, толщина деформируемого слоя и т.д. При изменении силы сопротивления движению и динамической составляющей момента на колесе по гармоническому закону, что характерно при движении трактора поперек рядков картофельного поля, аналитическим путем получены выражения для амплитуды угловых колебаний колеса на основе составленной математической модели системы.

**В шестой главе** представлены результаты экспериментальных исследований КГДМ.

В лабораторных условиях установлено, а при полевых испытаниях подтверждено, что рациональные значения контактных давлений под вальцом катка зависят от текущей плотности асфальтобетонной смеси. С увеличением плотности рациональные контактные давления приближаются к пределу прочности материала. Рациональные значения относительных контактных давлений при уплотнении вакуумированных слоев асфальтобетонных смесей в 1,5...2,0 раза ниже, чем при уплотнении невакуумированных слоев за счет превышения пределов прочности вакуумированных слоев асфальтобетонной смеси по сравнению с невакуумированными в



1...1,38 раза для песчаных и в 1...1,52 раза для мелкозернистых смесей и за счет снижения внутренних остаточных напряжений в уплотняемом слое, а следовательно, и модуля деформации слоя при его вакуумировании, что требует меньших контактных нагрузок со стороны рабочих органов уплотняющих машин.

Многочисленными исследованиями установлено, что применение новой технологии, включающей виброуплотнение с вакуумированием, позволяет сократить количество проходов катков по одному следу в 1,5...2 раза, повышая производительность катков. При этом существенно повышаются такие показатели качества, как водонасыщение, водостойкость и длительная водостойкость, сдвигоустойчивость, предел прочности, морозоустойчивость и другие, что ведет к увеличению срока службы асфальтобетонных дорожных покрытий в 1,5...2 раза.

Сопоставление полученных при полевых испытаниях и теоретическим путем коэффициентов интенсивности накопления деформаций по проходам катков дает расхождение в большинстве случаев в пределах 10...15%, что является удовлетворительным и подтверждает правомерность теоретических разработок.

Разработаны конструкции вакуумной камеры бесконтактного типа (БВК) к дорожному катку [19, 21], позволяющие снизить общий коэффициент сопротивления движению катка и повысить эффективность функционирования катков. При испытаниях макетного и экспериментального образцов БВК подтверждена работоспособность предложенной конструкции. Исследованы основные технические характеристики БВК. Выявлено, что частота вращения лопаточного диска оказывает наибольшее влияние на достижение требуемого разрежения в камере.

Полевые испытания колесного трактора ЛТЗ-55А по оценке уплотняющего воздействия на почву позволили получить экспериментальные данные по влиянию нагрузки на крюке трактора, его скорости и давления воздуха в шинах колес на величину колеи и плотность почвы после прохода передних и задних колес трактора. В частности установлено, что с увеличением скорости движения трактора от 1,3 м/с до 2,1 м/с величина колеи слегка уменьшается, а плотность почвы после прохода передних и задних колес трактора увеличивается, что можно объяснить только с позиций предложенного методологического подхода к оценке параметров деформируемого опорного основания.

Полевые испытания колесного трактора ЛТЗ-55А по оценке плавности хода показали, что разница между экспериментальными и расчетными значениями ускорений вертикальных колебаний на сидении водителя незначительна. Это вполне подтверждает правомерность теоретических положений.

Полевые испытания колесного трактора ЛТЗ-55А по оценке динамической нагруженности трансмиссии показали, что имеется значительная разница в амплитудных значениях динамических моментов, вызванных крутильными колебаниями в трансмиссии при движении по жесткому и де-

формируемому опорным основаниям. Величины динамических нагрузок в трансмиссии, вызванных крутильными колебаниями, зависят как от параметров трансмиссии трактора и самого трактора, так и от параметров состояния и типа почвы. К параметрам состояния почвы в первую очередь относятся ее плотность, влажность и толщина деформируемого слоя. Состав почвы также оказывает влияние.

Исследована и проанализирована кинематика шарниров гусеничной цепи в лабораторных условиях. Установлено, что с увеличением силы натяжения гусеницы и скорости движения опорного катка и с уменьшением толщины слоя опорного основания вертикальные смещения шарниров уменьшаются. При этом изменение траектории вертикальных перемещений шарниров гусеничной цепи во времени можно описать треугольным законом.

Полевые испытания гусеничного трактора ДТ-75М показали, что при увеличении нагрузки на крюке и уменьшении скорости трактора величина колеи и плотность почвы увеличиваются. Увеличение нагрузки на крюке изменяет эпюру нормальных и касательных напряжений под движителем, увеличивая их максимальные значения. Уменьшение скорости трактора ведет к увеличению времени действия на слой почвы нагрузок. Как в первом, так и во втором случаях, это подтверждает проведенные теоретические исследования, основанные на применении теории наследственной ползучести упруго-вязко-пластических сред.

**В седьмой главе** представлены методы и результаты расчетов параметров и режимов работы КГДМ.

Установлено, что при уплотнении песчаной и мелкозернистой асфальтобетонных смесей расхождение в оценочных показателях находится в пределах 5...8%, что позволяет выбирать одинаковые параметры и режимы работы для катков. Рациональная масса виброкатка с ВУ составляет 4 ... 4,2 т, линейное давление 17 ... 18 кН·м<sup>-1</sup> при диаметре вальцов, равном 1000 мм. Интервал изменения частоты колебаний вибровальца составляет 40 ... 60 Гц, относительная вынуждающая сила находится в интервале 1...2,3, при этом величина статического момента дебалансов составляет 0,16 кг·м. Величина разрежения в вакуумной камере составляет 5...10 кПа. Определен температурный интервал использования виброкатка с ВУ в пределах 80...120°С. Необходимое количество проходов виброкатка с ВУ для достижения требуемой плотности асфальтобетонного покрытия назначается 6...8. Скорость движения виброкатка с ВУ находится в интервале 0,5...0,8 м·с<sup>-1</sup>.

На основании выполненных исследований предложена технология уплотнения асфальтобетонных покрытий виброкатком с ВУ. Даны рекомендации по использованию существующих у нас в стране виброкатков для уплотнения дорожных асфальтобетонных покрытий при установке на них вакуумного устройства.

Для катка ДУ-47А в рамках предложенного блочно-иерархического описания представлений о выборе параметров и режимов работы КГДМ

представлены различные варианты расчета оптимальных параметров и режимов работы по проходам катка в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси.

Установлено, что максимальная производительность виброкатка с ВУ лежит в интервале значений скоростей от 0,4 до 0,85 м/с. Этот интервал скоростей соответствует увеличенному значению массы виброкатка с ВУ, что отвечает общей тенденции увеличения массы виброкатков в дорожном строительстве.

Коэффициенты эффективности на первом этапе процесса уплотнения составляют у виброкатка с ВУ 1,3...1,5, у виброкатка - 1,7...2,0 по отношению к статическому катку с ВУ и обыкновенному статическому катку соответственно. На завершающем этапе уплотнения коэффициент эффективности в обоих случаях составляет 2,5...3,0 (при  $K_y = 0,98$ ). Если параметры вибрации постоянные, то имеется возможность использования виброкатков только на промежуточном этапе процесса уплотнения.

Для тракторов, работающих в различных условиях (ограничения по агротехническим требованиям; работа в различных почвенно-климатических зонах с разными составами и свойствами почв и грунтов; работа в различных составах машинно-тракторных агрегатов и т.д.), задача по выбору оптимальных параметров и режимов работы является практически неразрешимой. Поэтому нужно рассматривать различные подходы к выбору параметров и режимов работы тракторов в зависимости от поставленной задачи, учитывая их конструкцию.

На основе математической модели разработан метод расчета взаимодействия колесного трактора с деформируемым опорным основанием, который позволяет определить значения объёмной, вертикальной и горизонтальной деформаций почвы, её плотность после прохода переднего и заднего колес, сопротивление движению и величину буксования. Для тракторов 4К4 необходимо дополнительно проводить корректировку по распределению величин силы тяги на передних и задних колесах из условия равенства величин буксования. Это требует введения в конструкцию трактора межмостовых дифференциалов с автоматическим перераспределением моментов по мостам или, в крайнем случае, муфт свободного хода.

Проведены расчеты по оценке уплотняющей способности и тяговой динамики липецких тракторов, при этом для трактора ЛТЗ-55А эти результаты подтверждены результатами полевых испытаний. Расчетным путем исследовано влияние параметров тракторов, характеризующихся маркой трактора, типоразмером шин, типом привода, нагрузкой на крюке и скоростными режимами работы, на значения оценочных показателей при выполнении различных сельскохозяйственных операций. Построены номограммы для определения деформации и плотности почвы, буксования и коэффициента сопротивления качению для липецких тракторов, которые дают удовлетворительные результаты. Разработаны соответствующие программы для ЭВМ, позволяющие более точно определить указанные показатели.

Установлено, что с увеличением скорости движения колесного трактора почва под движителем расходится в стороны на меньшую величину, что влечет за собой более интенсивное увеличение объёмной деформации и, как следствие, увеличение плотности почвы, по сравнению с ростом вертикальной деформации. Величины буксования также обратно пропорционально зависят от скорости трактора.

Использование сдвоенных колес позволяет уменьшить буксование ведущих колес в 1,5...2,5 раза, уменьшить сопротивление движению трактора и уплотняющее воздействие трактора на почву. Во всех случаях уменьшается плотность почвы после прохода трактора на сдвоенных колесах.

На основе разработанных математической модели и программ расчета на ЭВМ установлено, что с увеличением скорости движения гусеничного трактора горизонтальная и вертикальная деформации слоя почвы, при всех других равных условиях, уменьшаются. Размер колеи прямо пропорционально зависит от величины смещения центра давления трактора вперед.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Осуществлено решение научной проблемы при исследованиях процессов взаимодействия колесных, гусеничных и дорожных машин (КГДМ) с деформируемым опорным основанием, предусматривающее комплексное решение задач развития теории движения на основе реологии опорного основания КГДМ и базирующееся на аналитическом описании процессов взаимодействия КГДМ и их отдельных систем с опорным основанием. Эффективность решения этой проблемы состоит в том, что оно предполагает более глубокое проникновение в физическую сущность процессов взаимодействия КГДМ с деформируемым опорным основанием, способствует лучшему пониманию этой сущности и позволяет определять пути воздействия на процессы с целью улучшения работы машин.
2. Выполненное аналитическое описание процессов дало возможность разработать научные основы взаимодействия КГДМ с деформируемым опорным основанием, которые включают: математические модели, отражающие сущность и динамику процессов; показатели оценки последствий взаимодействия и методы их определения для различных ходовых систем и условий работы машин; рекомендации, направленные на решение проблемы. Важная особенность аналитического описания процессов взаимодействия КГДМ с опорным основанием состоит в его универсальности, когда оно представляет собой решение общей задачи теории взаимодействия мобильных машин с деформируемым опорным основанием и пригодно для описания частных случаев взаимодействия отдельных машин и их систем путем подстановки соответствующих значений параметров моделей. Это служит методической основой использования частных случаев для достоверной оценки показателей

взаимодействия отдельных КГДМ с деформируемым опорным основанием.

3. Взаимодействие различных движителей КГДМ с деформируемым опорным основанием происходит по сложным законам, определяемым технологическими и конструктивными параметрами машин, а также параметрами состояния слоя опорного основания. В общем виде модули деформации и коэффициент поперечного расширения слоя опорного основания, его предел прочности, коэффициенты сцепления, сопротивления передвижению и буксования являются функционалами от указанных параметров, а также от времени. В связи с этим решена задача по увязке тяговой динамики, эффективной работы КГДМ и их основных систем с реологическими свойствами опорного основания, что на сегодняшний день имеет важное научное и практическое значение.
4. Предложен методологический подход к оценке инвариантных значений параметров деформируемого опорного основания КГДМ, основанный на теории деформирования нелинейных упруго-вязко-пластичных материалов с применением теории наследственной ползучести и экспоненциально-степенных ядер, позволяющий обеспечивать необходимую точность при описании большинства деформируемых опорных оснований КГДМ.
5. Разработаны теоретико-методологические основы и методы выбора параметров и режимов работы КГДМ, отражающие достаточно тесные взаимные связи между реологическими свойствами опорного основания, режимами работы и параметрами КГДМ с учетом особенностей взаимодействия КГДМ с опорным основанием, включающих интенсивность изменения и время действия нагрузок. Разработана концептуальная модель выбора параметров и режимов работы КГДМ, позволяющая производить решения задачи, начиная от начального состояния процесса и переходя к их множеству на основе критериев оптимальности. Выполненный анализ постановок задач выбора параметров и режимов работы КГДМ позволил разработать концепцию выбора параметров и режимов работы КГДМ в иерархических средах системы "человек – машина – рабочий орган – объект воздействия – окружающая среда" на основе развития реологии опорного основания.
6. Найдены приемы корректирования определяемых показателей работы движителей КГДМ путем учета дополнительных факторов: влияния скорости движения машин и динамических нагрузок со стороны традиционных движителей через интегральные уравнения связей между развивающимися деформациями и действующими напряжениями в опорном основании; влияния реологических особенностей его материала через параметры функций скоростей ползучести и релаксации, представленных в виде экспоненциально-степенных выражений; влияния параметров состояния слоя опорного основания и параметров грунтозацепов движителей КГДМ, представленного через функции подобия в виде уравнений регрессии, полученных экспериментальным путем.

7. Проведено расчетно-теоретическое обоснование методов выбора режимов работы и параметров КГДМ с основными типами движителей. Разработанные математические модели взаимодействия жесткого вальца, пневматического колеса и гусеничного движителя с деформируемым опорным основанием дали возможность объяснить многие противоречивые результаты различных исследователей. Установлено, что максимальная производительность виброкатка с ВУ лежит в интервале значений скоростей от 0,4 до 0,85 м/с, который соответствует увеличенному значению массы виброкатка с ВУ, что отвечает общей тенденции увеличения массы виброкатков и применения их с постоянными параметрами вибрации на промежуточной стадии уплотнения в дорожном строительстве. Выявлено, что при обеспечении несущей способности асфальтобетонной смеси эффективность вибрационных катков, по сравнению с катками статического действия, повышается к концу процесса уплотнения. Установлено также, что при определенных условиях работы колесного движителя увеличение скорости машины может приводить к уменьшению колеи при одновременном увеличении плотности материала опорного основания.
8. Разработаны методы оценки тяговой динамики, плавности хода и динамической нагруженности трансмиссии КГДМ. Установлено, что изменение параметров состояния слоя опорного основания в сочетании с изменением характеристик силового воздействия на него со стороны ходовой части КГДМ существенно влияет на амплитудные значения колебаний, изменяя их величины в 2...2,8 раза. При этом влияние влажности почвогрунта наиболее значительно для всех КГДМ, а влияние толщины деформируемого слоя опорного основания на изменение колебаний имеет большее значение для КГДМ небольшой массы.
9. Предложены способы определения физико-механических характеристик различных опорных оснований и разработаны устройства для их осуществления, позволяющие оперативно как в лабораторных, так и в полевых условиях получать значения искомых величин. В результате лабораторных исследований получены уравнения регрессии, характеризующие изменение модулей деформаций слоя опорного основания в зависимости от вертикальной и горизонтальной нагрузок на штампе, параметров состояния опорного основания, параметров грунтозацепов колесных и гусеничных движителей, а также параметров вибрации вальцов дорожных катков.
10. Разработаны конструкции вакуумных камер бесконтактного типа (БВК) к дорожному катку (патенты РФ №1832784 и №2011728), позволяющие повысить долговечность дорожных покрытий, повысить эффективность функционирования уплотняющих машин. При испытаниях макетного и экспериментального образцов БВК исследованы и определены ее основные технические характеристики, а также подтверждена работоспособность предложенной конструкции.

11. Полевые испытания дорожных катков ДУ-54 и ДУ-47А, а также тракторов ЛТЗ-55А и ДТ-75М по оценке уплотняющей способности, тяговой динамики, плавности хода, динамической нагруженности трансмиссии показали незначительную разницу между экспериментальными и расчетными значениями показателей, что подтверждает правомерность теоретических положений. Научная, практическая и экономическая значимость полученных результатов подтверждены их внедрением на ряде предприятий.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих основных работах, рекомендованных ВАК для публикаций результатов исследований докторских диссертаций:

в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Носов, С.В. Динамическая модель вибрационного катка с вакуумным устройством /С.В.Носов, В.В.Носов //Известия вузов. Строительство и архитектура.- Новосибирск.- 1991.- № 7.- С. 101-107.
2. Носов, С.В. К вопросу по определению модуля деформации уплотняемых слоев дорожно-строительных материалов /С.В.Носов, В.В.Носов //Известия вузов. Строительство.- Новосибирск.- 1991.- № 10.- С. 104-108.
3. Носов, С.В. Особенности технологии уплотнения дорожных покрытий катками при использовании на них вакуумных устройств /С.В.Носов //Строительные и дорожные машины.- 1999.- №9.- С. 6-9.
4. Носов, С.В. Основы методологического подхода к выбору режимов и параметров МЭС при работе на деформируемых почвах /С.В.Носов //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2000.- №8.- С. 35-36.
5. Носов, С.В. Бесконтактная вакуумная камера как рабочий орган дорожного катка /С.В.Носов //Строительные и дорожные машины.- 2001.- №1.- С. 10-13.
6. Носов, С.В. Влияние технологических параметров дорожных катков на уплотнение асфальтобетонной смеси /С.В.Носов //Строительные и дорожные машины.- 2001.- №7.- С.5-7.
7. Носов, С.В. Анализ тяговой динамики колесного трактора при работе на мягких почвах /С.В.Носов //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2003.- №3.- С. 26-27.
8. Носов, С.В. Оценка деформации и плотности слоя почвы при работе колесного трактора /С.В.Носов, П.А.Бондаренко //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2004.- №10.- С. 24-27.
9. Носов, С.В. Моделирование системы "дорога – трактор – водитель" с учетом реологических свойств опорного основания /С.В.Носов //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2005.- №5.- С. 28-30.
10. Носов, С.В. Улучшение тяговой динамики колесных тракторов /С.В.Носов, П.А.Бондаренко //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2005.- №7.- С. 12-14.

11. Носов, С.В. Моделирование плавности хода гусеничного трактора с учетом реологических свойств опорного основания /С.В.Носов //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2005.- №8.- С. 10-12.
12. Носов, С.В. Моделирование плавности хода пропашного трактора с учетом реологических свойств опорного основания /С.В.Носов //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2005.- №10.- С. 25-27.
13. Носов, С.В. Динамическая нагруженность трансмиссий колесных машин с учетом реологических свойств опорного основания /С.В.Носов, Н.Н.Азовцев, О.В.Акулич //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2006.- № 8.- С. 31-32.
14. Носов, С.В. Выбор функции влияния при исследовании реологических свойств опорного основания /С.В.Носов //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2006.- № 10.- С. 19-21.
15. Носов, С.В. Математическая модель взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием /С.В.Носов, Н.Е.Перегудов // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2006.- № 11.- С. 29-33.
16. Носов, С.В. Реологические свойства снежного покрова /С.В.Носов // Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 2007.- № 10.- С. 13-15.

Монографии, учебные пособия и патенты, научные статьи:

17. Носов, С.В. Мобильные энергетические средства: выбор параметров и режимов работы через реологические свойства опорного основания: *монография* /С.В.Носов.- Липецк: ЛГТУ, 2006.- 228 с.
18. Носов, С.В. Современные методы исследований: *учебное пособие* /С.В.Носов, В.В.Носов.- Липецк: ЛГТУ, 2000.- 83 с.
19. Патент РФ № 1832784. Дорожный каток : Заявка № 4748518/33; Положит. решение от 27.09.90; МКИ Е 01 С 19/26 /С.В.Носов, В.В.Носов; Завод-втуз при НГМК.- Б.И. № 29 за 1993 г. (Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений 16 июня 1993 г. Действует с 16 июня 1993 г.)
20. Патент РФ № 2006545. Способ уплотнения слоя асфальтобетонной смеси : Заявка № 4883530/33 от 21.11.90; Положит. решение от 28.05.91; МКИ Е 01 С 19/28, Е 01 С 23/00 /С.В.Носов, В.В.Носов, А.А.Шестопалов, Э.И.Деникин; Завод втуз при НГМК.- Б.И. № 2 за 1994 г. (Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений 30.01.94)
21. Патент РФ № 2011728. Дорожный каток : Заявка № 4940717/33; Положит. решение от 7.05.92; МКИ Е 01 С 19/26, G 05 13/00. /С.В.Носов, В.В.Носов, В.П.Ложечко; Завод-втуз при НГМК.- Б.И. № 8 за 1994 г. (Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений 30 апреля 1994 г. Действует с 26.02.93 г.)
22. Патент РФ № 2192006. Способ определения физико-механических характеристик слоя почвогрунта, преимущественно имеющего низкую и среднюю плотность, и устройство для его осуществления: Заявка №99126270 от 14.12.99; МПК 7 G 01 N 33/24. /С.В.Носов, М.В.Рошупкин, А.Л.Кононов, А.Г.Каплун; Липецкий государственный технический уни-



- верситет.- Б.И. № 30 (Пч.) за 2002г. (Зарегистрирован в Гос. Реестре изобретений РФ 27.10.02 г.)
23. Патент РФ № 2237239. Способ определения физико-механических характеристик слоя почвогрунта /С.В.Носов, М.В.Рощупкин, П.А.Бондаренко, Б.А.Маслов //Заявка № 2002132346/03(034243) от 02.12.2002. Положительное решение о выдаче патента на изобретение от 12.04.2004. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 27.09.2004. БИПМ № 27 (II ч.).
24. Патент РФ № 2236673. Устройство для исследования физико-механических характеристик слоя почвогрунта /С.В.Носов, Н.Н.Азовцев, П.А.Бондаренко, Б.А.Маслов //Заявка № 2003109005/12(009436) от 31.03.2003. Положительное решение о выдаче патента на изобретение от 09.04.2004. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 20.09.2004. БИПМ № 26 (III ч.).
25. Носов, С.В. Концептуальная модель процесса выбора параметров и режимов работы МЭС через реологические свойства опорного основания /С.В.Носов //Современные наукоемкие технологии.- М.: Академия естественных наук.- 2004.- № 2.- С. 19-22.
26. Носов, С.В. Исследование эффективности работы липецких тракторов на выщелоченных черноземах /С.В.Носов, П.А.Бондаренко // Вести высших учебных заведений Черноземья.- 2005.- №1.- С. 95-100.
27. Носов, С.В. Обобщенная динамическая модель мобильных энергетических средств /С.В.Носов // Вибрационные машины и технологии: сборник докладов IV Международной научно-технической конференции.- Курск КГТУ, 1999.- С.172-178.
28. Носов, С.В. Классификационные признаки нагружения опорного основания элементами ходовых систем мобильных энергетических средств /С.В.Носов //Прогресс транспортных средств и систем – 2002: материалы международной научно-практической конференции (8-11 октября 2002 г.): Ч. 1.- Волгоград, 2002.- С.314-316.
29. Носов, С.В. Концепция выбора параметров и режимов работы МЭС при разработке и применении математических моделей взаимодействия МЭС с опорным основанием /С.В.Носов //Современные проблемы проектирования и эксплуатации транспортных и технологических систем: Труды междунар. науч.-техн. конф. СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2006.- С. 131-136.
30. Носов, С.В. Вибрационный каток с вакуумным устройством как интенсифицирующее средство уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожном строительстве /С.В.Носов // Ленингр. политехн. ин-т.- Л., 1987.- 8 с.- Деп. в ЦНИИТЭстроймаше 10.09.87, № 127-сд87.
31. Носов, С.В. Оценка качества уплотнения асфальтобетонной смеси методом акустической эмиссии /С.В.Носов, В.В.Носов //Ленингр. политехн. ин-т.- Л., 1987.- 10 с.- Деп. в ЦНИИТЭстроймаше 10.09.87, № 126-сд87.
32. Носов, С.В. Определение прочностных характеристик вакуумированных асфальтобетонных смесей для устройства дорожных покрытий

- /С.В.Носов //Оптимальные вибрационные рабочие процессы в строительстве.- Ярославль, 1989.- С. 33-38 /сб.тр. ЯПИ/.
33. Носов, С.В. К прогрессу колесных и гусеничных тракторов через реологические свойства основания /С.В.Носов, А.Л.Кононов, М.В.Рощупкин //Прогресс транспортных средств и систем: Материалы международной научно-практической конференции (7-10 сентября 1999 г.).Часть I.- Волгоград, 1999.- С. 191-192.
34. Носов, С.В. Синтез вибрации и вакуумирования в новой технологии строительства автомобильных дорог /С.В.Носов // Вибрационные машины и технологии: Сборник докладов IV Международной научно-технической конференции / Курский государственный технический университет.- Курск, 1999.- С.168-172.
35. Носов, С.В. Повышение эффективности функционирования мобильных энергетических средств при их адаптации к суровым условиям местности /С.В.Носов //Проблемы адаптации техники к суровым условиям: Доклады междунаро. науч.-практ. конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1999.- С.171-174.
36. Носов, С.В. Упрощенная методика определения вертикальной деформации слоя почвогрунта после прохода пневмоколеса /С.В.Носов //Проблемы проектирования, испытаний, эксплуатации и маркетинга автотракторной техники, двигателей внутреннего сгорания, строительно-дорожных машин, транспортно-технологических комплексов и вездеходов: Материалы международной научно-технической конференции 27-29 июня 2000г. /Нижегородский государственный технический университет. - Н.Новгород, 2000.- С. 413-416.
37. Носов, С.В. Моделирование плавности хода тракторов с учетом реологических свойств опорного основания /С.В.Носов //Прогресс транспортных средств и систем – 2005: материалы международной научно-практической конференции.- В 2-х ч.- Ч.1. (с.1-406) /Волгоград. Гос. техн. ун-т; Редкол.: М.В.Ляшенко (отв. ред.) [и др.] - Волгоград, 2005.- С.252-254.
38. Носов, С.В. Оценка энергоемкости процессов взаимодействия мобильных энергетических средств с деформируемым опорным основанием в рамках четырехмерного подхода /С.В.Носов //Проблемы и достижения автотранспортного комплекса: сборник материалов V Всероссийской научно-технической конференции.- Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007.- С. 107-108.
39. Носов, С.В. Исследование плавности хода тракторов на деформируемом опорном основании /С.В.Носов, Ю.Ю.Киндюхин, А.Н.Чистяков // Проблемы достижения автотранспортного комплекса: сборник материалов VI Всероссийской научно-технической конференции.- Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008.- С. 156-158.