

На правах рукописи



**МИХЕЕВ Виталий Викторович**

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ  
КАТКОВ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПЛОТНЕНИЯ  
ГРУНТОВ**

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные  
и подъёмно-транспортные машины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Омск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

**Научный консультант:**

**Савельев Сергей Валерьевич**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», кафедра «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве», профессор

**Официальные оппоненты:**

**Жулай Владимир Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», заведующий кафедрой строительной техники и инженерной механики им. профессора Н.А. Ульянова

**Исаков Владимир Семенович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Автомобили и транспортно-технологические комплексы», профессор

**Кондаков Сергей Владимирович**

доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кафедра «Колесные и гусеничные машины», профессор

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится 21 сентября 2022 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.250.02 созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 2.351.

Тел. (3812) 65-03-23, e-mail:dissovetsibadi@bk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» и на сайте <https://sibadi.org/about/units/institut-magistratury-i-aspirantury/studies/dissertations/66095/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу 644080, г. Омск, проспект Мира, 5 Тел. (3812) 65-03-23, e-mail:dissovetsibadi@bk.ru

Автореферат разослан «22» июня 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор

Виктория Николаевна Кузнецова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы работы.** Развитие любого государства, немыслимо без устройства транспортной инфраструктуры. Правительственная программа «Транспортная стратегия РФ на период до 2035 года» и Национальный проект «Безопасные и качественные дороги» формулируют задачи по развитию дорожной инфраструктуры, требующие использования новых решений в области конструирования и эксплуатации дорожно-строительной техники. Расширение дорожной сети и повышение эксплуатационных свойств автомобильных дорог должны обеспечиваться возрастанием производительности работ при их строительстве с одновременным совершенствованием конструкций уплотняющей техники.

Наиважнейшая технологическая операция, обеспечивающая прочность и устойчивость автодорог при эксплуатационных нагрузках – это операция уплотнения дорожно-строительных материалов. Основным типом машин, используемым для уплотнения грунтовых слоев земляного полотна автодорог, являются дорожные катки. Главной задачей использования катков при уплотнении грунтов является достижение требуемых плотностей с наименьшими затратами времени и ресурсов. Это требует решения научно-практической проблемы адаптирования силового воздействия со стороны катка в соответствии под изменяющиеся параметры материала, подвергаемого уплотнению. Сложность решения этой задачи состоит в обеспечении максимально интенсивного накопления пластических деформаций с минимальными энергозатратами в течение всего процесса уплотнения.

Интенсификация инфраструктурного строительства предполагает дальнейшее повышение эффективности и производительности дорожных катков при уплотнении грунтовых сред, которое в конечном итоге связано с задачей повышения доли мощности уплотнителя, передаваемой деформируемой грунтовой среде, по отношению к полной мощности, затрачиваемой уплотнителем. Необходимо обеспечивать энергоэффективное использование дорожных катков при уплотнении грунтовых сред.

Большинство существующих исследований повышения эффективности уплотнения грунтовых сред дорожными катками, как отечественных, так и зарубежных, рассматривают подобные процессы с точки зрения интенсивности накопления пластических деформаций (по сути решая задачу повышения производительности). Той же цели служат методы исследований, развитые и использованные в этих работах. При этом не учитывается эффективность поглощения энергии, выдаваемой машиной деформируемому материалу с возможностью ее максимального перераспределения на деформирование в каждый определенный момент времени.

Разработка новых теоретических методов описания взаимодействия рабочих органов катков с уплотняемой средой, способных учесть особенности передачи мощности, является актуальной задачей. Результатами их приложения должны стать новые и перспективные конструкции рабочих органов уплотняющих средств и энергоэффективные режимы их работы при строительстве транспортных объектов. Эта область исследований в полной мере соответствует программе «Транспортная стратегия РФ на период до 2035 года» и национальному проекту «Безопасные и качественные дороги».

Научные исследования по решению проблемы повышения энергоэффективности дорожных катков при уплотнения грунтов в дорожном строительстве, проводимые в рамках диссертационной работы, с 2014 г. по 2016 г., поддерживались грантом Министерства образования и науки РФ «Повышение эффективности виброуплотнения упруговязкопластичных сред вибрационными катками» (код проекта 1192) и в 2018-2019 годах грантом

Российского фонда фундаментальных исследований совместно с Правительством Омской области «Разработка энергосберегающих технологий дорожного строительства и инновационной уплотняющей техники для климатических условий Омского региона» № 18-48-550005.

**Степень разработанности темы.** Вопросы создания высокопроизводительной дорожной техники для уплотнения грунтов и связанные с ними научные задачи являются областью постоянного интереса исследователей. Существенный вклад в изучение различных аспектов в этой области был внесен отечественными специалистами СоюздорНИИ, МАДИ, ХАДИ, СибАДИ и др. Нельзя не упомянуть в этой связи работы таких ученых, как Н. А. Азюков, В. Ф. Бабков, В.И. Баловнев, О. Т. Батраков, Д. Д. Баркан, А. К. Бируля, И. И. Блехман, А. А. Борщевский, И. И. Быховский, С. А. Варганов, С. С. Вялов, Н. М. Герсеванов, М. Н. Гольдштейн, Г. Ю. Джанилидзе, А.И. Доценко, А. Е. Дубровин, М. В. Дудкин, С. В. Жиркович, А. В. Захаренко, Н. Н. Иванов, С.Н.Иванченко, А. С. Ильин, Я. А. Калужский, М. П. Костельов, Г. В. Кустарев, А. А. Малышев, Н. И. Наумец, Н. А. Островцев, В. Б. Пермьяков, Г.Н. Попов, П.А. Ребиндер, С.В.Савельев, В. Н. Сорокин, И. С. Тюремнов, Н. Я. Хархута, Н. А. Цытович, А.А. Шестопалов и др. За рубежом уплотнением грунтов занимались: L. Forssblad, В.Н. Fellenius, К. Terzaghi, Н.Н. Kloubert, W. A. Lewis, W. V. Ping, P. E. Guiyan Xing, Michael Leonard, Zenghai Yang, K.R. Massarsch, Michael A. Mooney, Robert V. Rinehart, T. Sakai, J.H. Schmertmann, Paul van Susante, T. Tamura и др.

Этими учеными был успешно решен ряд теоретических задач в области повышения эффективности машин для уплотнения упруговязкопластичных сред, изучены основные закономерности взаимодействия рабочих органов (РО) уплотняющих машин с деформируемой средой, рассматриваемой в рамках различных модельных приближений. Выводы, полученные в рамках работ указанных выше ученых, позволили сформулировать положения, во многом определяющие дальнейшие подходы и тенденции как для теоретических исследований в области эффективных технологий уплотнения, так и в проектировании новых перспективных конструкций уплотняющей техники.

**Целью** настоящей диссертационной работы является повышение эффективности и производительности дорожных катков при уплотнении грунтовых сред.

В работе рассматривается задача повышения энергоэффективности процесса уплотнения грунтов земляного полотна дорожными катками, изучаются закономерностей передачи мощности уплотняющей машины уплотняемому грунту и параметры катков, обеспечивающие передачу деформируемой среде максимальной доли энергии, направленной на совершение полезной работы уплотнения.

В качестве **объекта** исследований выступает процесс взаимодействия рабочих органов катков с грунтовыми средами.

**Предметом исследования** являлись закономерности, определяющие параметры дорожных катков, характеристики их рабочих органов и режимов работы, влияющие на интенсивность и энергоэффективность процесса уплотнения грунтовых сред.

Цель работы обусловлена **научной гипотезой** о том, что адаптация вида силового воздействия дорожного катка для повышения интенсивности неупругого деформирования упруговязкопластичных сред должна обеспечиваться при минимальных затратах мощности катка.

Для её достижения необходимо решить следующие научные задачи:

1. Выявить возможные пути интенсификации уплотнения грунтовых сред на основе анализа существующих теоретических и практических исследований эффективности работы дорожных катков;

2. Обосновать и разработать математическую модель взаимодействия рабочего органа катка с уплотняемой средой, учитывающую характер распределения напряжений в среде и затрачиваемой энергии уплотнителя в зависимости от характеристик катка и режима его работы;

3. Исследовать процесс динамического деформирования упруговязкопластичных сред рабочими органами дорожных катков и определить их характеристики и параметры воздействия, влияющие на энергоэффективность процесса уплотнения, а также выявить величины, определяющие энергоэффективность применения дорожных катков при уплотнении грунтовых сред;

4. Сформулировать теоретические положения для проектирования дорожных катков, обеспечивающие повышение их энергоэффективности;

5. Проверить адекватность разработанной модели;

6. Исследовать особенности работы дорожного катка при уплотнении грунтовых сред, выявить комбинации режимов и параметров дорожных катков различных типов, обеспечивающих энергоэффективное уплотнение;

7. Разработать методику выбора параметров энергоэффективного режима работы вибрационных катков, в том числе и с перспективными рабочими органами, при уплотнении грунтов;

8. Разработать конструкции рабочих органов и устройств генерирования периодической силы для динамических режимов работы дорожных катков, обеспечивающие повышение их энергоэффективности и производительности.

#### **Научная новизна работы:**

– разработана математическая модель работы катка при уплотнении грунтовой среды, впервые учитывающая характер развития напряженно-деформированного состояния по толщине уплотняемого грунтового слоя и определены зависимости физико-механических характеристик активной области грунта от вида воздействия рабочего органа;

– впервые выявлены закономерности передачи энергии уплотнителя грунтовой среде в зависимости от динамических и частотных характеристик силового воздействия и скорости поступательного движения дорожных катков;

– выявлен комплексный характер влияния параметров дорожных катков, режимных параметров их работы и физико-механических свойств уплотняемого грунта на энергоэффективность процесса уплотнения. Определены величины, количественно характеризующие эффективность передачи уплотняемому материалу энергии уплотнителя;

– введены новые научные термины, уточняющие существующие определения для описания производительности и энергозатрат катков на энергоэффективных режимах работы.

#### **Теоретическая значимость:**

– предложен оригинальный теоретический метод описания процесса уплотнения грунтов дорожными катками, учитывающий особенности неравномерного поглощения энергии уплотнителя уплотняемой средой, зависимости сопротивляемости среды от режимных и конструктивных параметров уплотнителя;

– определены зависимости, описывающие влияние параметров рабочих органов катков на физико-механические характеристики уплотняемого грунта для различных режимов силового воздействия;

– предложены и теоретически обоснованы конструкции рабочих органов катков, позволяющих повысить эффективность передачи энергии уплотняющего воздействия катка деформируемому грунту с учетом зависимостей накопления пластических деформаций

слоя, определяемые эволюцией вида распределения нормальных напряжений в уплотняемом грунте;

- предложены новые показатели для оценки эффективности процесса уплотнения, учитывающие особенности передачи мощности дорожным катком в среде и связывающие энергоёмкость процесса уплотнения и производительность уплотняющей машины.

**Практическая значимость:**

- обоснован выбор критериев энергоэффективности применения дорожных катков для уплотнения грунтовых сред;

- разработаны рекомендации по выбору режимных параметров дорожных катков, соответствующие требованию энергоэффективности протекания процесса уплотнения;

- разработаны программно реализованные алгоритмы обоснования энергоэффективных параметров дорожных катков;

- разработана линейка новых конструкций рабочих органов и ряд технических решений для дорожных катков, обеспечивающих повышение энергоэффективности работы вибрационных катков.

**Методология и методы исследований.** Методология исследований основывалась на использовании методов системного анализа с привлечением статистических методов анализа результатов экспериментов. Общая методика исследований основывается на комплексном экспериментально-теоретическом подходе, включающем математическое моделирование на основе методов теоретической механики и численного анализа, механики грунтов и теории деформирования упруговязкопластичных сред для описания взаимодействия РО катка с уплотняемой средой. Эмпирические исследования включали экспериментальную проверку результатов теоретических исследований со статистической проверкой достоверности.

**Положения, выносимые на защиту:**

- оригинальный теоретический инструмент в виде математических моделей, описывающих взаимодействие дорожных катков с деформируемыми грунтовыми средами с точки зрения энергоэффективного протекания процесса уплотнения;

- совокупность критериев энергоэффективности использования дорожных катков при уплотнении грунтовых сред;

- алгоритмы обоснования энергоэффективных параметров дорожных катков с учетом конструктивных особенностей уплотнителя и физико-механических характеристик грунтов;

- новые конструкции рабочих органов, расширяющие диапазон силовых воздействий на уплотняемую среду с целью повышения эффективности работы катков;

- зависимости параметров и характеристик для новых рабочих органов вибрационных катков, обеспечивающих комплексное энергоэффективное уплотнение грунтов;

- совокупность практических рекомендаций по применению разработанных положений в виде методик обоснования параметров катков, технологических рекомендаций по использованию перспективных конструкций уплотняющих устройств.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены: 4th International conference on civil engineering and building materials, SEBM 2014, Hong Kong, 15-16 ноября 2014; г.; на Международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ» «Архитектура. Строительство. Транспорт» (г. Омск, 14-15 декабря 2015 г.); на II Всероссийской научно-практической конференции «Север России: стратегии и перспективы развития» (г. Сургут, 27 мая 2016 г.); на X Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск 15-16 ноября 2016 г.); на X Международной научно-технической конференции

«Динамика систем, механизмов и машин» (Омск 14-16 ноября 2017 г.); на XXI Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2018» (г. Москва, 8–12 октября 2018 г.); на XI Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск 13-15 ноября 2018 г.); на III Международной научно-технической конференции «Mechanical science and technology update» (Проблемы машиноведения) (Омск, 23-24 апреля 2019), .); на XXI Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2019» (г. Казань, 11-13 сентября 2019 г.); на Международной научно-практической конференции (к 90-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ» «Архитектура. Строительство. Транспорт» (г. Омск, 4-5 декабря 2020 г.); на заседаниях кафедры «ЭСМиК» ФГБОУ ВО «СибАДИ» и др.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 40 печатных работ, из них 10 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 8 в изданиях, входящих в международные базы научного цитирования «Scopus» и «Web of Science», получено 8 патентов на изобретения и полезные модели РФ, опубликована 1 монография.

**Внедрение результатов исследований:** результаты диссертационного исследования прошли практическую апробацию и были внедрены на предприятиях и в организациях дорожно-строительной отрасли и производства дорожных машин: ООО «Завод дорожных машин» (г. Рыбинск), ООО «Стройсервис» (г. Омск).

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложений. Объём диссертации составляет в целом 386 страниц, в том числе 35 таблиц, 102 рисунка и 4 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит общую характеристику работы, формулировку цели работы, постановку задач, требуемых для ее достижения. Обоснована актуальность темы работы, новизна и оригинальность полученных результатов.

**Первая глава** «Анализ современных подходов к задаче повышения энергоэффективности дорожных машин для уплотнения грунтовых сред» содержит обзорные сведения по существующим результатам в области повышения эффективности использования уплотняющей техники. В главе выполнен анализ существующих методов и средств уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве путем поверхностным силовым воздействием, а также способов его теоретического описания. Значительный вклад в развитие теории уплотнения дорожностроительных материалов и проектирования уплотняющих машин внесли В.И. Баловнев, О.Т. Батраков, Д. Д. Баркан, И. И. Блехман, С. С. Вялов, Н. М. Герсевич, М. Н. Гольдштейн, А. В. Захаренко, Н. Н. Иванов, С.Н. Иванченко, Я. А. Калужский, М. П. Костельов, Г. В. Кустарев, В. Б. Пермяков, Г.Н. Попов, П.А. Ребиндер, С.В.Савельев, И. С. Тюремнов, Н. Я. Хархута, Н. А. Цытович, А.А. Шестопапов, L. Forssblad, В.Н. Fellenius, K. Terzaghi, Н.Н. Kloubert, W. A. Lewis, W. V. K.R. Massarsch, Michael A. Mooney, Robert V. Rinehart, T. Sakai, J.H. Schmertmann, T. Tamura. Силовое воздействие приводит к накоплению слоев необратимых деформаций, результатом которого становится изменение его физико-механических характеристик. Величиной, характеризующей качество процесса уплотнения грунтов дорожными катками, традиционно выступает коэффициент уплотнения (1)

$$k_y = \frac{\rho(t)}{\rho_{ном}}, \quad (1)$$

где  $\rho(t)$  - текущая плотность грунта, достигнутая к моменту времени  $t$  ;

$\rho_{ном}$  - номинальная плотность (плотность по стандартному уплотнению), определяемая нормативными документами для каждого типа грунта.

Все режимы уплотняющего воздействия, реализуемого для уплотнения грунтовых сред дорожными машинами, можно разделить на статические и динамические.

Широко используемым типом катков являются в настоящее время гладковальцовые статические катки, характеризующиеся простотой конструкции, но недостаточной производительностью, особенно значимой в условиях активного инфраструктурного строительства. Единственным способом адаптации статического действия таких катков по контактному давлению на грунт является увеличение массы катка для уплотнения грунта на заключительных этапах, декларируемое СНиПом. Поглощение энергии уплотняющего воздействия уплотняемым грунтом является наиболее низким.

Статические катки с кулачковыми и решетчатыми вальцами демонстрируют более высокую эффективность, чем гладковальцовые, особенно при уплотнении связных грунтов. Адаптивные свойства кулачковых вальцов реализуются естественным образом за счет изменяющейся с уплотнением глубиной погружения в грунт кулачка типа «padfoot» с соответствующим возрастанием давления на площадке его контакта с материалом. Производительность кулачковых катков также является невысокой, особенно с учетом требования использования гладковальцового катка для укатки поверхностной области слоя грунта, разрушенной кулачками, но энергоэффективность в силу особенностей взаимодействия кулачков и материала слоя, повышается по сравнению с гладковальцовыми статическими катками.

Пневмошинные статические катки обладают более высокой производительностью, чем указанные выше. Их адаптивные возможности обеспечиваются как естественным регулированием площади пятна контакта при упрочнении уплотняемого грунта, так и возможностью изменять его величину варьируя давление воздуха в шинах. Однако адаптация воздействия пневмошинных катков происходит исключительно по контактному давлению, без учета изменяющихся свойств отклика грунтовой среды на деформирующее воздействие. Это не позволяет привести значения энергопоглощения средой уплотняющего воздействия к оптимальным.

Динамические режимы уплотнения, основным из которых является вибрационное уплотнение, наряду с повышенной производительностью демонстрирует и значительно более высокие возможности адаптации как по скоростным и силовым, так и по частотным параметрам. Количественной характеристикой повышения эффективности вибрационного катка, по отношению к статическому, позволяющему добиться того же коэффициента уплотнения, выступает коэффициент эффективности  $k_{eff}$ , определяемый Я.А.Калужским и О.Т.Батраковым как отношение амплитуд их линейных давлений на ось вальца с учетом возмущающей гармонической силы

$$k_{eff} = \frac{q_{st}}{q_{vib}}, \quad (2)$$

где  $q_{st}$  - средняя линейная нагрузка на оси статического катка,  $q_{vib}$  - средняя линейная нагрузка на оси вибрационного катка, необходимые для того, чтобы уплотнить слой грунта заданной (оптимальной) толщины до требуемой плотности.

Адаптация по контактному давлению для вибрационных катков может быть реализована в катках с пневмошинными рабочими органами специального вида. Динамический характер воздействия при вибрационном уплотнении и вибротрамбовании, тем не менее, позволяет привлекать свойства сложной колебательной системы для выявления режима



воздействия, при котором мощность уплотняющей машины будет расходоваться на неупругое деформирование грунтового слоя наиболее рационально.

**Научная гипотеза:** Эффективность работы уплотняющей техники обусловлена максимальной интенсивностью накопления пластических деформаций уплотняемой средой при минимальных энергозатратах уплотняющей дорожной машины. Необходимо обосновывать рациональные параметры дорожных катков и в том числе и параметры адаптации, обеспечивающие повышение производительности и энергоэффективности исходя из динамических критериев, задаваемых требуемыми значениями контактного давления.

**Идея работы:** осуществлять подбор рациональных параметров катков, режимов динамического воздействия и конструкций рабочих органов, их реализующих, таким образом, чтобы наряду с выполнением неперемного условия на требуемые контактные давления при работе катков соблюдались условия, приводящие к воздействию на грунтовую среду, оптимально соответствующему ее текущему состоянию, с точки зрения поглощения энергии, идущей на неупругое деформирование. Эти условия соответствуют требованию минимизации сопротивляемости грунта уплотняющей силе.

Ключевым свойством энергетического подхода, используемого при решении поставленных в работе задач, является его универсальность. Рассмотрение уплотнения грунтовых сред с точки зрения эффективности энергопередачи позволяет объединить критерии качества процесса уплотнения для различных типов катков, используемых для проработки грунтовых сред, отличающихся как толщиной, так и физико-механическими характеристиками. Единый теоретический подход, предполагающий энергоэффективность ключевым параметром технологического процесса, необходим для рассмотрения как деформирования среды, так и движения рабочего органа, в первую очередь, при осуществлении динамических режимов уплотнения.

Научная задача выявления особенностей и характеристик энергоэффективной работы дорожных катков при уплотнении грунтовых сред является проблемой унификации подхода к рассмотрению движения уплотняемой грунтовой среды, находящейся в напряженно-деформируемом состоянии, и движения обменивающегося с ней энергией рабочего органа уплотнителя.

**Вторая глава** «Анализ свойств грунтовых сред при их взаимодействии с рабочим органом дорожных катков для обеспечения энергоэффективного уплотнения» затрагивает вопросы, связанные с влиянием характеристик грунтовых сред на особенности исследования взаимодействия их с рабочим органом дорожной машины. Грунты, рассматриваемые, как упруговязкопластичные среды, в силу своего строения обладают физико-механическими характеристиками, варьирующимися в очень широких пределах в зависимости от особенностей минералогического и гранулометрического состава, а также от особенностей сил взаимодействия, связывающих между собой частицы среды. Эти особенности не только усложняют выбор параметров уплотняющей техники, обеспечивающей эффективные режимы уплотняющего воздействия, но и расширяют диапазон характеристик, позволяющих адаптировать воздействие уплотнителя согласно изменяющимся в процессе уплотнения свойствам грунтовой среды.

Теоретические положения взаимодействия уплотнителей с грунтами, реализованные в рамках различных подходов к динамике грунтовых сред, основывающиеся и подтверждающиеся совокупностью эмпирических данных для многих типов используемых грунтов были развиты такими специалистами, как Э.А. Абраменков, В.А. Анфимов, В.Г. Баженов, Д.Д. Баркан, В.Ф. Бабков, О.Т. Батраков, В.А. Бидерман, А.К. Бируля, В.И. Гребенщиков, А.И. Доценко, А. В. Захаренко, В.И. Кнороз, Г.И. Кустарев, А. А. Малышев, Н.Н. Иванов, В. Б. Пермяков, В. Н. Тарасов, Р. Хедекель, Н.Я. Хархута и др.

Результаты анализа совокупности теоретических и экспериментальных исследований приводят к выводу, что наиболее действенным способом повышения интенсивности уплотняющего воздействия на грунтовые среды выступает комплексное адаптирование параметров уплотнителя во всем спектре доступных видов и режимов воздействия.

Особенности отклика грунтовых сред на деформирующее воздействие обусловлены в первую очередь минералогическим и гранулометрическим составом материала, что учитывается величинами, описывающими их физико-механические свойства и видом зависимости «напряжение - относительная деформация».

Возрастание плотности грунта при поверхностном силовом воздействии дорожных катков приводит к изменению предельных значений напряжений и к изменению вида самой кривой. Это объясняет тот факт, что при сохранении параметров уплотняющего воздействия после набора грунтовым слоем соответствующей прочности, дальнейшее уплотнение невозможно и для уплотнения до номинальных значений необходимо изменять характер поверхностного силового воздействия. Такое поведение грунтовых сред при уплотнении учитывается соответствующими нормативными документами.

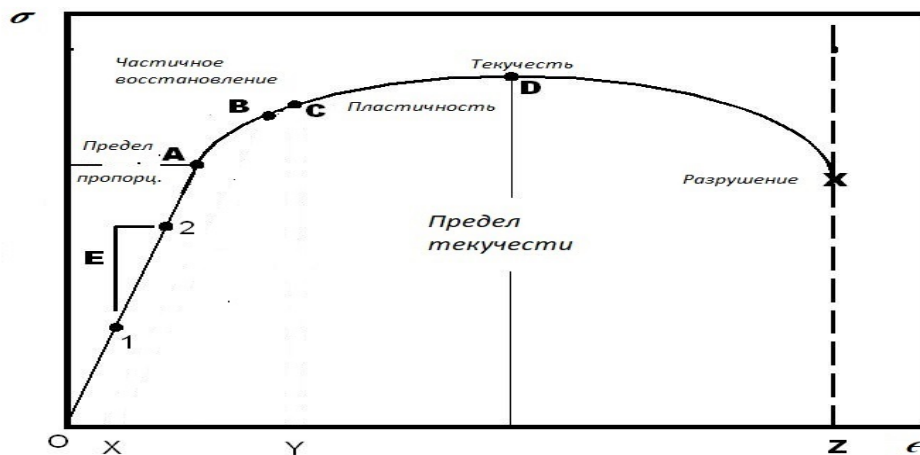


Рисунок 1 – Кривая «напряжение - деформация» для грунтовой среды при ее уплотнении дорожным катком

Деформационные характеристики грунтовой среды – модули деформации, как полной, так и упругой, коэффициент динамической вязкости, пределы пластичности, текучести и прочности находятся в прямой зависимости от этапа процесса уплотнения (мгновенного значения коэффициента уплотнения), а также типа грунтовой среды и ее состава. Их аппроксимированные зависимости от коэффициента уплотнения служат входными данными для реализации вычислительной схемы моделей.

Интенсивность процесса уплотнения существенно зависит от ряда факторов, определяемых как характером уплотняющего воздействия, так и особенностями отклика на него среды. К этим факторам относятся величина контактных напряжений, параметры динамического режима нагружения – скорость приложения силы, ее частота, а также величины определяющие особенности состава грунтовой среды - пористость, доля жидкой фазы (влажность).

Для определения эффективного объема уплотняемой области грунтовой среды ключевой является информация о распределении напряжений внутри слоя, порождаемых источником поверхностного силового воздействия. Характер распределения напряжений определяется размерами и формой пятна контакта РО уплотнителя с поверхностью слоя, которые зависят как от размеров и деформационных характеристик РО, так и самой среды.

Описание взаимодействия РО уплотнителя с уплотняемым объемом грунтовой среды может вестись в рамках ряда хорошо зарекомендовавших себя теоретических подходов. Для ряда грунтов могут быть использованы стохастические методы, рассматривающие материал как гранулированную среду, изучающую деформацию грунта как результат взаимодействия составляющих ее частиц. Рассмотрение грунтов как упруговязкопластичной среды эффективно в рамках подхода, рассматривающего грунт как непрерывную среду с привлечением эффективных методов описания динамики сплошных сред.

Наилучшим образом для описания передачи энергии деформируемой грунтовой среде, для значений напряжений, не превышающих предела прочности материала, подходит метод сосредоточенных параметров. Несмотря на существенную зависимость от эмпирических данных о физических свойствах среды, этот подход позволяет осуществлять как выбор параметров поверхностного силового воздействия, так и выявлять энергоэффективные режимы использования уплотняющих машин с технически ограниченными эксплуатационными характеристиками.

Определяющим для взаимодействия катка с уплотняемой средой является то, как контактное давление на их пятне контакта передается слою. Начальным этапом для рассмотрения этого этапа взаимодействия катка и уплотняемой среды выступает выбор и последующий анализ модели развития напряжений по толщине слоя при заданном виде пятна контакта. Учитывая форму его поверхности, традиционно рассматривают нагрузку в виде бесконечной полосы шириной с поверхностным давлением как совокупность линейно распределенных элементарных нагрузок,

Выявление энергоэффективных режимов уплотнения грунтовых сред как способ интенсификации технологических процессов в дорожном строительстве требует описания взаимодействия РО уплотнителя с активной зоной деформируемой области среды, учета и контроля ряда факторов, определяющих деформационные свойства среды.

Интенсификация и повышение эффективности процесса уплотнения, в том числе и энергоэффективности, требует адаптации уплотняющего воздействия в соответствии с изменяющимся комплексом характеристик среды с повышением плотности. Анализ экспериментальных и теоретических исследований выявил ряд способов адаптирования уплотнителем параметров, позволяющих повысить интенсивность уплотняющего воздействия на обрабатываемую грунтовую среду;

- адаптирование по контактному давлению, которое может проводиться как изменением величины силы воздействия, так и изменением величины площади контакта;

- адаптирование по скорости приложения нагрузки в случае динамических режимов воздействия, регулируемое частотными характеристиками силы внешнего воздействия при вибрационном уплотнении и высотой падения трамбовки при трамбовании;

- адаптирование по продолжительности времени силового воздействия, которое может вестись как регулированием поступательной скорости движения уплотнителя, так и частотными характеристиками силового воздействия;

- адаптирование по энергетическим характеристикам силового воздействия, которое в конечном итоге является комплексным, учитывающем большинство доступным факторов и характеризующемся эффективностью и качеством передачи грунтовой среде энергии уплотнителя.

**Третья глава** «Теоретические исследования взаимодействия рабочего органа уплотнителя с активной областью упруговязкопластичной среды» посвящена формулированию основных положений теории обоснования методов уплотнения и конструирования устройств, обеспечивающих интенсификацию уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве. Она требует решения задачи о моделировании взаимодействия уплотняющей дорожной машины с уплотняемым слоем материала.

Основным подходом для этого выступает метод сосредоточенных параметров, при котором область грунтового слоя, непосредственно вступающая во взаимодействие с рабочим органом дорожного катка, рассматривается как массивный элемент, обладающий вязкими, упругими и пластическими свойствами. Это дает возможность выявить как величину остаточного смещения поверхности слоя в результате неупругого деформирования материала, так и определить энергетические характеристики взаимодействия, включая мощность, затрачиваемую на деформирование, тем самым определяя энергоемкость операции уплотнения, выполняемую дорожным катком.

Определение формы и деформативных характеристик активной области является задачей, от которой зависит эффективная реализация расчетной схемы модели. При этом важен учет характера поверхностного силового воздействия, определяющего развитие НДС в уплотняемой среде.

В главе сформулирован подход к моделированию взаимодействия рабочего органа уплотнителя и активной области грунтового слоя с точки зрения модифицированного подхода сосредоточенных параметров, позволяющего учесть распределение напряжений в среде и особенности силового воздействия. При этом учитывается, что для эффективного уплотнения должно выполняться условие на контактные давления (по проф. Пермякову)

$$\sigma_{тек}(t) < \sigma(t) \leq \sigma_{разр}(t). \quad (3)$$

Уравнение реологии материала слоя определяется силами инерционного, вязкого, упругого и неупругого сопротивления деформированию.

$$\sigma(t) = \sigma_{структ} + \sigma_{вязк} + \sigma_{инерц} \quad (4)$$

$$\sigma_{вязк} = \eta \dot{\varepsilon}_{полн}, \quad \sigma_{инерц} = \rho \ddot{\varepsilon}_{полн},$$

$$\sigma_{структ} = E_{деф} \varepsilon_{полн} \theta(\sigma_{тек} - \sigma) + \sigma_{тек} \theta(\sigma - \sigma_{тек}) \text{sign}(\dot{\varepsilon}_{полн}) \quad (5)$$

$$E_{деф} = \frac{E_{упр} E_{пласт}}{E_{пласт} + E_{упр}}, \quad \varepsilon_{полн} = \varepsilon_{пласт} + \varepsilon_{упр}$$

Анализ существующих моделей отклика грунтовой среды на силовое воздействие, позволил выявить комбинированные модели, описывающие процесс уплотнения, как процесс накопления неупругих деформаций. Тем самым была модифицирована и усовершенствована теория взаимодействия РО катка с деформируемой упруговязкопластичной средой проф. С.В. Савельева. Предложенный способ описания позволил учесть как неоднородность свойств взаимодействия РО катка с материалом слоя по его толщине, так и их изменение при наборе уплотняемым грунтом плотности.

Уравнение (6) движения участка активной области, моделируемого упруговязкопластичным телом с рис.2, является следствием уравнений Лагранжа и учитывает возможное изменение массы участка при перераспределении характеристик слоя в процессе уплотнения.

Исследования, проведенные в работе, позволили связать распределение нормальных напряжений, от действия дорожного катка, по толщине слоя уплотняемого грунта с реологически неэквивалентными телами многомассовой модели. Система (10) описывает взаимодействия РО катка с модели прорабатываемой области грунтового слоя в рамках многомассовой модели (Рис.3) под воздействием силы, создающей давление  $\sigma_0$  на поверхности пятна контакта и ограниченной в грунте изобарой напряжения  $\sigma_0$ .

$$\begin{aligned}
& m(\sigma_1, \sigma_0) \ddot{z} + \frac{\partial m(\sigma_1, \sigma_0)}{\partial t} \dot{z} = \\
& = -(c_{\text{деф}}(\sigma_1, \sigma_0))(1 - \theta(\sigma_1 - \sigma_{\text{мек}}))z - b(\sigma_2, \sigma_1) \dot{z} - \frac{\dot{z}}{|\dot{z}|} \theta(\sigma_1 - \sigma_{\text{мек}}) S_{\text{cont}}(\sigma_1) \sigma_{\text{мек}} + F_{\text{внеш}}(t) \quad (6)
\end{aligned}$$

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

При этом учитывалось, что при послойном уплотнении обеспечивается более равномерное уплотнение слоя. Для случая многомассовой модели прорабатываемой области грунтового слоя система уравнений деформирования рабочим органом катка приобретает вид (10).

$$\left\{ \begin{aligned}
& m_{PO} \ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO}) \dot{z}_{PO} + F_{\text{внеш}}(t) \\
& m_1(\sigma_1, \sigma_0) \ddot{z}_1 + \frac{\partial m_1(\sigma_1, \sigma_0)}{\partial t} \dot{z}_1 = \\
& = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{\text{мек}})) - b_1(\sigma_1, \sigma_0)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl}) S_{\text{cont}} \sigma_{\text{мек}} \\
& m_2(\sigma_2, \sigma_1) \ddot{z}_2 + \frac{\partial m_2(\sigma_2, \sigma_1)}{\partial t} \dot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{\text{пласт}}) S_{\text{cont}}(t) \sigma_{\text{пласт}} - c_{2\text{деф}}(\sigma_2, \sigma_1)(z_2 - z_3) - b_2(\sigma_2, \sigma_1)(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) \\
& m_3(\sigma_3, \sigma_2) \ddot{z}_3 + \frac{\partial m_3(\sigma_3, \sigma_2)}{\partial t} \dot{z}_3 = c_{2\text{деф}}(\sigma_2, \sigma_1)(z_2 - z_3) - c_{3\text{деф}}(\sigma_3, \sigma_2)z_3 - b_3(\sigma_3, \sigma_2) \dot{z}_3
\end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$F_{\text{внеш}}(t) = F_{\text{вибро}} + F_{\text{ст}} = (m_{PO} + m_{\text{рамы}})g + mr(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft) = S_{\text{конт}}(t) \sigma_{\text{к}}(t)$$

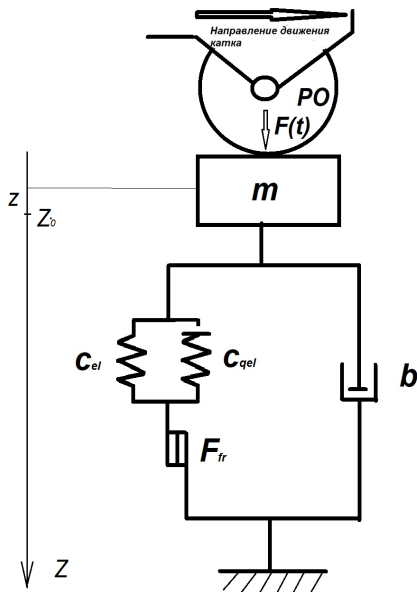


Рисунок 2 – Одномассовая модель взаимодействия РО дорожного катка с активной областью деформируемой грунтовой среды.

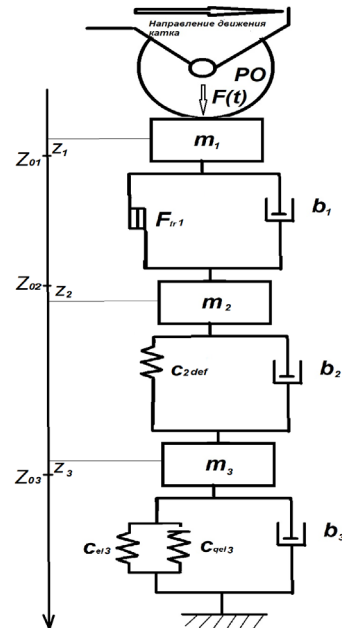


Рисунок 3 – Многомассовая модель взаимодействия РО дорожного катка с активной областью деформируемой грунтовой среды.

Проведенные исследования позволили выявить механические модели, реализующие динамику деформирования грунтовой среды при силовом воздействии уплотнителя и прийти к следующим выводам:

1) Для модельного описания системы «рабочий орган – активная область грунтового слоя» могут быть применены многомассовые модели, построенные в рамках подхода сосредоточенных параметров;

2) Модели отражают реологические свойства грунтового слоя и его деформационные характеристики, задаваемые напряженно деформируемым состоянием точек области слоя, учитывая интенсивность поглощения энергии уплотнителя;

3) Рабочий орган дорожной машины влияет на характеристики элементарных тел, составляющих активную область уплотняемого грунта;

4) Выбор формы и размеров областей может осуществляться принудительно, на основании экспериментальных данных или проходить с использованием картины распределения нормальных напряжений в деформируемом слое, порождаемых поверхностным воздействием. В качестве границ областей выступают изобары нормального напряжения, определяемого по Вестергаарду (Рис.4).

$$\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_W; \quad I_W = \frac{\gamma}{2\pi(\gamma^2 + (r/z)^2)^{3/2}}; \quad \gamma = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2-\mu}},$$

где  $Q$  - величина точечной нагрузки,  $\sigma_z$  - нормальное напряжение в толщине слоя,  $I_W$  - коэффициент влияния Вестергарда,  $\mu$  - коэффициент Пуассона среды.

5) При выборе размера и формы областей активной зоны на основании распределения нормальных напряжений при деформировании грунтов дорожными катками, модель претерпевает эволюцию неэквивалентных элементарных грунтовых областей. Выбор распределения нормальных напряжений позволил получить аналитический вид сечений цилиндрических поверхностей постоянного напряжения, ограничивающий эти области представляющие эллипсы (8), зависящие величины от величины напряжения.

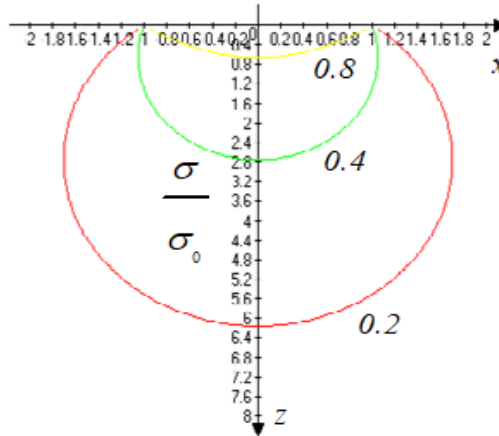


Рисунок 4 – Вид распределение изобар в грунтовом слое от силового действия дорожного катка по Вестергаарду (случай равномерного распределения поверхностной нагрузки  $\sigma_0$  по полосе известной ширины  $2a$ )

$$\sigma_z(x, z) = \int_{-b}^{+b} d\sigma_z(\tau) = \frac{\sigma_0 \gamma}{\pi} \int_{-a}^{+a} \frac{z d\tau}{(\gamma^2 z^2 + (x - \tau)^2)} = \frac{\sigma_0}{\pi} \left( \arctan\left(\frac{x+a}{\gamma z}\right) - \arctan\left(\frac{x-a}{\gamma z}\right) \right),$$

$$\zeta = x/a; \quad \xi = z/a$$



$$\sigma_z(\xi, \zeta) = \frac{\sigma_0}{\pi} \left( \arctan\left(\frac{\xi+1}{\gamma\zeta}\right) - \arctan\left(\frac{\xi-1}{\gamma\zeta}\right) \right) \quad (8)$$

$$\frac{(\zeta - \frac{1}{\gamma C})^2}{\frac{1}{\gamma^2}(1 + \frac{1}{C^2})} + \frac{\xi^2}{(1 + \frac{1}{C^2})} = 1; \quad C = \tan \frac{\pi\sigma_z}{2\sigma_0} = const,$$

Это подход наилучшим образом применим для исследования особенностей передачи энергии уплотнителя деформируемому грунту и определения ее затрат на пластическое деформирование среды.

В четвертой главе «Экспериментальное обоснование критериев энергоэффективности работы дорожных катков для уплотнения грунтовых сред» представлены результаты экспериментов. Исследования деформирования грунтовой среды штампами, имитирующими различные виды рабочих органов катка, смогли выявить адекватность предложенной математической модели взаимодействия рабочего органа дорожной машины с активной областью грунтового слоя. Определены жесткости и вязкости активной зоны, оцениваемые по интенсивности развития поверхностной деформации грунтового слоя. Проводился трехфакторный эксперимент с параметрами, определяемыми условиями задачи.



Рисунок 5 – Экспериментальная установка в грунтовом канале СибАДИ и штамп цилиндрической формы



Рисунок 6 – Экспериментальная установка в грунтовом канале СибАДИ и штамп плоской формы

**Выбор критерия.** Критерий (Y): необратимое смещение штампа при падении груза с заданной начальной скоростью.

**Определение факторов.** Основными факторами, определяющими характер деформирования упруговязкопластичной среды жестким штампом, выступают:

- статическая сила давления (вес системы груз-штамп) (X1);
- начальная скорость деформирования (высота падения груза) (X2)
- толщина грунтового слоя (X3).

Область определения факторов определяется по схеме полнофакторного эксперимента, и предусматривает одновременное варьирование всех исследуемых факторов на двух уровнях: верхнем (Max), имеющем максимальное значение рассматриваемого фактора, и нижнем (Min), соответствующем минимальному значению фактора. Интервалы изменения факторов в эксперименте представлены в таблицах 1 и 2. Для оценки числа экспериментов  $N$ , требуемых для охвата всех пар вариаций рассматриваемых  $k$  факторов можно использовать известное соотношение  $N = 2^k$

Таблица 1 – Интервалы изменения факторов в трехфакторном эксперименте (плоский штамп)

| Факторы | Уровни  |         |
|---------|---------|---------|
|         | Min(-1) | Max(+1) |
| X1      | 165 Н   | 320 Н   |
| X2      | 0.25 м  | 0.85 м  |
| X3      | 0.2 м   | 0.34 м  |

Таблица 2 – Интервалы изменения факторов в двухфакторном эксперименте (штамп в виде участка цилиндрической поверхности)

| Факторы | Уровни  |         |
|---------|---------|---------|
|         | Min(-1) | Max(+1) |
| X1      | 225 Н   | 385 Н   |
| X2      | 0.25 м  | 0.85 м  |
| X3      | 0.2 м   | 0.38 м  |

Теоретические значения критерия Y, рассчитывались в рамках предложенной выше модели для импульсной внешней силы, ступенчато возрастающей до значения фактора X1.

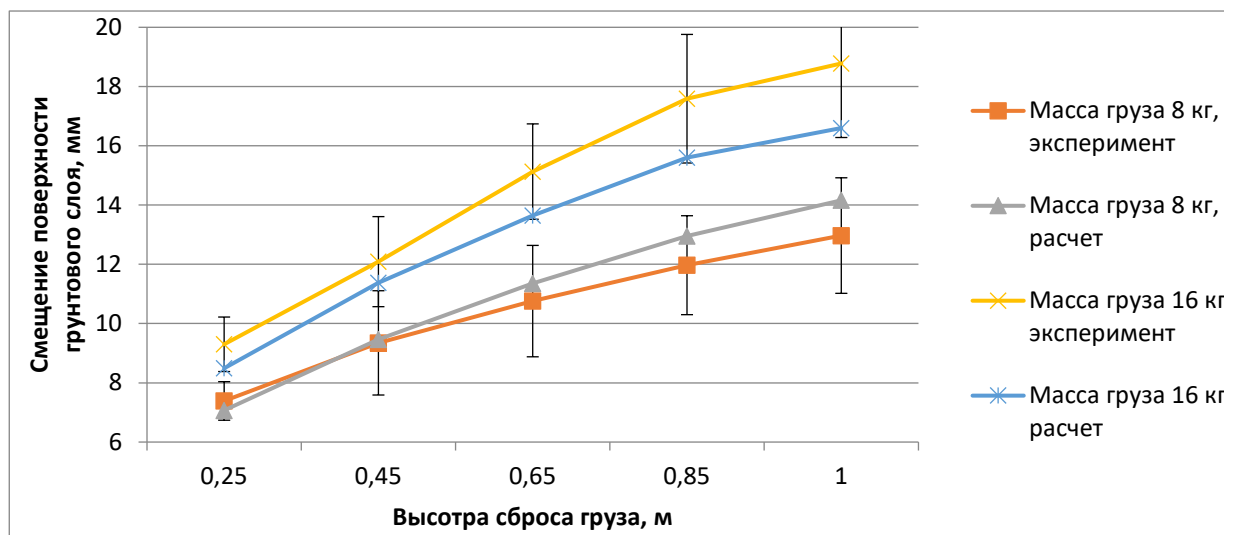


Рисунок 7 – Экспериментальная зависимость смещения поверхности слоя суглинистого грунта при ее деформировании штампом цилиндрической формы



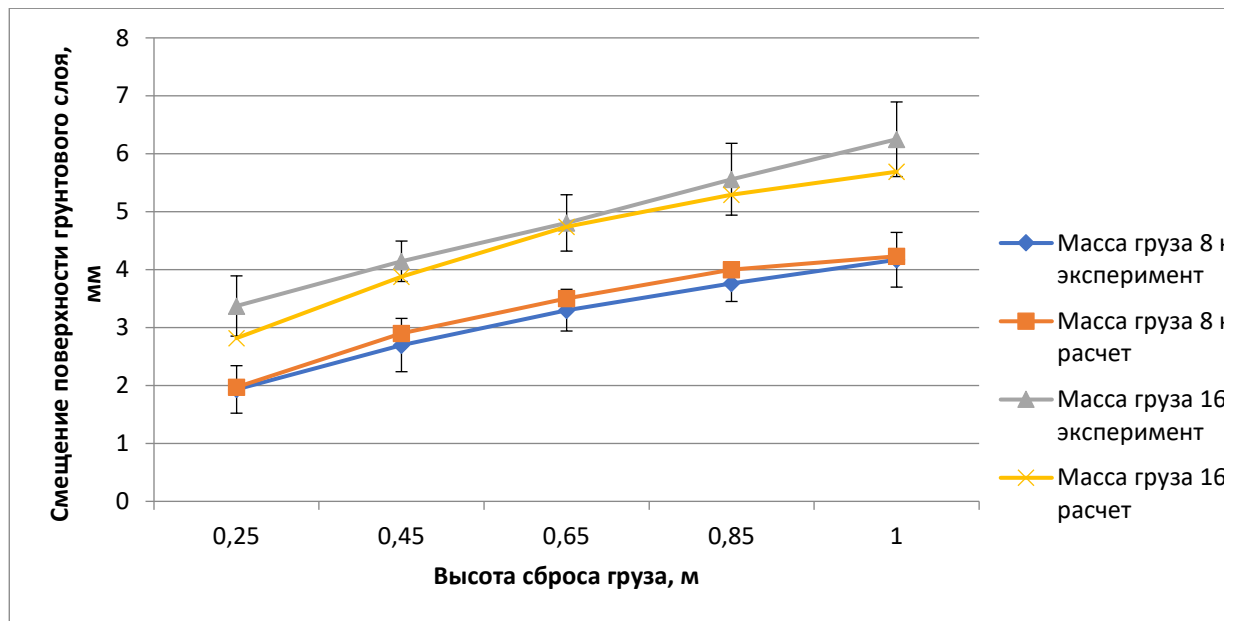


Рисунок 8 – Экспериментальная зависимость смещения поверхности слоя су-глинистого грунта при ее деформировании штампом плоской формы

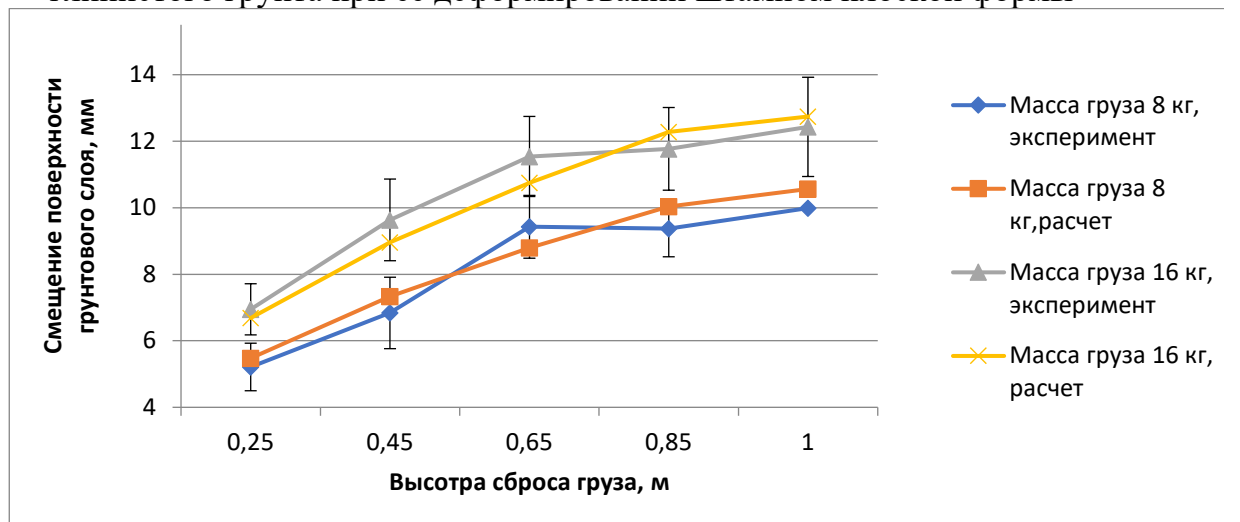


Рисунок 9 – Экспериментальная зависимость смещения поверхности слоя су-песчаного грунта при ее деформировании штампом цилиндрической формы

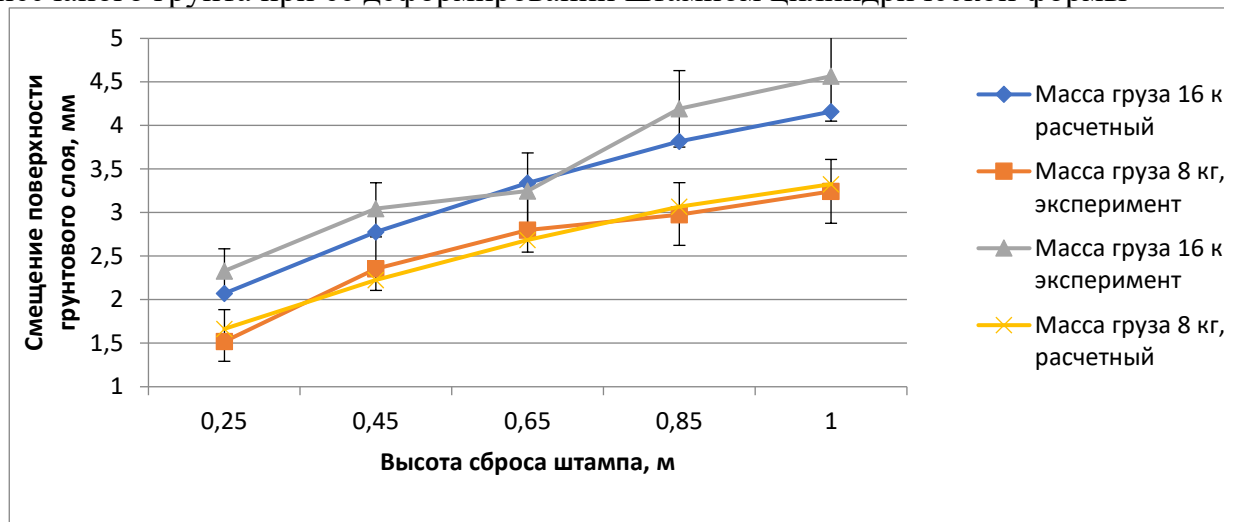


Рисунок 10 – Экспериментальная зависимость смещения поверхности слоя су-песчаного грунта при ударном деформировании штампом плоской формы

Расхождение экспериментальных результатов с теоретическими данными не превышало 12%, находясь в пределах погрешности измерений.

Полученные экспериментальные данные подтверждают адекватность предложенного теоретического инструмента для проведения исследований взаимодействия дорожных катков с деформируемыми грунтами.

Дальнейшие экспериментальные исследования проводились для уплотнения супесчаных и суглинистых грунтов в реальных условиях эксплуатации дорожных катков.

Натурный эксперимент с использованием вибрационного катка Stavostroj STA VHS 102K (Рис. 11) на конструктивной частоте 42 Гц показал результат, совпадающий с теоретически предсказанным для песчаных и супесчаных грунтов с точностью до погрешности измерений, не превышавшей 10%.

Натурный эксперимент с использованием вибрационного катка ДУ-107 (Рис. 12) на конструктивных частотах 30-60 Гц также показал результат, совпадающий с теоретически предсказанным для суглинистых грунтов с точностью до погрешности измерений, не превышавшей 12%.

Теоретически выявлена и подтверждена результатами экспериментов новая зависимость, связывающая интенсивность деформирования песчаных и супесчаных грунтов с энергопоглощением и деформативными свойствами материала слоя, изменяющимся с уплотнением, и позволяющая обосновывать энергоэффективные режимы использования вибрационных катков для уплотнения слоев грунтовых сред.

Эксперименты подтвердили адекватность теоретического подхода к моделированию взаимодействия рабочих органов вибрационных катков с активной областью уплотняемой среды на примере песчаных и супесчаных грунтов (Рис. 13, Рис. 14.).



Рисунок 11– Исследования уплотнения супесчаных грунтов катком Stavostroj STA VHS 102K



Рисунок 12 – Исследования уплотнения суглинистых грунтов катком дУ-107

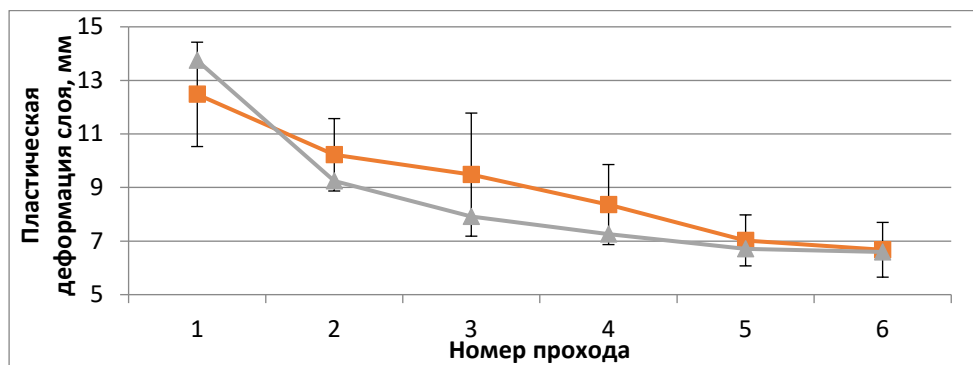


Рисунок 13 – Зависимость величины пластической деформации от количества проходов катка Stavostroj STA VHS 102K (супесь  $h=0.65$  м, скорость  $v=2.5$  км/ч)

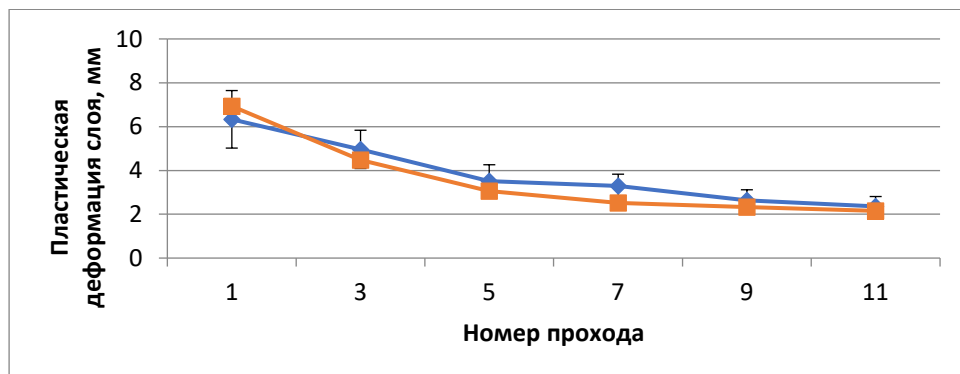


Рисунок 14 – Зависимость величины пластической деформации от количества проходов катка ДУ-107 (суглинок  $h=0.35$  м, скорость  $v=2.4$  км/ч)

Подтверждены результаты теоретических исследований, определившие оптимальный характер накопления деформаций на слабоуплотненном супесчаном грунте – коэффициент уплотнения  $k_y=0.8-0.86$  на скоростях  $v=2-2,5$  км/ч; среднеуплотненном грунте –  $k_y=0.86-0,92$  на скоростях  $v=3-4,5$  км/ч; уплотненном грунте –  $k_y=0.92-0,98$  на скоростях  $v=4.5-6$  км/ч.

Подтверждена адекватность теоретического подхода к моделированию взаимодействия рабочих органов вибрационных катков с уплотняемой средой для суглинистых грунтов. Выявлены особенности деформирования, существенные для выбора энергоэффективного скоростного режима уплотнения. Подтверждены результаты теоретических

исследований, определившие оптимальный характер накопления деформаций на слабоуплотненном грунте – коэффициент уплотнения  $k_y=0.8-0,86$  на скоростях  $v=3-4$  км/ч; среднеуплотненном грунте – коэффициент уплотнения  $k_y=0.86-0,92$  на скоростях  $v=2-3$  км/ч; уплотненном грунте – коэффициент уплотнения  $k_y=0.92-0,98$  на скоростях  $v=1-2$  км/ч.

**Пятая глава** работы «Обоснование энергоэффективных конструкций и режимов работы дорожных катков» была посвящена обоснованию повышения эффективности уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве, рассматриваемого с точки зрения энергетического подхода. Обосновывались критерии оценки интенсивности процесса деформирования грунтовых сред. Вводились дополнительные управляющие параметры для обеспечения его энергоэффективности.

Исходя из новых полученных в работе научных знаний в виде закономерностей развития НДС при уплотнении грунтовых сред поверхностным силовым воздействием предложен динамический критерий эффективности вибрационного уплотнения – полное механическое сопротивление (механический импеданс) активной области грунтового слоя.

Амплитуда вынужденных колебаний, вызываемых катком в активной области слоя периодической внешней силой может быть определена как

$$\Delta z_{\max} = \frac{F_0}{m\sqrt{((\omega_0(y, \Delta z))^2 - \omega^2)^2 + k(y, \Delta z)^2 \omega^2}}. \quad (9)$$

Здесь учтена зависимость собственной частоты (жесткости) и коэффициента  $k$  от смещения и характеристик пятна контакта РО с поверхностью слоя, параметризованной его длиной  $y$ . Величина в знаменателе

$$Z = m\sqrt{((\omega_0(y, z))^2 - \omega^2)^2 + k(y, \Delta z)^2 \omega^2} \quad (10)$$

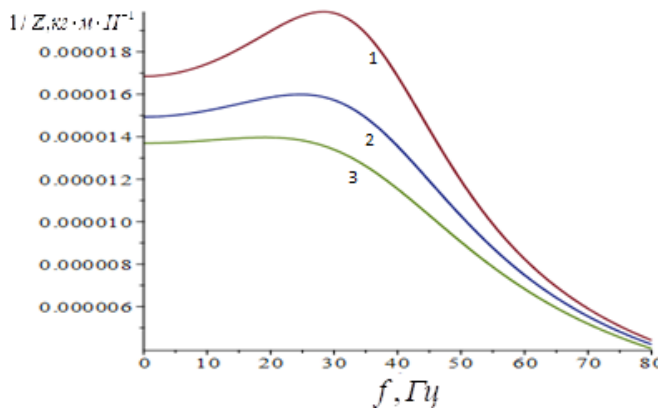
представляет собой механический импеданс соответствующей колебательной системы. Импеданс определяет, насколько хорошо происходит поглощение системой энергии колебаний с ее переходом в энергию механического движения.

Остаточная деформация на одном цикле виброуплотнения зависит от коэффициента восстановления уплотняемого объема грунта  $\alpha$ , описывающего долю энергии пластической деформации в полной энергии деформации, так что после половины одного периода действия гармонической вынуждающей силы грунт приобретает остаточную деформацию величиной

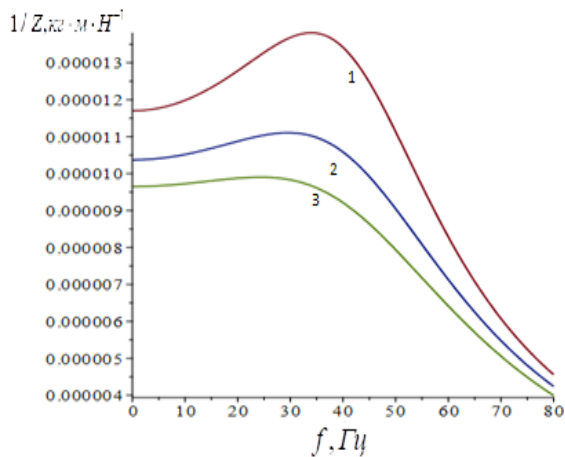
$$\Delta z_{res} = \alpha \Delta z_{\max} = \frac{\alpha F_0}{m\sqrt{((\omega_0(y, \Delta z))^2 - \omega^2)^2 + k(y, \Delta z)^2 \omega^2}},$$

близкие этому значения остаточной деформации слой будет приобретать на каждом последующем цикле в предположении того, что его жесткость и вязкость слабо зависят от деформации. Рис. 15.1 и 15.2 иллюстрирует зависимости полного сопротивления грунта периодическому деформированию от частоты для различных этапов уплотнения. Предположение о едином характере движения всей активной области соответствует реализации одномассовой модели, отвечающей реализации во всей активной области единого типа деформирования, что соответствует эффективной проработке слоя.

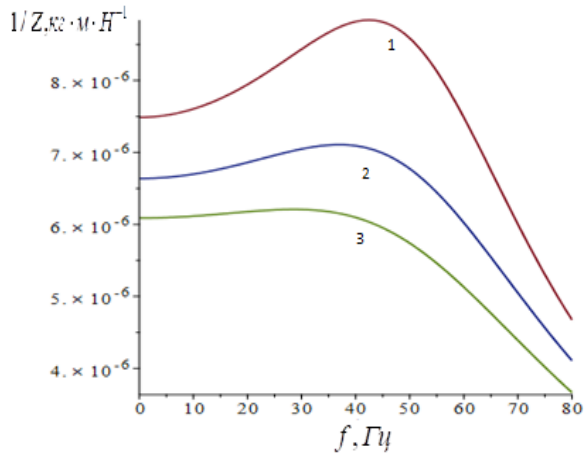




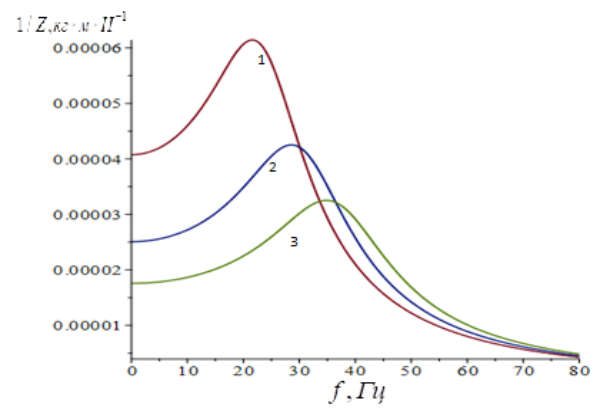
а) 1- начальный; 2-промежуточный; 3-конечный



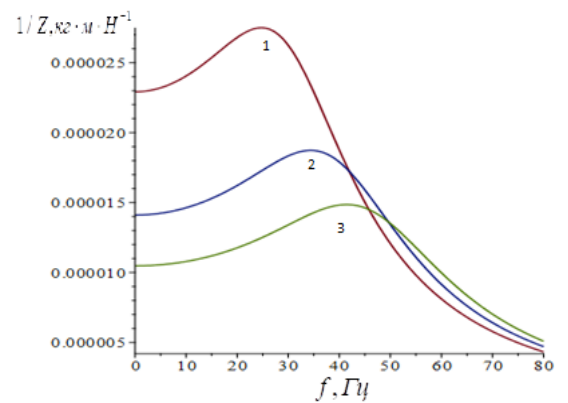
б) 1- начальный; 2-промежуточный; 3-конечный



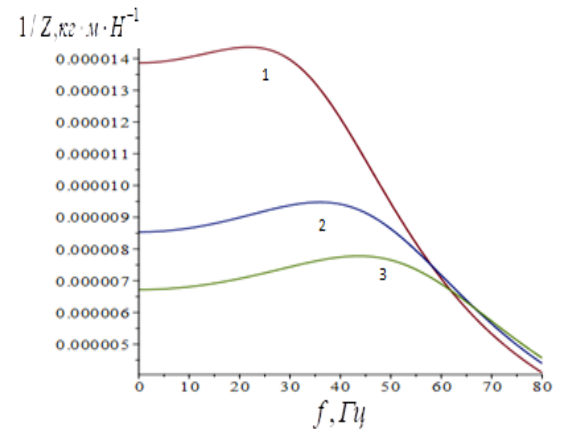
в) 1- начальный; 2-промежуточный; 3-конечный



а) 1- начальный; 2-промежуточный; 3-конечный



б) 1- начальный; 2-промежуточный; 3-конечный



в) 1- начальный; 2-промежуточный; 3-конечный

Рисунок – 15.1. Амплитудно-частотная характеристика обратного импеданса активной области слоя суглинистого грунта при уплотнении а) тяжелым, б) средним, в) легким катком

Рисунок – 15.2 Амплитудно-частотная характеристика обратного импеданса активной области слоя супесчаного грунта при уплотнении а) тяжелым, б) средним, в) легким катком

На основании предложенного критерия разработана методика обоснования режимных параметров вибрационных катков.

Построена оптимизационная схема выбора энергоэффективных режимов работы вибрационных катков, учитывающая производительность, энергоемкость и энергоэффективность.

$$\left( \begin{array}{l} k_y \rightarrow 1 \\ \frac{\Delta W_{\text{пласт}}}{\Delta W_{\text{полн}}} \rightarrow \max \\ k_y \\ \frac{k_y}{\Delta W_{\text{пласт}}} \rightarrow \max \end{array} \right)$$

где  $k_y$  - коэффициент уплотнения;

$\frac{\Delta W_{\text{пласт}}}{\Delta W_{\text{полн}}}$  - величина доли энергии уплотнителя, затраченная на пластическое деформирование материала слоя за один проход;

$\frac{k_y}{\Delta W_{\text{пласт}}}$  - приращение коэффициента уплотнения на единицу затраченной на пластическое деформирование энергии. Величина  $\Delta W_{\text{пласт}}$  определяется из результатов расчетов.

Установлены новые зависимости влияния скорости поступательного движения катка и частоты вибрации, обеспечивающие энергоэффективные режимы уплотнения, учитывающие параметры грунтового слоя для толщин слоя 20-60 см и частотах воздействия 15-75 Гц. Определены данные для реализации методики выбора скоростного режима катка, учитывающей текущее состояние грунтовой среды.

Предложены новые величины для оценки работы катков – приведенная (к приращению коэффициенту уплотнения) производительность (11) и приведенная (к приращению коэффициенту уплотнения) обратная энергоемкость (12). Они позволяют оценить работу и энергозатраты катков при невозможности уплотнения грунта от свежесыпанного и предварительно уплотненного состояния до номинальных значений плотности одним катком.

$$P_{\text{прив}} = 3600 \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i} \right)^{-1} h_{\text{нач}} (B-b) \frac{k_{\text{укоп}} - k_{\text{унач}}}{k_{\text{умакс}} - k_{\text{унач}}}, \frac{\text{м}^3}{\text{час}} \quad (11)$$

$$P_{\text{прив}}^{\text{мощн}} = \frac{3600 h_{\text{нач}} (B-b) \frac{k_{\text{укоп}} - k_{\text{унач}}}{k_{\text{умакс}} - k_{\text{унач}}}, \frac{\text{м}^3}{\text{кДж}}}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_i} \right) \left( \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{n} \right)} \quad (12)$$

$h_{\text{нач}}$  - исходная толщина слоя,  $B$  - ширина захватки (вальца), м,  $b$  - величина перекрытия, м,  $n$  - число проходов,  $v_i$  - скорость катка на  $i$ -м проходе, м/с,

$W_i$  - мощность, затрачиваемая катком при работе, на  $i$ -м проходе, кВт,

$k_{\text{укоп}}$  - конечное значение коэффициента уплотнения после работы катка,

$k_{\text{умакс}}$  - значение коэффициента уплотнения, до которого возможно уплотнение заданным катком.

Впервые использование этих критериев при оценке эффективности режима работы катка и сравнения режимов работы катков на всех этапах уплотнения и позволяет определить затраты времени, средств и горючего на операцию по уплотнению грунтового слоя земляного полотна.



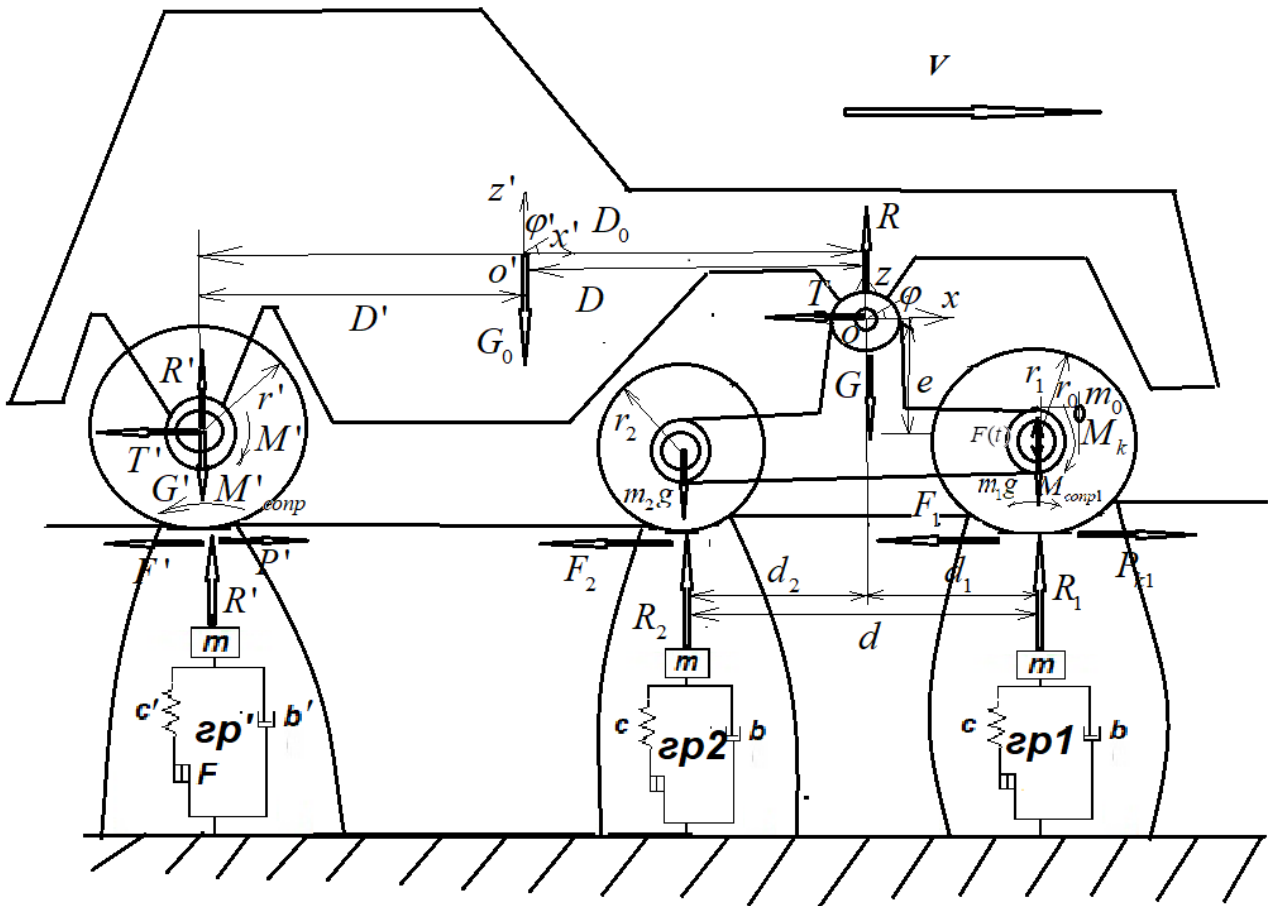


Рисунок 17 – Схема самоходного вибрационного катка с компенсирующим валцом

$M_k$  - момент на оси ведущего вальца перспективного РО;

$F(t) = m_0 \omega^2 r_0 \sin(\omega t)$  - периодическая сила, действующая на основной (ведущий валец) перспективного РО вдоль оси z;

$M_{comp1} = f(G_1 + m_1 g)r_1$  - момент силы сопротивления качению ведущего вальца перспективного РО;

$P_{f1} = f(G_1 + m_1 g + F(t))$  - сила сопротивления качению ведущего вальца перспективного РО;

$M_{comp2} = f(G_2 + m_2 g)r_2$  - момент силы сопротивления качению вспомогательного вальца перспективного РО;

$P_{f2} = fG_2$  - сила сопротивления качению ведущего вальца перспективного РО;

$R_1$  - вертикальная компонента реакции грунта, действующая на ведущий валец перспективного РО;

$R_2$  - вертикальная компонента реакции грунта, действующая на вспомогательный валец перспективного РО;

$P_{k1}$  - касательная сила в точке контакта, создаваемая моментом на оси основного вальца перспективного РО;

$P'$  - касательная сила в точке контакта, создаваемая моментом на оси ведущего вальца;



$G'$  - статическая нагрузка на ведущий (третий) валец;  
 $M'_{comp} = \alpha r' R'_{cp}$  - момент сил сопротивления на ведущем валце;

$$M' = \frac{(T + P')r'}{\mu'} = \frac{(T + \alpha R')r'}{\mu'} - \text{вращательный момент на ведущем валце.}$$

Уравнения движения системы при работе катка:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{PO} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = (m_1 g - R_1(m_{cp1}, b_{cp1}, m_{cp1}, \ddot{z}_{cp1}, \dot{z}_{cp1}, z_{cp1}) + F(t))d_1 + \\ + (R_2(m_{cp2}, b_{cp2}, m_{cp2}, \ddot{z}_{cp2}, \dot{z}_{cp2}, z_{cp2}) - m_2 g)d_2, \\ M_{PO} \frac{d^2 z}{dt^2} = -G + R_1(m_{cp1}, b_{cp1}, m_{cp1}, \ddot{z}_{cp1}, \dot{z}_{cp1}, z_{cp1}) + \\ + R_2(m_{cp2}, b_{cp2}, m_{cp2}, \ddot{z}_{cp2}, \dot{z}_{cp2}, z_{cp2}) - m_1 g - m_2 g + F(t), \\ M_{рама} \frac{d^2 z'}{dt^2} = -G_0 + R'(m'_{cp}, b'_{cp}, m'_{cp}, \ddot{z}'_{cp}, \dot{z}'_{cp}, z'_{cp}) + R - m' g, \\ J_{рама} \frac{d^2 \varphi'}{dt^2} = -R'(m'_{cp2}, b'_{cp2}, m'_{cp2}, \ddot{z}'_{cp2}, \dot{z}'_{cp2}, z'_{cp2})D' + RD + m' gD'. \end{array} \right.$$

решаются совместно с системой уравнений деформирования активных областей грунтового слоя, позволяя выявить соотношения параметров рабочего органа, приводящие к наиболее эффективному накоплению грунтом пластических деформаций.

Были определены соотношения массогабаритных характеристик и параметров воздействия, обеспечивающие энергоэффективный режим работы катка. Зависимость приращения коэффициента уплотнения за один проход катка с перспективным РО в зависимости от места установки опорно-поворотного узла и отношения амплитуды периодической силы и статической нагрузки на грунт от веса вибровальца и рамы катка.

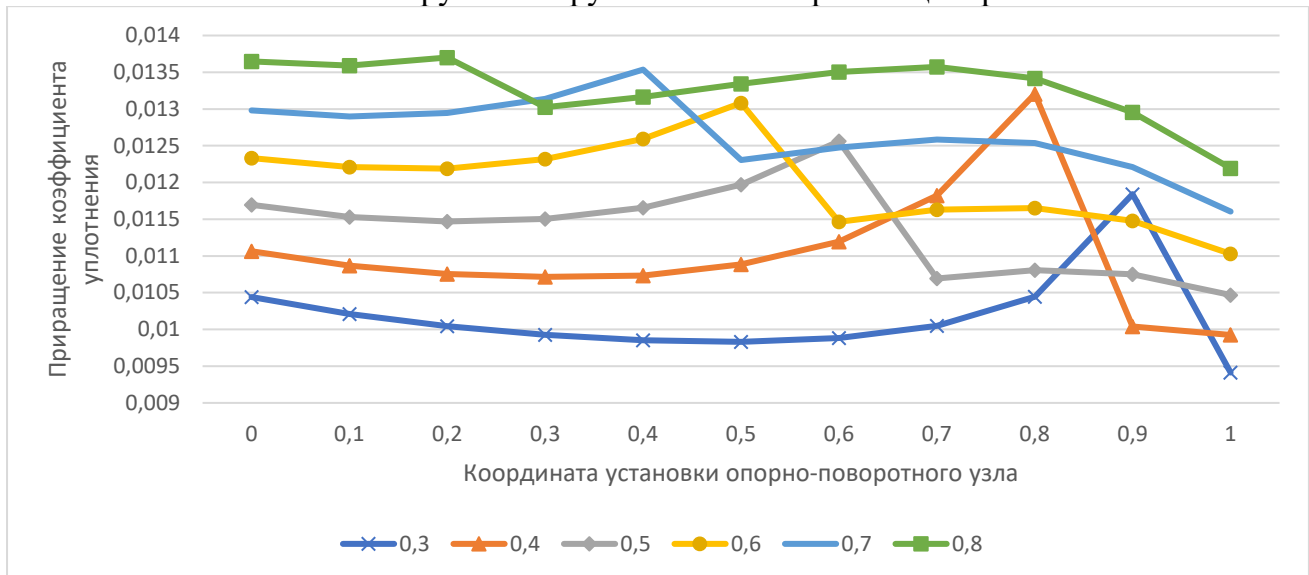


Рисунок 18 – Зависимость приращения коэффициента уплотнения за один проход катка при уплотнении супеси от места установки опорно-поворотного узла  $d_1/d$  при различных соотношениях статической нагрузки и амплитуды периодической силы  $F_0/F_{cm} = 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8$

Вычисления параметров перспективного рабочего органа в линейном приближении при проектировании производятся согласно формул таблицы 3.

Таблица 3 – Расчетная схема перспективного рабочего органа вибрационного катка

| Расчетные формулы для параметров основного вальца (вибрационного)   |                                 | Расчетные формулы для параметров вспомогательного вальца (компенсирующего)   |  |
|---|---------------------------------|--|--|
| $m_1(M_0, m_0, F_0, R_0) = m_0(1 - 0.0759 \frac{M_0}{\tilde{M}_0} - 0.0737 \frac{F_0}{\tilde{F}_0} - 0.0747 \frac{R_0}{\tilde{R}_0})$ |                                 | $m_2(M_0, m_0, F_0, R_0) = m_0(1 - 0.213 \frac{M_0}{\tilde{M}_0} - 0.198 \frac{F_0}{\tilde{F}_0} - 0.186 \frac{R_0}{\tilde{R}_0})$ |  |
| $M_1(M_0, m_0, F_0, R_0) = M_0(1 - 0.0673 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.0765 \frac{F_0}{\tilde{F}_0} - 0.0731 \frac{R_0}{\tilde{R}_0})$ |                                 | $M_2(M_0, m_0, F_0, R_0) = M_0(1 - 0.235 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.175 \frac{F_0}{\tilde{F}_0} - 0.211 \frac{R_0}{\tilde{R}_0})$ |  |
| $F_1(M_0, m_0, F_0, R_0) = F_0(1 - 0.0652 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.0755 \frac{M_0}{\tilde{M}_0} - 0.0757 \frac{R_0}{\tilde{R}_0})$ |                                 | $R_2(M_0, m_0, F_0, R_0) = R_0(1 - 0.196 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.179 \frac{M_0}{\tilde{M}_0} - 0.205 \frac{F_0}{\tilde{F}_0})$ |  |
| $R_1(M_0, m_0, F_0, R_0) = F_0(1 - 0.0765 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.0742 \frac{M_0}{\tilde{M}_0} - 0.0767 \frac{F_0}{\tilde{F}_0})$ |                                 | $d = d_1 + d_2 = R_1 + R_2 + \frac{(R_1 + R_2)}{2} > R_1 + R_2;$   |  |
|   |                                 | $d_2 = (1 - \frac{F_0}{(M_1 + m_1)g})d$  |  |
| Параметры расчетной схемы   |                                 |  |  |
| Для тяжелых катков (18-22 т)  | Для средних катков (12-18 т)    | Для легких катков (6-12 т)   |  |
| $\tilde{m}_0 = 3000 \text{ кг}$   | $\tilde{m}_0 = 2000 \text{ кг}$ | $\tilde{m}_0 = 1200 \text{ кг}$  |  |
| $\tilde{M}_0 = 10000 \text{ кг}$  | $\tilde{M}_0 = 7500 \text{ кг}$ | $\tilde{M}_0 = 5000 \text{ кг}$  |  |
| $\tilde{F}_0 = 100000 \text{ Н}$  | $\tilde{F}_0 = 60000 \text{ Н}$ | $\tilde{F}_0 = 40000 \text{ Н}$  |  |
| $\tilde{R}_0 = 0.8 \text{ м}$   | $\tilde{R}_0 = 0.65 \text{ м}$  | $\tilde{R}_0 = 0.45 \text{ м}$   |  |

Конструкция вальца дорожного катка специального вида (Рис. 19) позволяет адаптировать в широких пределах контактное давление при работе дорожного катка.

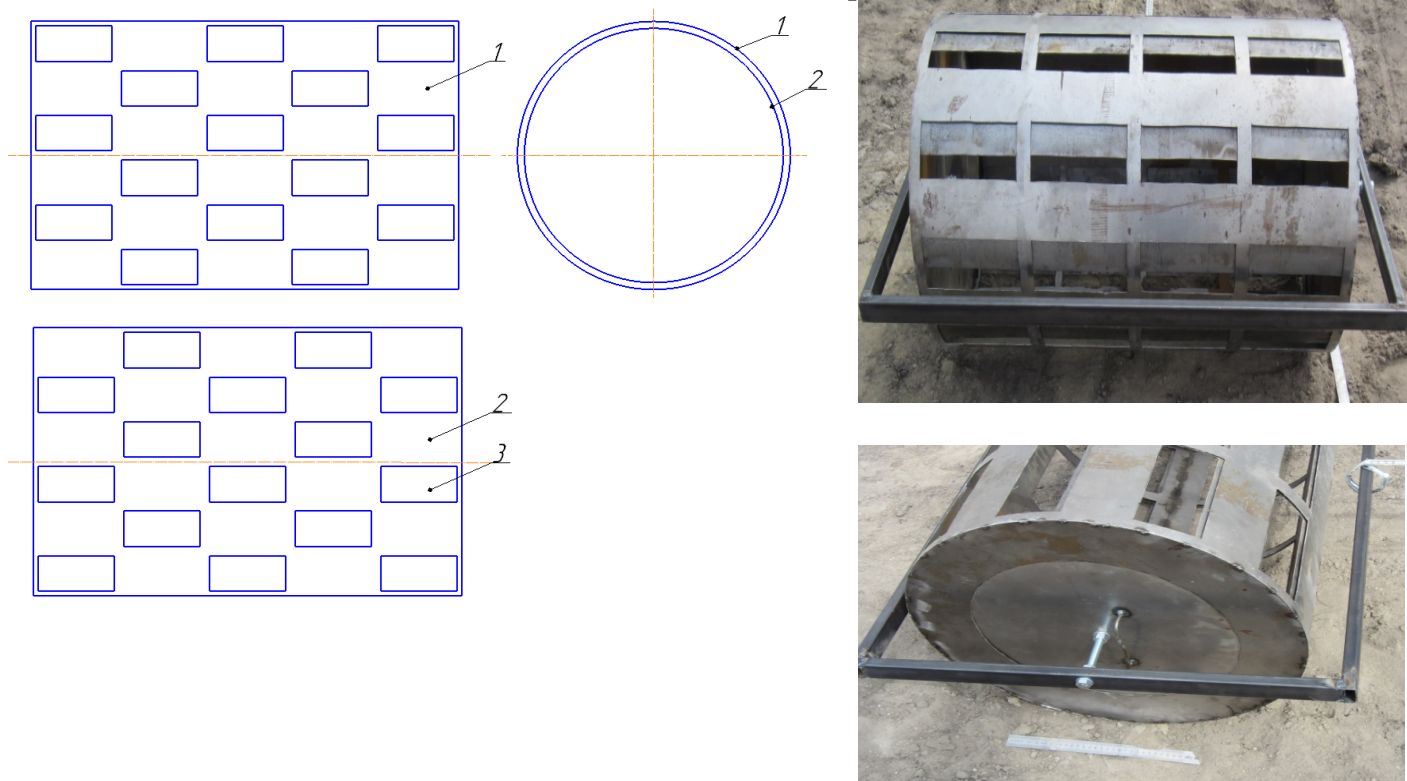


Рисунок 19 – Валец с возможностью широкого адаптирования контактного давления (Патент РФ №162483U1)

Разработана конструкция гидрошинного рабочего органа катков (Рис. 20), повышающая энергоэффективность динамических режимов уплотняющего воздействия за счет повышения естественных адаптационных свойств рабочего органа с изменением характеристик уплотняемого материала. Секционирование внутреннего объема гидрошины позволило снизить диссипацию энергии и повысить жесткость шины на динамических режимах уплотнения.

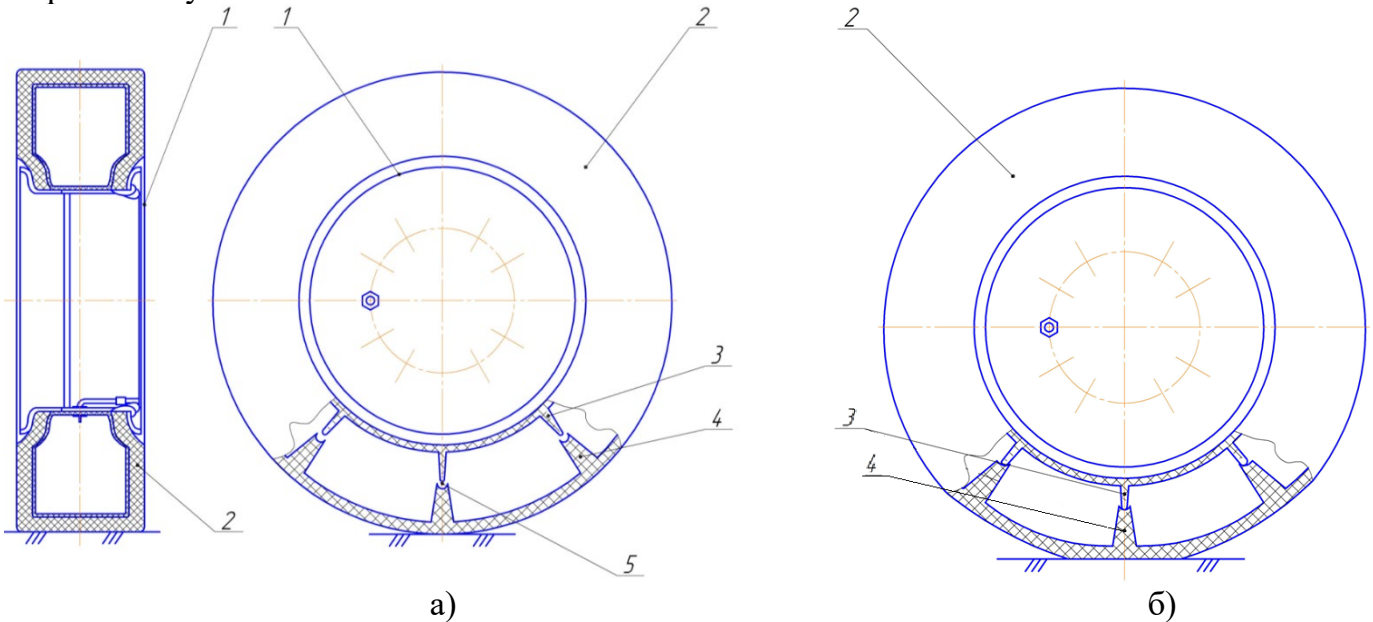


Рисунок 20 – Обечайка гидрошинного вальца вибрационного катка в недеформированном состоянии а), в деформированном состоянии с замкнутыми перемычками (Патент РФ №184799)

Предложена новая конструкция планетарного вибровозбудителя с регулируемыми характеристиками (Рис. 21) и проанализированы перспективы его использования для уплотнения грунтовых сред. Показана возможность регулирования его характеристик в соответствии с изменяющимися свойствами уплотняемой грунтовой среды.

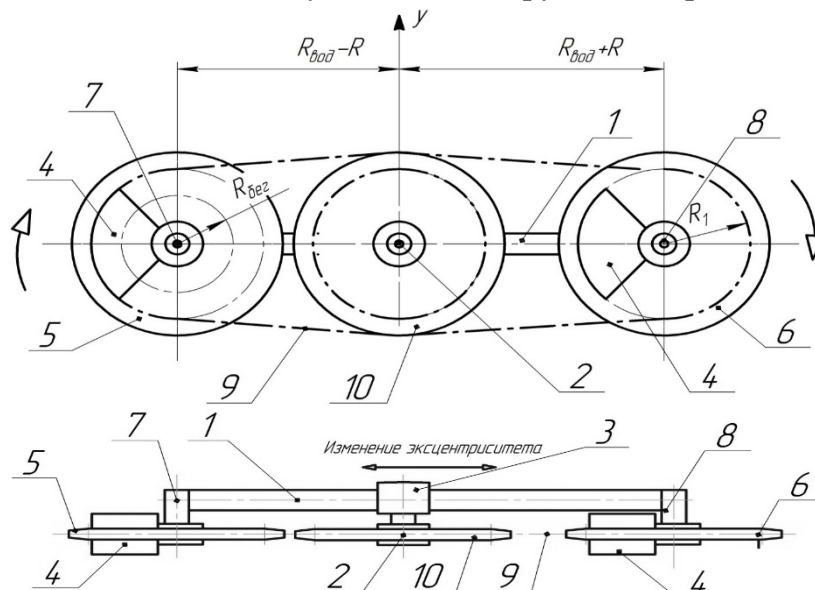


Рисунок 21 – Планетарный вибровозбудитель с регулируемыми характеристиками и цепной передачей (Патент РФ №180102)

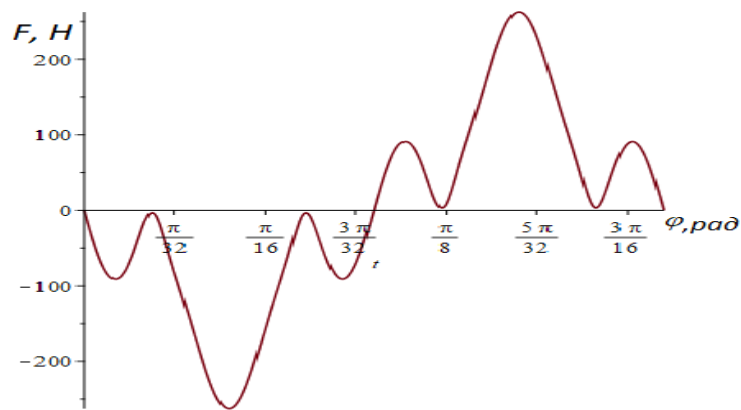


Рисунок 22 – Пример зависимости инерционной силы, генерируемой планетарным вибровозбудителем в вертикальном направлении на одном периоде вращения водила.

Зависимость силы, генерируемой устройством (Рис. 22), от времени имеет более сложный вид, чем у традиционных инерционных дебалансных вибровозбудителей и допускает более широкий диапазон для регулирования.

Предложенные конструкции существенно расширяют перспективы проектирования энергоэффективных уплотняющих машин с регулируемыми характеристиками более широкого спектра, чем существующие, и обеспечения энергоэффективных режимов уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве.

На основании результатов оптимизационного моделирования предложены усовершенствованные технологические рекомендации для вибрационных катков с учетом требования энергоэффективности уплотнения грунтовых сред.

Таблица 4 - Технологические рекомендации для реализации энергоэффективных режимов работы катков

| <b>При уплотнении суглинистых грунтов оптимальной влажности</b> |                          |                           |                                   |                                |
|---|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Масса катка, тонн   | Этап уплотнения          | Скорость катка, $v$ , м/с | Частота приложения силы, $f$ , Гц | Число проходов по одному следу |
| Средние (12-18)   | $0.85 \leq k_y \leq 0.9$ | 1-1.2                     | 45-52(48)                         | 2-3                            |
|   | $0.9 \leq k_y \leq 0.95$ | 0.9-1.1                   | 38-46(42)                         | 2-3                            |
|   | $0.95 \leq k_y \leq 1$   | 0.9-1                     | 33-38 (35)                        | 3-5                            |
| Тяжелые (18-22)   | $0.85 \leq k_y \leq 0.9$ | 1-1.2                     | 38-45 (43)                        | 2-3                            |
|   | $0.9 \leq k_y \leq 0.95$ | 0.9-1.1                   | 32-39 (36)                        | 2-4                            |
|   | $0.95 \leq k_y \leq 1$   | 0.7-1                     | 27-33 (30)                        | 3-4                            |
| <b>При уплотнении супесчаных грунтов оптимальной влажности</b>  |                          |                           |                                   |                                |
| Масса катка, тонн   | Этап уплотнения          | Скорость катка, $v$ м/с   | Частота приложения силы, $f$ Гц   | Число проходов по одному следу |
| Средние (12-18)   | $0.85 \leq k_y \leq 0.9$ | 0.5-0.7                   | 18-25(22)                         | 1-3                            |
|   | $0.9 \leq k_y \leq 0.95$ | 0.9-1.3                   | 24-36(30)                         | 2-3                            |
|   | $0.95 \leq k_y \leq 1$   | 1.3-1.7                   | 36-44(40)                         | 2-3                            |
| Тяжелые (18-22)   | $0.85 \leq k_y \leq 0.9$ | 0.5-0.7                   | 15-20 (17)                        | 1-2                            |
|   | $0.9 \leq k_y \leq 0.95$ | 0.7-1.1                   | 20-25 (23)                        | 2-3                            |
|   | $0.95 \leq k_y \leq 1$   | 1.1-1.5                   | 30-35 (32)                        | 2-3                            |

В их основе лежала методика выбора энергоэффективных режимов уплотнения реализованная комбинацией частоты воздействия и скорости поступательного движения катка.

1) Оптимальные скорости поступательного движения катка  $v_{opt}$  и частоты воздействия периодической силы  $f_{opt}$  вычисляются по их линеаризованным зависимостям и от текущего состояния среды, параметризуемого коэффициентом уплотнения  $k$  и статической нагрузки от массы катка  $M$ , приходящейся на вибрационный валец.

$$v_{opt} = v_0 + c_{M,v}(M - M_0) + c_{k,v}(k - k_0), \quad (13)$$

$$f_{opt} = f_0 + c_{M,f}(M - M_0) + c_{k,f}(k - k_0). \quad (14)$$

Для легких катков выбирается  $M_0=5$  т, для средних  $M_0=7.5$  т и для тяжелых  $M_0=10$  т. Величина  $k_0=0.92$ .

2) Коэффициенты для расчетов параметров энергоэффективного режима уплотнения супесчаных и суглинистых грунтов оптимальной влажности гладковальцовыми вибрационными катками приведены в таблице 4.

Таблица 5 – Коэффициенты для вычисления оптимальных скоростно-частотных режимов работы вибрационных катков при уплотнении

| Тип грунта | Статическая нагрузка на вибровалец, т | $v_0$ , м/с | $c_{M,v}$ , м/(с·т) | $c_{k,v}$ , м/с | $f_0$ , Гц | $c_{M,f}$ , Гц/т | $c_{k,f}$ , Гц |
|------------|---------------------------------------|-------------|---------------------|-----------------|------------|------------------|----------------|
| Супесь     | 3-7                                   | 1.2         | 0.162               | 7.02            | 30         | 5.35             | 26.16          |
|            | 6-10                                  | 1.2         | 0.108               | 6.04            | 28         | 3.8              | 31.8           |
|            | 9-12                                  | 1.0         | 0.097               | 9.23            | 25         | 3.59             | 41.93          |
| Суглинок   | 3-7                                   | 1.05        | 0.215               | -4.465          | 48         | -5.5             | -100           |
|            | 6-10                                  | 1.0         | 0.113               | -3.539          | 40         | -1               | -120           |
|            | 9-12                                  | 0.95        | 0.11                | -3.915          | 36         | -2.5             | -70            |

3) Корректировка частотного параметра работы катка проводится исходя из толщины слоя уплотняемого слоя. При приближении толщины слоя к максимальному значению диапазона для заданного катка и типа грунта, частоту воздействия следует уменьшать, приближая к пределу, рекомендованному для энергоэффективного режима;

4) Корректировка частотного параметра работы катка проводится исходя из толщины слоя уплотняемого слоя. При приближении толщины слоя к максимальному значению диапазона для заданного катка и типа грунта, скорость движения катка следует уменьшать, приближая к пределу, рекомендованному для энергоэффективного режима.

Зависимости комплекса параметров работы катков для супесчаных и суглинистых грунтов, полученные в работе, иллюстрируют рисунки 23,24. Они определяют комбинации частоты воздействия и скорости поступательного движения катка, реализующие энергоэффективные режимы его работы.

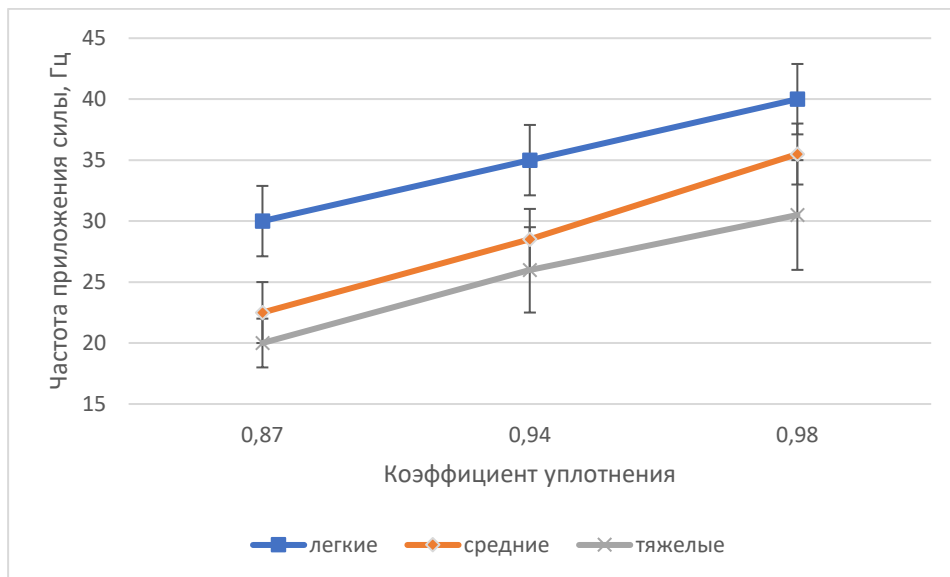


Рисунок 23– Интервалы значений частоты силового воздействия, обеспечивающей энергоэффективный режим работы вибрационного катка на супесчаном грунте (начальный-  $k_y = 0,87 - 0,92$ , промежуточный  $k_y = 0,92 - 0,98$ , конечный -  $k_y = 0,98 - 1,0$ )

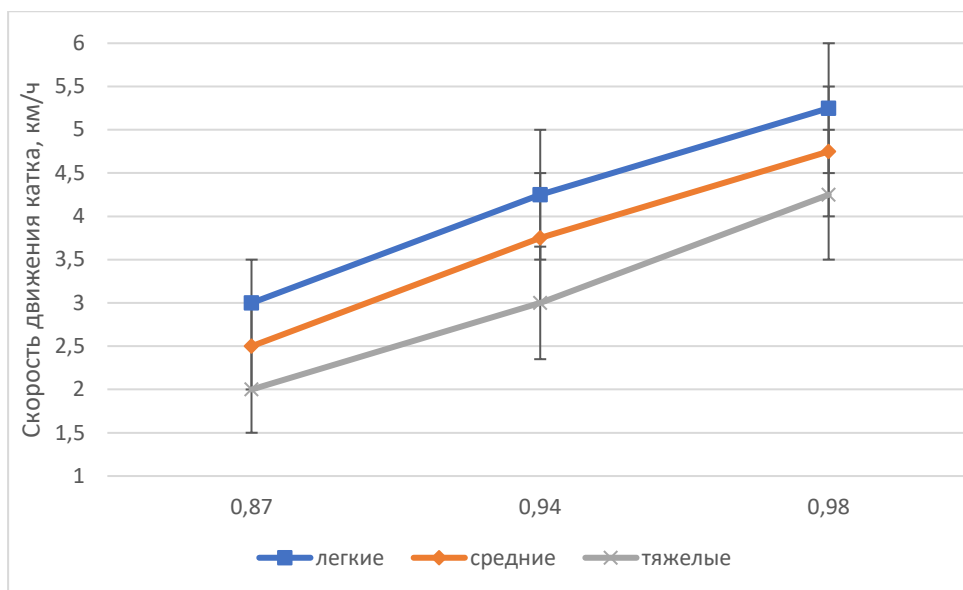


Рисунок 24 – Интервалы скорости поступательного движения, обеспечивающей энергоэффективный режим работы вибрационного катка на супесчаном грунте (начальный-  $k_y = 0,87 - 0,92$  промежуточный  $k_y = 0,92 - 0,98$ , конечный -  $k_y = 0,98 - 1,0$ )

Для уплотнения суглинистых грунтов зависимости комплекса режимных параметров, обеспечивающих энергоэффективный режим уплотнения наглядно приведены на Рис. 25, 26.

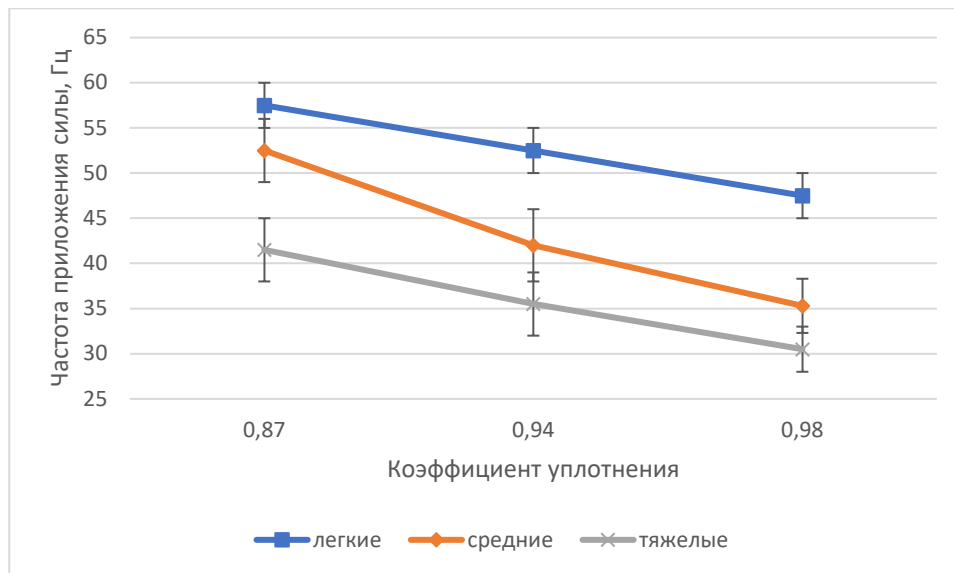


Рисунок 25 - Интервалы значений частоты силового воздействия, обеспечивающей энергоэффективный режим работы вибрационного катка на суглинистом грунте (начальный-  $k_y = 0,87 - 0,92$ , промежуточный  $k_y = 0,92 - 0,98$ , конечный -  $k_y = 0,98 - 1,0$ )

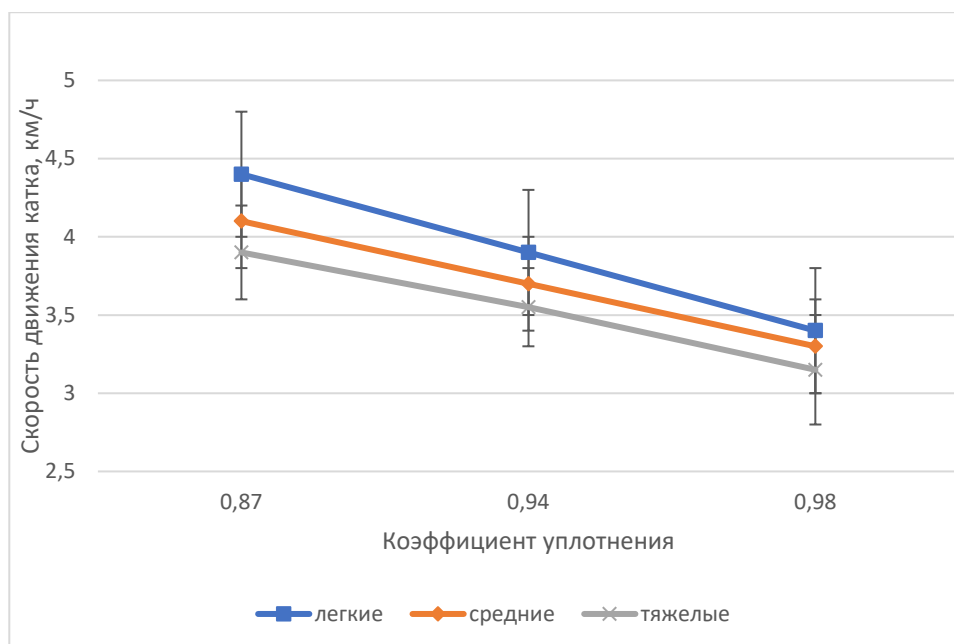


Рисунок 26 - Интервалы скорости поступательного движения, обеспечивающей энергоэффективный режим работы вибрационного катка на суглинистом грунте (начальный-  $k_y = 0,87 - 0,92$ , промежуточный  $k_y = 0,92 - 0,98$ , конечный -  $k_y = 0,98 - 1,0$ )

В результате сравнения производительности катка, реализующего энергоэффективные режимы уплотнения, построенного на базе вибрационного катка RV-17 ДТ («Раскат», г. Рыбинск) выявлено повышение производительности 9-16% по сравнению с использованием базового катка. При этом минимальный экономический эффект с учетом затрат на модификацию РО катка составил около 82000 руб/год. При сравнении с зарубежным аналогом фирмы Hamn, предложенная конструкция катка продемонстрировала сравнимый рост производительности при возрастании экономического эффекта от использования до 600000 руб./год.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **Результаты исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:**

1. Совокупность результатов теоретических и экспериментальных исследований открывает новое направление в области интенсификации уплотнения грунтов и развития конструкций вибрационных катков и методик управления параметрами их работы. Решена крупная научная проблема повышения эффективности использования вибрационных катков в дорожном строительстве, имеющая важное хозяйственное значение в области развития транспортной инфраструктуры России и соответствующая реализации правительственной программы «Транспортная стратегия РФ на период до 2035 года», а также Национального проекта «Безопасные и качественные дороги».

Анализ вопроса совершенствования теории дорожных катков для уплотнения грунтовых сред, проведенный в работе, позволил оценить перспективы развития уплотняющей техники, используемой при строительстве автомобильных дорог. Рассмотрение существующих работ в области развития уплотняющих технологий и устройств показало возможность повышения энергоэффективности и производительности дорожных катков. Основа этого – комплексная оценка эффективности процесса уплотнения, рассматриваемого с точки зрения энергетического подхода.

2. Разработано семейство математических моделей взаимодействия рабочего органа уплотняющей машины с уплотняемой грунтовой средой. Модели учитывают параметры и характеристики дорожной машины, влияющие на изменение свойств упруговязкопластичной среды в ходе уплотнения и распределение механических напряжений в ее слое. Была проведена оценка влияния параметров режимов воздействия и характеристик рабочих органов уплотняющих дорожных машин на интенсивность накопления остаточных деформаций и эффективность передачи энергии уплотнителя слою среды, а также определен характер распределения энергии на преодоление сил сопротивления среды деформированию.

3. Решена задача о взаимодействии рабочего органа катка с уплотняемым слоем грунтовой среды в рамках предложенной модели и единого описания движения рабочего органа и массивной активной области слоя для различных параметров рабочих органов и режимов воздействия. На ее основе стало возможным исследовать интенсивность накопления остаточных деформаций слоем среды, эффективность передачи энергии уплотнителя слою и определить параметры рабочих органов и режимов воздействия дорожных катков на обрабатываемую среду, обеспечивающие энергоэффективное уплотнение.

Предложены оригинальные эксплуатационные критерии оценки энергоэффективности применения катков для уплотнения грунтовых сред – приведенная производительность и приведенная обратная энергоемкость. Выявлен динамический критерий энергоэффективного уплотнения вибрационными катками – полное механическое сопротивление прорабатываемой катком области грунта.

4. Сформулирован комплекс теоретических положений к разработке дорожных катков, обеспечивающих энергоэффективность за счет адаптирования параметров воздействия к изменяющимся характеристикам энергопоглощения среды с одновременной компенсацией мощности, рассеивающейся в узлах генерирования периодического воздействия и обоснованы способы пути их реализации в случае гладковальцовых вибрационных катков.

5. Выводы теоретических исследований были подтверждены результатами опытов, проведенных в лабораторных условиях и в условиях натуральных экспериментов с использованием реальных катков. Адекватность разработанной модели была доказана совпадением



теоретических результатов с экспериментальными с точностью 10-12%, находясь в рамках погрешностей измерений.

6. Определены зависимости, характеризующие эффективность процесса уплотнения с учетом особенности передачи слою энергии уплотнителя грунтовому слою для его неупругого деформирования от комплекса режимных параметров вибрационных катков различных массогабаритных характеристик на всех этапах уплотнения. На их основе выявлены функциональные соотношения для комбинаций режимных параметров вибрационных катков, в том числе и с перспективными рабочими органами, обеспечивающими повышенную энергоэффективность их работы по уплотнению грунтов.

7. Разработана комплексная методика выбора энергоэффективных режимных параметров гладковальцовых вибрационных дорожных катков.

8. Защищены патентами новые энергоэффективные конструкции катков и их рабочих органов, использование которых позволяет интенсифицировать процесс уплотнения грунтовых сред. Разработана методика использования вибрационного катка с рабочим органом, повышающим энергоэффективность уплотнения грунтовых сред на 15-25% с сопутствующим повышением производительности на 8-12%. Расширен класс устройств, реализующих режимы динамического воздействия, разработаны технические решения по их практической реализации в конструкциях энергоэффективных вибрационных катков.

Исследование, проведенное в рамках диссертационной работы, открывает широкие перспективы для дальнейших разработок в области совершенствования конструкций уплотняющих машин и технологий уплотнения грунтов. Среди них можно выделить:

1. Расширение теоретического подхода, использованного в работе, на задачи проектирования деформируемых рабочих органов, допускающих широкие возможности адаптивирования;
2. Разработку вибровозбудителей с повышенными характеристиками направленности силы воздействия для снижения потерь при обеспечении динамических режимов уплотнения;
3. Уточнение характеристик подвески, влияющих на энергоэффективность уплотнения и соответствующую корректировку режимных параметров работы катка.

#### **Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

**а) статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по специальности 05.05.04 – «Дорожные, строительные и подъёмно-транспортные машины»:**

1. Савельев, С. В. Исследования напряжённо-деформируемого состояния упруго-вязкой среды при вибрационном нагружении / С. В. Савельев, В. В. Михеев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2012. – № 3(25). – С. 83-87.

2. Савельев, С. В. Исследования деформирования упруго-вязкой среды при ударном нагружении / С. В. Савельев, В. В. Михеев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2012. – № 4(26). – С. 100-103.

3. Михеев, В.В. Исследование влияния деформации адаптивного рабочего оборудования дорожного катка на процесс деформирования уплотняемого грунта. /В.В. Михеев, С.В. Савельев// Строительные и дорожные машины. №7, 2013. -С. 45-51

4. Михеев, В.В. Механизация уплотнения грунтовых насыпей вибрационными катками с пневмошинными рабочими органами / С. В. Савельев, В. В. Михеев // Механизация строительства. – 2015. – № 3(849). – С. 4-7.
5. Пермяков, В. Б. Использование деформативных свойств пневмошин в вибрационных машинах / В. Б. Пермяков, С. В. Савельев, В. В. Михеев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 11. – С. 56-58.
6. Совершенствование конструкции строительной машины, снижающей сегрегацию асфальтобетонной смеси / С. В. Савельев, И. К. Потеряев, А. Б. Летопольский, В. В. Михеев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 2(48). – С. 31-37.
7. Савельев, С. В. Математическая модель процесса динамического деформирования уплотняемой упруго вязкой пластичной среды / С. В. Савельев, В. В. Михеев, А. С. Белодед // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 3(49). – С. 99-105.
8. Михеев, В. В. Моделирование характеристик деформируемых грунтов в процессе их уплотнения цилиндрическими рабочими органами катков / В. В. Михеев, С. В. Савельев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 4(50). – С. 29-36.
9. Михеев, В. В. Математическая модель уплотнения упруговязкопластичной грунтовой среды при взаимодействии с рабочим органом дорожной машины в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров / В. В. Михеев, С. В. Савельев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2017. – № 2(54). – С. 28-36.
10. Михеев, В. В. К вопросу о повышении энергоэффективности вибровозбудителя для дорожных вибрационных катков / М. К. Шушубаева, В. В. Михеев, С. В. Савельев, М. К. Шушубаева, // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2018. – Т. 15. – № 1(59). – С. 46-54.

**б) статьи в изданиях, входящих в международные базы научного цитирования «Scopus» и «Web of Science»:**

11. Permyakov, V. B. Using the deformational properties of tires in vibrational systems / V. B. Permyakov, S. V. Savel'ev, V. V. Mikheev // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35. – No 2. – P. 102-104. – DOI 10.3103/S1068798X15020203.
12. Mikheyev, V. V. Simulation of the vibratory soil compaction under the action of periodically changing elliptic external force / V. V. Mikheyev, S. V. Saveliev // Advances in Civil Engineering and Building Materials IV - Selected and Peer Reviewed Papers from the 2014 4th International Conference on Civil Engineering and Building Materials, CEBM 2014 : 4th, Hong Kong, 15–16 ноября 2014 года. – Hong Kong, 2015. – P. 155-162. – DOI 10.1201/b18415-36.
13. Mikheev, V. V. Modelling of deformation process for the layer of elastoviscoplastic media under surface action of periodic force of arbitrary type / V. V. Mikheev, S. V. Saveliev // Journal of Physics: Conference Series, Omsk, 14–16 ноября 2017 года. – Omsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012079. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012079.
14. Mikheyev, V. V. New type of vibration generator with vibratory force oriented in preferred direction / V. V. Mikheyev // Journal of Vibrational Engineering and Technologies. – 2018. – Vol. 6. – No 2. – P. 149-154. – DOI 10.1007/s42417-018-0025-4.
15. Mikheyev, V. V. Planetary adjustable vibratory exciter with chain gear / V. V. Mikheev, S. V. Saveliev // Journal of Physics: Conference Series : XII International Scientific and

Technical Conference "Applied Mechanics and Systems Dynamics", Omsk, 03–05 ноября 2018 года. – Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012097. – DOI 10.1088/1742-6596/1210/1/012097

16. Mikheyev, V. V. Complex approach to the optimal energy efficient work pattern for vibratory roller / V. V. Mikheev, S. V. Saveliev, V.B.Permayakov // Journal of Physics: Conference Series : XII International Scientific and Technical Conference "Applied Mechanics and Systems Dynamics", Omsk, 03–05 ноября 2018 года. – Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 112020. – DOI 10.1088/1742-6596/1260/11/112020

17. Mikheyev, V. V. Natural adaptation of deformable work tools during vibratory soil compaction and enhancement of there performance / V. V. Mikheyev, S. V. Saveliev, M. K. Shushubaeva // Journal of Physics: Conference Series : Mechanical Science and Technology Update, Omsk, 23–24 апреля 2019 года. – Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 062015. – DOI 10.1088/1742-6596/1260/6/062015.

18. Mikheyev, V. V. Generator of periodic inertia force concentrated in one direction / V. V. Mikheyev // Journal of Physics: Conference Series : XIII International Scientific and Technical Conference "Applied Mechanics and Systems Dynamics", Omsk, 05–07 ноября 2019 года. – Omsk: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012106. – DOI 10.1088/1742-6596/1441/1/012106.

#### **в) материалы конференций:**

19. Михеев, В. В. Исследования процесса уплотнения деформируемой грунтовой среды рабочим органом катка с управляемой жесткостью / С. В. Савельев, В. В. Михеев // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО "СибАДИ"), Омск, 02–03 декабря 2015 года. – Омск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)", 2015. – С. 705-714.

20. Михеев, В. В. О критерии эффективности процесса виброуплотнения грунтов катками с адаптивными рабочими органами / В. В. Михеев, С. В. Савельев // Север России: стратегии и перспективы развития : материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Сургут, 27 мая 2016 года. – Сургут: Сургутский государственный университет, 2016. – С. 98-105.

21. Михеев, В. В. Эффективное использование вибрационных пневмошинных катков при строительстве грунтовых насыпей с помощью применения рабочих органов специального вида / В. В. Михеев, С. В. Савельев // Север России: стратегии и перспективы развития : материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Сургут, 27 мая 2016 года. – Сургут: Сургутский государственный университет, 2016.

22. Михеев, В. В. Способ получения направленных механических колебаний / В. В. Михеев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – № 1. – С. 64-69.

23. Михеев, В. В. Моделирование процесса деформирования упруговязкопластичной среды динамической периодической силой произвольного характера / В. В. Михеев, С. В. Савельев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 136-143. – DOI 10.25206/2310-9793-2017-5-4-136-143.

24. Михеев, В.В. Определение горизонтальной составляющей силы сопротивления перемещению рабочего органа дорожного катка, как фактора, влияющего на энергоэффективность процесса уплотнения / С. В. Савельев, В. В. Михеев, Д. В. Вяденко // Интерстроймех–2018 : Сборник докладов XXI Международной научно-технической

конференции, Москва, 08–12 октября 2018 года / Под редакцией С.Я. Галицкова. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2018. – С. 173-178.

25. Михеев, В. В. Планетарный вибровозбудитель с регулируемыми характеристиками / В. В. Михеев, С. В. Савельев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6. – № 1. – С. 98-104. – DOI 10.25206/2310-9793-2018-6-1-98-104.

26. Михеев, В. В. Проблемы естественного адаптирования деформируемых рабочих органов вибрационных катков и пути их решения / В. В. Михеев, С. В. Савельев, М. К. Шушубаева // Проблемы машиноведения : Материалы III Международной научно-технической конференции. В 2-х частях, Омск, 23–24 апреля 2019 года / Научный редактор П.Д. Балакин. – Омск: Омский государственный технический университет, 2019. – С. 83-88.

27. Михеев, В. В. Комплексный подход к выбору оптимального энергоэффективного режима работы вибрационных катков / В. В. Михеев, С. В. Савельев, В. Б. Пермяков // Проблемы машиноведения : материалы III Международной научно-технической конференции, Омск, 23–24 апреля 2019 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2019. – С. 158-165.

28. Михеев, В. В. Генератор направленной периодической силы инерции / В. В. Михеев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – Т. 7. – № 1. – С. 123-128. – DOI 10.25206/2310-9793-7-1-123-128.

29. Михеев, В. В. К вопросу о развитии теории энергоэффективных катков для дорожного строительства / В. В. Михеев, В. Б. Пермяков, С. В. Савельев // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S(13). – С. 36.

30. Михеев, В. В. Об энергоэффективных конструкциях дорожных катков и технологиях уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве / В. В. Михеев // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, 03–04 декабря 2020 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. – С. 30-37.

#### **г) патенты на изобретения и полезные модели РФ:**

31. Патент № 2522364 С1 Российская Федерация, МПК E01C 19/27. Валец дорожного катка: № 2013107580/03 : заявл. 20.02.2013: опубл. 10.07.2014 / В. В. Михеев, С. В. Савельев, А. И. Демиденко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)".

32. Патент № 2572478 С1 Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Самоходный вибрационный каток: № 2014130611/03: заявл. 22.07.2014: опубл. 10.01.2016 / В. В. Михеев, С. В. Савельев, В. Б. Пермяков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет".

33. Патент на полезную модель № 160645 U1 Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Осцилляторно-вибрационный валец дорожного катка : № 2015141193/03 : заявл. 28.09.2015: опубл. 27.03.2016 / В. В. Дубков, В. С. Серебренников, С. В. Савельев, В. В. Михеев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)".

34. Патент на полезную модель № 162483 U1 Российская Федерация, МПК E01C 19/26. Дорожный каток: № 2015157015/03 : заявл. 29.12.2015: опубл. 10.06.2016 / В. В. Михеев, С. В. Савельев, И. К. Потеряев, А. С. Белодед ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет".

35. Патент на полезную модель № 166447 U1 Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Кулачковый валец вибрационного катка : № 2016125080/03 : заявл. 22.06.2016 : опубл. 27.11.2016 / В. В. Дубков, В. С. Серебренников, С. В. Савельев, В. В. Михеев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)".

36. Патент № 2631011 C1 Российская Федерация, МПК B06B 1/16. Устройство для получения направленной силы инерции: № 2016128385: заявл. 12.07.2016: опубл. 15.09.2017 / В. В. Михеев, С. В. Савельев, А. С. Белодед ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет".

37. Патент на полезную модель № 184799 U1 Российская Федерация, МПК E01C 19/27. Гидрошина вибрационного катка: № 2018120986: заявл. 06.06.2018: опубл. 09.11.2018 / В. В. Михеев, С. В. Савельев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет", Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет"(СибАДИ).

38. Патент на полезную модель № 180102 U1 Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Планетарный вибровозбудитель с регулируемыми характеристиками и цепной передачей: № 2017130066: заявл. 24.08.2017: опубл. 04.06.2018 / С. В. Савельев, В. В. Михеев, М. К. Шушубаева ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)".

#### **д) монографии**

39. Инновационная уплотняющая техника и рекомендации по её использованию для ресурсосберегающих технологий дорожного строительства / С. В. Савельев, В. Б. Пермяков, В. В. Михеев, И. К. Потеряев. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. – 193 с. – ISBN 978-5-00113-124-3.

#### **е) публикации в иных изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ**

40. Инновационные решения для повышения эффективности дорожно-строительной уплотняющей техники / С. В. Савельев, В. Б. Пермяков, В. В. Михеев, И. К. Потеряев // Мир транспорта и технологических машин. – 2017. – № 2(57). – С. 51-59.

Подписано к печати 20.06.2022  
Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная. Оперативный способ печати.  
Усл. п. л.2,4  
Тираж 100 экз. Заказ № 168

---

Отпечатано в типографии ООО «АН2»  
644080, г. Омск, ул. 4 Поселковая, 26/2