

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет  
(СибАДИ)»

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

Диссертация на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук, доцент  
Савельев Сергей Валерьевич

Омск 2022

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНЫХ МАШИН ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ СРЕД.....	16
1.1. Общие характеристики и классификация дорожных машин для уплотнения грунтов.....	16
1.2 Особенности статических режимов уплотнения слоев грунтовых сред дорожными катками.....	20
1.3 Особенности динамических режимов уплотнения слоев грунтовых сред дорожными катками	28
1.4. Энергоэффективность дорожных катков при уплотнения грунтовых слоев земляного полотна – совершенствование технологических процессов в дорожном строительстве.....	36
1.5. Обзор методик повышения энергоэффективности работы катков при уплотнении грунтовых сред.....	46
1.6 Выводы по главе 1.....	54
2. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ГРУНТОВЫХ СРЕД ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РАБОЧИМ ОРГАНОМ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ .....	59
2.1 Физико-механические характеристики грунтовых сред, влияющие на интенсивность работы дорожных катков.....	60
2.1.1 Особенности протекания деформационных процессов в грунтовых средах при уплотнении катками.....	60
2.1.2 Анализ влияния структурных характеристик грунтовой среды на интенсивность работы дорожных катков для ее уплотнения.....	66
2.1.3 Особенности состава грунтовых сред и их влияние на интенсивность работы дорожных катков при их уплотнении.....	74
2.1.4 Анализ работы дорожных катков с учетом изменения деформативных и прочностных свойств при уплотнении грунтовых сред.....	79

2.2 Существующие подходы к описанию развития напряженно-деформированного состояния при взаимодействии РО дорожной машины с грунтовой средой.....	86
2.3 Особенности распределения напряжений в слое при уплотнении грунтовых сред дорожными катками.....	94
2.4 Выводы по Главе 2.....	98
<b>3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА УПЛОТНИТЕЛЯ С АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ СРЕДЫ.....</b>	<b>102</b>
3.1 Модели взаимодействия рабочих органов уплотняющих дорожных машин с упруговязкопластичной средой.....	102
3.2 Математическая модель взаимодействия рабочего органа уплотняющей машины с упруговязкопластичной средой в рамках подхода сосредоточенных параметров.....	105
3.2.1 Обоснование модели взаимодействия РО катка с грунтовой средой, представленной в виде системы конечного числа элементарных столбов с эквивалентными реологическими характеристиками.....	105
3.2.2 Математическая модель взаимодействия РО катка с упруговязкопластичной грунтовой средой.....	113
3.3 Эволюционная модель взаимодействия рабочего органа уплотняющей машины с упруговязкопластичной грунтовой средой .....	127
3.3.1 Реализация моделей грунтовой среды для описания взаимодействия с ней рабочего органа катка.....	129
3.4 Расчетные схемы вычислительных алгоритмов математических моделей взаимодействия рабочего органа дорожного катка и активной области слоя уплотняемой среды.....	140
3.4.1 Расчетная схема модели с представлением области в виде набора элементарных столбов для описания взаимодействия РО со средой при вибрационном уплотнении.....	140

3.4.2	Определение деформируемой уплотняющей машиной активной области грунтового слоя и исследование ее физико-механических характеристик.....	144
3.4.3	Расчетная схема модели с представлением области грунта в виде набора неэквивалентных областей для обоснования режимов работы катка.....	153
3.5	Выводы по Главе 3.....	166
4.	<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ СРЕД.....</b>	<b>168</b>
4.1.	Теоретическое обоснование исследования взаимодействия РО катка с грунтовой средой при импульсном воздействии.....	169
4.2	Методика проведения экспериментальных исследований взаимодействия РО катка и грунтовой среды.....	178
4.2.1	Планирование и проведение эксперимента для определения характера взаимодействия РО, представляемого штампами различной формы, с грунтовой средой.....	178
4.2.2	Экспериментальные исследования деформирования грунтов штампами, имитирующими РО катков.....	179
4.3	Планирование, проведение и результаты эксперимента по подтверждения адекватности модели взаимодействия РО вибрационного катка со слоем грунтовой среды.....	190
4.4	Выводы по Главе 4.....	206
5.	<b>ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ.....</b>	<b>208</b>
5.1	Обоснование механического импеданса активной области грунтового слоя, как критерия эффективного протекания процесса уплотнения при работе катка.....	208
5.1.1	Обоснование активной области уплотняемого слоя грунтовой среды в случае плоского пятна контакта с РО на энергоэффективных режимах работы катков.....	216

5.2 Обоснование комплекса режимных параметров работы катков для энергоэффективного уплотнения грунтовых сред.....	224
5.3 Определение комплекса режимных параметров работы вибрационных катков для энергоэффективного уплотнения грунтов.....	242
5.4 Критерий оценки энергоэффективности деформирования упруговязкопластичных грунтовых сред уплотняющими машинами.....	250
5.5 Выводы по Главе 5.....	257
6. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	259
6.1 Энергоэффективные конструкции вибрационных катков и рабочих органов.....	260
6.1.1 Самоходный вибрационный каток, оснащенный дополнительным вальцом.....	260
6.1.2 Особенности работы энергоэффективного катка при уплотнении грунтовых сред.....	266
6.1.3 Валец дорожного катка специального вида.....	275
6.1.4 Деформируемый РО в виде гидрошины с регулируемой жесткостью естественной адаптацией по контактному давлению.....	278
6.2 Планетарный вибровозбудитель с регулируемыми характеристиками и цепной передачей.....	281
6.3 Технологические рекомендации по энергоэффективному уплотнению грунтов вибрационными катками.....	288
6.4 Оценка эффективности использования разработанной методики выбора энергоэффективного режима работы уплотняющей машины.....	297
6.4.1 Оценка экономической эффективности использования энергоэффективных катков.....	300
6.5 Выводы по Главе 6.....	302
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	304
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	307
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акты испытаний.....	330
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Листинги программ.....	376
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акты внедрения.....	378
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Патенты.....	381

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Дорожная сеть нашей страны, как в абсолютном, так и в относительном исчислении, составляя по протяженности 1,5 млн. км, существенно уступает по протяженности дорожным сетям сопоставимых по площади мировых держав – США – 6,7 млн. км и Китая – 4,7 млн. км, что не может не оказывать влияние на общую конкурентоспособность экономики и качество жизни населения.

Решение проблем увеличения протяженности сети автодорог, повышение их качества и эксплуатационных характеристик в долгосрочной перспективе стало целью утвержденной в 2008 году транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозированным в 2021 году продолжением до 2035 года, предполагающей значительное увеличение государственных ассигнований на дорожное строительство. За прошедшее с первоначального утверждения плана стратегии время были сделаны выводы о необходимости увеличения расходов на строительство и обустройство автомобильных дорог практически вдвое в периоде с 2018 по 2024 годы по сравнению с предыдущим аналогичным периодом. Предполагаемые затраты на развитие транспортной инфраструктуры должны составить более 11 трлн. руб.

Достижение целей, заявленных в транспортной стратегии России, с учетом вновь сформулированных задач по развитию дорожной инфраструктуры требует 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. Развитие транспортной инфраструктуры тем самым ставит неременным условием развитие конструкций и повышение эксплуатационных характеристик используемой в дорожном строительстве техники. Особо это относится к каткам, как к машинам,

обеспечивающим уплотнением прочность и долговечность материалов и технологических слоев при строительстве автодорог.

Известно, что с нарастанием плотности уплотняемых дорожно-строительных материалов их прочностные характеристики увеличиваются непропорционально. В особой степени это затрагивает грунты земляного полотна основания автомобильных дорог. Наряду с невысокой стоимостью материалов, стоимость работ на уплотнение грунтов при устройстве земляного полотна, составляет единицы процентов от общих затрат на строительство дороги.

Важность качественного и эффективного уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве трудно переоценить. Любые затраты на высококачественные и дорогостоящие материалы дорожных одежд и совершенные технологии при строительстве дорог могут оказаться напрасными в том случае, если уплотненные грунты земляного не смогут обеспечить достаточной прочности основания, что непременно приведет к быстрому разрушению покрытия всей автодороги при эксплуатационных нагрузках.

Основным типом дорожных машин, используемым для уплотнения грунтовых слоев земляного полотна, являются катки различных типов, реализующие широкий спектр поверхностного силового воздействия на уплотняемый материал. Главной задачей использования катков при уплотнении грунтов является достижение требуемых плотностей с наименьшими затратами времени и ресурсов. Это требует решения научно-практической проблема адаптирования силового воздействия со стороны рабочего органа катка в соответствии с изменяющимися параметрами материала, подвергаемого уплотнению. Сложность решения этой задачи состоит в том, что главным условием является требование того, чтобы накопление грунтом пластических деформаций происходило наиболее интенсивно на всех этапах уплотнения. Наиболее широко для этого используются вибрационные катки, способные регулировать свои параметры в широком диапазоне для управления силовым воздействием.

Интенсификация инфраструктурного строительства предполагает дальнейшее повышение эффективности использования уплотняющей техники, которое в конечном итоге связано с задачей повышения доли мощности уплотнителя, передаваемой необратимо деформируемой грунтовой среде, по отношению к полной мощности, затрачиваемой уплотнителем. Это делает актуальной задачу энергоэффективной работы дорожных катков, при котором требуемые характеристики материала достигаются с наименьшей энергоемкостью процесса.

Большинство существующих исследований процессов деформирования 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.

Тем самым разработка новых теоретических методов описания взаимодействия рабочих органов катков с уплотняемой средой, способных учесть особенности передачи мощности, становится актуальной задачей. Результатами их приложения должны стать новые и перспективные конструкции рабочих органов уплотняющих средств и определение энергоэффективных режимов их работы при строительстве транспортных объектов. Эта область исследований в полной мере соответствует программе «Транспортная стратегия РФ на период до 2035 года».

Научные исследования по решению проблемы повышения энергоэффективности использования катков в дорожном строительстве 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 уплотнения грунтов дорожными катками и связанные с ними научные задачи являются областью постоянного интереса исследователей. Существенный вклад в изучение различных аспектов проблем в области уплотнения грунтов был внесен отечественными специалистами СоюздорНИИ, МАДИ, ХАДИ, СибАДИ и др. Нельзя не упомянуть в этой связи работы таких ученых, как 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. Пермяков, 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, K. Terzaghi, H.J. 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, Т. Tamura и др.

Этими учеными был успешно решен ряд теоретических задач в области механических основ 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 повышения

эффективности процесса уплотнения, так и в проектировании новых перспективных конструкций уплотняющей техники [127].

Цель исследования, проводимого в диссертационной работе - 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.

Предмет исследования: 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 уплотнения 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.

Указанные цели и задачи полностью соответствуют паспорту специальности 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины» в пунктах 2 - «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения» и 3 – «Совершенствование технологических процессов на основе новых технических решений конструкций машин».

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 уплотняемом 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 дорожного катка среде и связывающие энергоемкость 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 имеет основой комплексный подход, сочетающий экспериментальные и теоретические методы. Она включает математическое моделирование на основе методов теоретической механики и численного анализа, с привлечением методов 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, СЕВМ 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 «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, 8 свидетельств и патентов на изобретения и полезные модели РФ, опубликована монография.

Внедрение результатов исследований: результаты диссертационного исследования 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.

# 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНЫХ МАШИН ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ СРЕД

## 1.1. Общие характеристики и классификация дорожных машин для уплотнения грунтов

Уплотнение грунтовых сред дорожными катками при устройстве оснований сооружений, в первую очередь, дорог, является технологическим этапом строительства, важность которого сложно переоценить. Он обеспечивается деформированием грунтового слоя под внешним силовым воздействием. С увеличением плотности материала возрастают его прочностные свойства и повышается устойчивость дороги к воздействиям внешних нагрузок, в первую очередь, эксплуатационных.

Количественной характеристикой процесса уплотнения традиционно выступает коэффициент уплотнения [140, 144]

$$k_y = \frac{\rho(t)}{\rho_{ном}}, \quad (1.1)$$

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.

При уплотнении материал грунтового слоя находится в напряженно-деформируемом состоянии, исследование особенностей которого и составляет основу теоретического обоснования характеристик протекания процесса уплотнения и конструкций уплотняющих машин.

Требуемая плотность достигается поверхностным силовым воздействием со стороны уплотняющих машин, реализующих широкий класс таких режимов воздействия, производимого на уплотняемый грунт, которые приводят к накоплению необратимых (пластических) деформаций. Эти режимы различаются



по скорости приложения внешней силы, амплитуде, частоте, зависимости силы воздействия от времени, технологии реализации уплотняющего воздействия, характеристик рабочего органа, непосредственно контактирующего с поверхностью уплотняемого грунта.

Необходимо отметить, что грунтовые среды обладают уникальным по разнообразию набором физико-механических характеристик, зависящих от состояния и состава среды. Это, с одной стороны, усложняет формирование универсального теоретического подхода к описанию развития напряженно-деформированного состояния в уплотняемом слое, а с другой предоставляет широкие возможности для проектирования конструкций уплотняющих дорожных машин и устройств. Это привело и продолжает приводить к появлению новых уплотняющих машин, отличающихся характеристиками рабочих органов, типами и режимами силового воздействия, оптимально подходящих для уплотнения грунтовых сред с заданными характеристиками. Для их классификации можно использовать различные критерии: характер силового воздействия, массогабаритные характеристики, вид и форму рабочего органа, степень и характер адаптации к изменяющимся свойствам грунта, тип уплотняемого грунта, толщина слоя уплотняемого грунта и т.д. Естественно, критерии классификации не являются независимыми и связаны между собой, так что выбор конкретной машины диктуется, в первую очередь, спецификой практической задачи уплотнения, которую она призвана решать.

Основной задачей теоретических и экспериментальных исследований в области уплотнения грунтов, является выявление закономерностей пребывания среды в напряженно-деформируемом состоянии, от поверхностного силового воздействия для обоснования наиболее эффективного вида и режима воздействия, приводящего к необратимому деформированию и определению конструктивных особенностей уплотняющих машин.

Основными типами машин, применяемыми для уплотнения грунтов в дорожном строительстве, являются катки различных типов, виброплиты,

трамбующие устройства, специальные уплотняющие средства, которые существенно различаются по характеристикам рабочих органов. (Таблица 1.1.)

Таблица 1.1 – Рабочие органы уплотняющих машин

Рабочие органы уплотняющих машин									
Вальцы						Плиты		Деформируемые РО	
гладкие	решетчатые	кулачковые	пластинчатые	ребристые	специального вида	искривленного профиля	прямолинейного профиля	пневмошинные	гидрошинные

Классификация характеристик уплотняющих машин [60,117,127] (Пермяков, Захаренко, Савельев и др.) руководствуется критериями, определяющими степень влияния рабочих органов машин на необратимое деформирование грунтовых сред. При этом можно считать, что наиболее универсальным типом уплотняющей дорожной техники являются катки. Их конструкции позволяют реализовать практически все из возможных видов и режимов уплотняющего силового воздействия, как статического, так и динамического – как виброуплотнения, так и трамбования.

Таблица 1.2 – Классификация характеристик уплотняющей техники [127]

Уплотняющие машины	
Критерий классификации	1. Контроль характеристик материала в процессе уплотнения
	1.1 Непрерывный 1.2 Эпизодический
2. Регулирование уплотняющих давлений	2.1 Саморегулирование от прохода к проходу
	2.2 Саморегулирование за один проход на протяжении контакта рабочего органа с материалом
	2.3 Прерывистое ступенчатое от прохода к проходу
	2.4 Прерывистое непрерывное от прохода к проходу
	3.1 Применение недеформирующегося рабочего органа значительной протяженности
	3.2 Применение деформирующегося рабочего органа
4. Минимизация сопротивления деформированию уплотняемых материалов	4.1 Управление режимами оптимальных температур и влажности
	4.2 Вращационное воздействие
	4.3 Учёт анизотропных свойств уплотняемых материалов
	4.4 Учёт реологических свойств
5. Дополнительное касательное силовое воздействие на уплотняемый материал	5.1 С использованием статического касательного усилия
	5.2 С использованием импульсного касательного усилия

Всеми этими видами силового воздействия от дорожного катка может быть обеспечено напряженно-деформированное состояние слоя земляного полотна, приводящее к требуемой степени уплотнения и, как следствие, к необходимой прочности и устойчивости всей конструкции автодороги.

## 1.2 Особенности статических режимов уплотнения слоев грунтовых сред дорожными катками

Статический режим уплотнения слоев грунтовых сред реализуется с использованием как гладковальцовых катков, так и катков с другими типами рабочих органов. Напряженно-деформированное состояние среды, приводящее к возникновению необратимой деформации, создается вследствие воздействия на пятно контакта вальца с грунтом веса поступательно движущегося катка (доли веса катка, приходящейся на валец). Статическая укатка производится со скоростями поступательного движения 3-5 км/ч. Уплотнение материала происходит вследствие перегруппировки и более плотной упаковке частиц в деформируемой области слоя грунта. Сопутствующее упрочнение обусловлено рядом факторов: скоростью поступательного движения катка, его массой, контактным давлением и его распределением по пятну контакта в процессе движения катка, при этом основная роль отводится величине контактного давления [151,155].

Классификация катков, реализующих статическую укатку, проводится, как правило, по типу рабочего органа, выделяя гладковальцовые катки, кулачковые катки и пневмошинные катки, характер воздействия которых на среду слоя различается.

Физико-механические характеристики грунтов, подвергаемых динамическому воздействию, испытывают существенные изменения в процессе уплотнения. И, если плотность грунта возрастает при этом незначительно, то его прочностные характеристики возрастают нелинейно с изменением коэффициента

уплотнения. В рамках многочисленных исследований свойств различных грунтов как у нас в стране, так и за рубежом [8, 9, 13, 25, 151, 172, 193, 196, 202], было показано, что при приближении коэффициента уплотнения к значению  $k_y = 1$ , а особенно при превышении этого значения, влияние плотности грунта на его прочность, а также устойчивость дорожных одежд, увеличивается нелинейно и может быть описано степенной функцией или экспонентой.

Для гладковальцовых статических катков (Рис. 1.) величина контактного давления на пятне контакта определяется массой катка и составляет 300-700 кПа.



Рисунок 1.1 Гладковальцовый статический дорожный каток

Контактное давление распределено неравномерно как по пятну контакта, так и по толщине слоя, и его эпюра на заданной глубине зависит от средней линейной нагрузки на оси вальца  $q$ , его радиуса  $R$ , величины статической нагрузки  $F_{st}$ , модуля упругой деформации среды  $E_{el}$ , а также тягового усилия  $T$ . При этом максимальное значение контактного давления  $\sigma_{max}$  пропорционально величине [151]

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{F_{st} E_{el}}{LR}} \quad (1.2)$$

Характерный вид эпюры напряжения и схема уплотнения для статической укатки гладким цилиндрическим вальцом грунтового слоя конечной толщины  $h_0$

приведен на Рис. 1.2. При движении вальца горизонтальная координата максимального давления смещается относительно центра вальца тем сильнее, чем выше тяговое усилие и величина накопленной слоем пластической деформации  $\Delta z_{pl}$

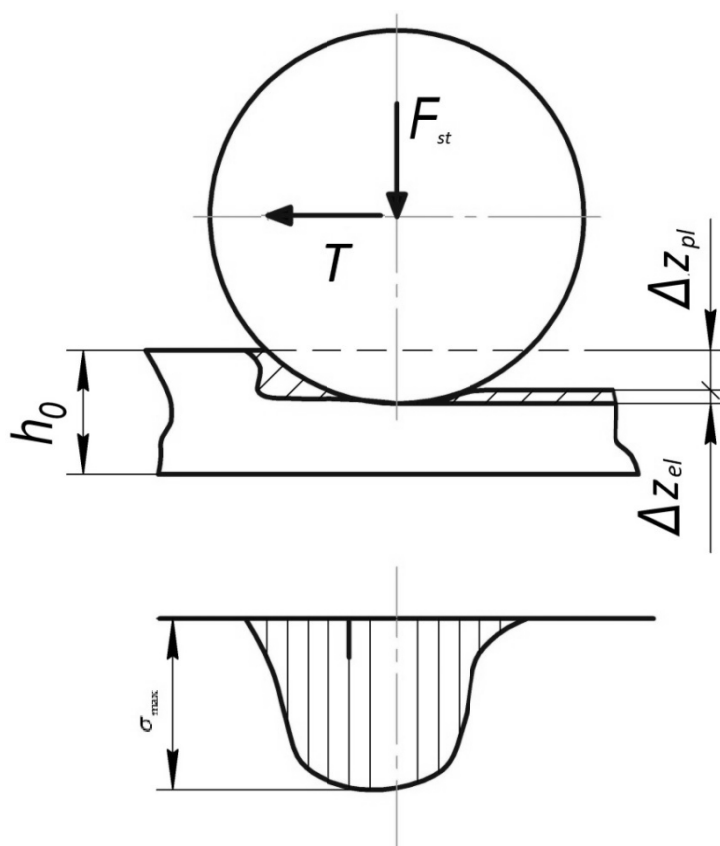


Рисунок 1.2 – Статическая укатка грунтового слоя конечной толщины.

Для изучения распределения напряжений, возникающих при толще грунтового слоя, находящегося в напряженно-деформированном состоянии, существенным оказывается решение задачи о деформировании цилиндрическим штампом плоской поверхности упруговязкопластичной среды. Результаты, полученные в исследованиях многих отечественных специалистов, в частности, Л.А. Антипова, В.Ф. Бабкова, Д.С. Баранова, Н.Н. Иванова, Г. И. Покровского, Г. Пресса, В.Н. Тарасова, Н.А. Ульянова, И.С. Федорова, Н.А. Цытовича и др. [8, 22, 63, 117, 124, 146, 150, 157] позволяют считать вертикальные нормальные напряжения в уплотненном грунтовом массиве, соответствующими определенным с точки зрения теории упругости [139] в силу прекращения

необратимых деформаций набравшего плотность грунта.

Статические режимы укатки, реализуемые гладковальцовыми катками, характеризуются низкой производительностью. Достижение требуемой плотности грунта при статической укатке требует использования нескольких (как минимум двух) катков для различных этапов уплотнения - легкого катка на неуплотненном слое и более тяжелого для уплотненного, что устанавливается СНиПом [137]. Необходимость использования нескольких катков вытекают из условия получения полного диапазона контактных давлений, требуемых для обеспечения пластического деформирования грунтов. Тем самым можно установить, что способность передавать энергию грунтовому слою для его пластического деформирования у статических гладковальцовых катков недостаточна. В этом смысле статическая укатка наряду с низкой производительностью, обладает низкой энергоэффективностью.

При использовании **кулачковых катков** требование для контактных давлений при уплотнении не превышать предела прочности материала слоя может нарушаться. Работа кулачкового катка (Рис 1.3) предполагает достижения контактными напряжениями на торцевых поверхностях заглубленных в грунт кулачков значений, превышающих предел его прочности. Кулачки, рядами которых оснащен рабочий орган (валец) в шахматном порядке, могут иметь клиновидную или призматическую форму (sheepfoot) или форму с увеличенной площадью рабочей поверхности (padfoot).



Рисунок 1.3 – Кулачковый статический дорожный каток

Наиболее широко кулачковые катки применяются для уплотнения связанных грунтов, требующих высоких значений напряжений в глубине слоя для развития пластических деформаций и малоприменимы для несвязанных и слабосвязанных грунтов из-за повышенной разрыхляющей способности. Известно соотношение, определяющее максимальное давление, создаваемое на торцевой опорной поверхности кулачка площади  $s$  при наличии  $n$  кулачков в ряду на вальце, нагруженном силой тяжести  $F_{st}$  [151]

$$\sigma_{\max} = \frac{2F_{st}}{ns} \quad (1.3)$$

Сопутствующее разрыхление приповерхностного слоя грунта в ряде случаев играет положительную роль для процесса уплотнения, поскольку при этом механически разрушаются силы сцепления, связывающие частицы материала и препятствующие перегруппировке и упаковке частиц [151, 166].

Кулачковые катки обладают ограниченной глубиной доступных им для проработки грунтовых слоев, составляющей 25-30 см. При повторных проходах катка по своему следу глубина погружения кулачков в набравший плотность материал уменьшается, соответственно увеличивается контактное давление, однако такого рода естественная адаптация воздействия кулачкового катка является недостаточной в силу отсутствия возможности управляющего воздействия, регулирующего адаптивные свойства. Кроме этого, производительность кулачковых катков снижается за счет необходимости использовать дополнительный каток, уплотняющий и выравнивающий разрыхленный кулачками приповерхностный слой. Энергоэффективность уплотнения кулачковыми вальцами слоев грунтовых сред сравнима с таковой для статических гладковальцовых катков, естественно, для уплотнения слоев одинаково толщины.

С точки зрения адаптивных свойств, особое место среди статических катков занимают **катки с пневмошинными рабочими органами** (Рис 1.4),





Рисунок 1.4 – Пневмошинный статический дорожный каток

Характер уплотняющего воздействия пневмошинных рабочих органов катков определяется особенностями развития создаваемого ими напряженно-деформированного состояния в грунтовом слое. Основными чертами поверхностного нагружения грунта пневмошинным рабочим органом являются:

- 1) Малая ширина пятна контакта, сравнимая с его длиной, имеющего форму границы близкую к овальной или эллиптической [8, 75, 115, 139, 141];
- 2) Дискретный характер распределения поверхностной нагрузки, определяемый расположением отдельных пневмошин, которое может быть рядным или шахматным;
- 3) Деформирование пневмошины при взаимодействии с грунтовым слоем, что приводит к изменению, как геометрических характеристик пятна контакта, так и величины и распределения контактных напряжений по отпечатку шины.

Это должно быть учтено при изучении распределения напряжений в грунтовом слое, которое может быть с достаточно хорошей степенью точности рассчитано методами теории упругости (в рамках принятых при этом

допущений). Для одной пневмошины с шириной пятна контакта  $a$  может быть построено распределение уплотняющих нормальных напряжений (Рис. 1.5). Это распределение используется для определения напряженно-деформированного состояния, создаваемого упорядоченным набором пневмошин методом суперпозиции. Тем самым, выделяется зона эффективного уплотнения и определяются параметры воздействия, позволяющие повысить производительность катка.

Описание процесса взаимодействия пневмошины с деформируемым слоем грунтового материала требует изучения деформативных свойств пневмошин, которые существенно зависят от геометрических характеристик шины, материала шины и давления воздуха внутри шины. Деформативные и эксплуатационные характеристики пневмошин, а также особенности их взаимодействия с поверхностью в различных условиях были предметом исследования широкого круга отечественных и зарубежных авторов, в частности: В.А. Анфимова [6], А.К.Бирулю [31-34], В.Ф. Бабкова [12-14], О.Т. Батракова [22-26], В.А. Бидермана [30], В.И. Кнороза [74], А.А. Малышева [83], С.В.Савельева [127-132], В.Н. Тарасова [140,141], Н.А.Ульянова [145], Р. Хедекеля [179], С.W. Fervers [176], A. Oida [189], M.G.Pottinger [203], W.Smith [214], J.T. Tielking [219], R.N.Young [2224] .

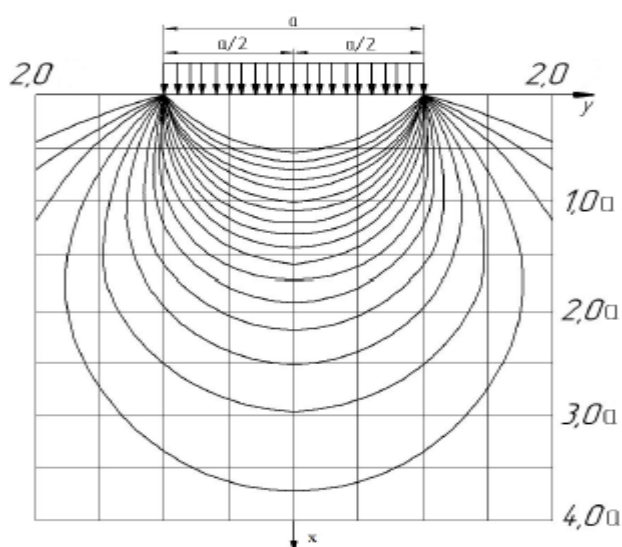


Рисунок 1.5. – Распределение изобар нормального напряжения под одной пневмошиной (по С.П.Сюрье [128])

Учет радиальной деформации колеса при статической укатке требует выявления зависимости деформации от величины действующей силы. Согласно экспериментальным исследованиям, радиальная деформация шины растёт нелинейно от нагрузки и закон деформирования имеет степенной характер [50]

$$F_{st} = \alpha (\Delta z_{pt})^\tau, \quad (1.4)$$

где коэффициент  $\alpha$  имеет смысл обобщенной жесткости, а  $\tau$  - показатель отличия закон деформирования от линейного. Радиальная деформация шины, зависящая от ее физических параметров – радиуса шины  $R$ , радиуса протектора  $R_{pr}$  и состояния, задаваемого давлением воздуха в шине  $p_w$ , может быть в линейном приближении вычислена по формуле Р. Хедекеля [179]:

$$\Delta z_{pt} = \frac{F_{st}}{2\pi p_w \sqrt{RR_{pr}}} \quad (1.5)$$

Задача о порождаемом статическим нагружением шины среднем давлении на отпечаток контакта с грунтом в зависимости от его площади и давления воздуха в шине, существенная не только для определения уплотняющих характеристик шины, но и для другой важной прикладной задачи - определения ее грузоподъемности, была рассмотрена В.Н. Тарасовым в работе [141].

Размер пятна контакта, его форма, и, соответственно величина контактных давлений, создаваемых пневмошиной, так же, как и их распределение, будут зависеть от состояния материала грунтового слоя, подвергаемого уплотняющему воздействию. Рыхлый грунт, при деформировании пневмошинным рабочим органом катка, обеспечивает большую величину пятна контакта и как следствие, более низкие контактные давления, достаточные для неупругого деформирования, но не превышающего предел прочности. Уплотненный грунт подвергается более интенсивному воздействию со стороны пневмошины на пятне контакта за счет уменьшившейся величины площади контакта при возросших контактных давлениях. Это выявляет естественные адаптивные свойства пневмошин по контактным давлениям при статическом уплотнении грунтовых сред, обеспечиваемые, в первую очередь, нелинейным законом деформирования (1.4).

### 1.3 Особенности динамических режимов уплотнения слоев грунтовых сред дорожными катками

Низкая производительность и, как следствие, повышенные затраты ресурсов на уплотнение грунтовых сред при работе катков, реализующих статические режимы уплотнения, делают их использование в дорожном строительстве все менее и менее востребованным. В настоящее время основными уплотняющими машинами, нашедшими самое широкое применение, являются катки, обеспечивающие динамический характер поверхностного нагружения грунтового слоя. При динамическом нагружении напряженно-деформированное состояние материала грунтового слоя создается не только за счет воздействия силы тяжести массы машины, передаваемой слою грунта посредством рабочего органа, но и за счет действия периодического или квазипериодического силового возмущения с различным характером зависимости от времени. Основными из них являются гармонический, квазигармонический и импульсный.

Различают несколько режимов уплотнения, которые могут реализовываться одними и теми же или различными уплотняющими машинами:

1) Вибрационное уплотнение или виброуплотнение, реализуемое виброкатками (Рис. 1.6) или виброплитами (Рис.1.7) в случае действия гармонической силы, происходящего без потери контакта рабочего органа с поверхностью грунтового слоя;

2) Вибротрамбование, в которое переходит виброуплотнение при значениях амплитуды гармонической силы достаточных для отрыва рабочего органа от поверхности грунтового слоя, происходящее с исходной частотой вибрационного воздействия;

3) Трамбование, при котором импульсное воздействие на поверхность слоя осуществляется, как правило, падением в поле силы тяжести массивной плиты;

4) Квазиимпульсное воздействие, реализуемое, например, массивным рабочим органом машины (Рис. 1.8) при уплотнении слоев грунтовых сред значительной глубины.



Рисунок 1.6 – Самоходный вибрационный каток



Рисунок 1.7. – Вибрационная плита



Рисунок 1.8. – Импульсная уплотняющая машина с рабочим органом специального вида.

Использование динамических режимов, в первую очередь вибрационного уплотнения и вибротрамбования, позволяют существенно повысить интенсивность уплотнения, поскольку при этом уплотняемая среда существенно меняет свой отклик на деформирующее воздействие за счет реализации иных механизмов развития напряженно-деформированного состояния по отношению к статическому режиму. Значения скоростей и ускорений частиц грунтового слоя становятся настолько велики, что пренебрегать вязкими и инерционными свойствами материала слоя становится невозможным. Эти факторы оказывают существенное влияние на характер поглощения энергии грунтовым слоем, а богатый набор параметров динамического воздействия позволяет более тонко управлять процессом уплотнения, выявляя те из режимов, при которых неупругое деформирование грунтового слоя происходит наиболее интенсивно – то есть являющиеся наиболее энергоэффективными.

Основным типом рабочих органов **вибрационных катков** является гладкий металлический валец. Гладковальцовые катки являются в настоящее время наиболее универсальными уплотняющими машинами и успешно используются для уплотнения грунтов, укрепленных грунтов, щебеночных оснований, бетонных и асфальтобетонных смесей [127]. Использование таких катков позволяет оценить рост эффективности уплотнения по сравнению с аналогичными

статическими катками. Например, масса вибрационного катка по сравнению со статическим, допускающим достижение аналогичного по величине коэффициента уплотнения снижается в разы [68, 76, 80]. 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 [71] как отношение амплитуд их линейных давлений на ось вальца с учетом возмущающей гармонической силы

$$k_{eff} = \frac{q_{st}}{q_{vib}}, \quad (1.6)$$

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.

Различают самоходные и прицепные вибрационные катки. У самоходного катка вибрационный валец является движителем. Наряду с уменьшением массы и повышением интенсивности уплотнения это делает энергоэффективность вибрационных катков выше на порядки, чем у статических, позволяющих добиться аналогичных коэффициентов уплотнения. Однако прямых исследований характеристик влияния видов и режимов уплотняющего динамического воздействия на энергетические характеристики процесса уплотнения до последнего времени не проводились. В достаточно подробном экспериментально-аналитическом обзоре Fratta и Kim [177] устанавливаются зависимости эффективной глубины уплотняемого грунта при работе вибрационного катка от величины сообщаемой слою энергии для широкого спектра режимов воздействия, в частности, с оценкой резонансных характеристик уплотняемой области слоя, взаимодействующей с рабочим органом, моделируемой в рамках подхода сосредоточенных параметров.

Как и в случае статического уплотнения, максимальное контактное

давление, достигаемое при динамических режимах уплотнения, может быть оценено по амплитудному значению силы, действующему на жесткий валец длины  $L$ , радиуса  $R$ , уплотняющий грунт с коэффициентом упругости  $E$ , как [71,153]

$$\sigma_{\max} = \sqrt{k \frac{(F_{st} + F_0)E}{4LR}}, \quad (1.7)$$

где  $k$  - коэффициент превышения, зависящий от отношения амплитуды возмущающей силы к статической нагрузке на пятно контакта, обусловленной весом катка  $k = f(F_0 / F_{st})$ . Значения коэффициента превышения лежат в диапазоне 3..5, уменьшаясь с возрастанием вынуждающей силы.

Установлено, что характер эффективности поглощения энергии уплотнителя объемом грунтового слоя зависит от ряда факторов [137]:

- 1) Текущей плотности грунта слоя, определяющей деформативные характеристики;
- 2) Величины силы воздействия со стороны РО катка (значениям коэффициента превышения);
- 3) Частоты гармонической силы воздействия со стороны РО катка, определяющей скорость движения частиц грунта и диссипативную силу вязкого трения;
- 4) Скорости поступательного движения катка, определяющей время уплотняющего воздействия со стороны РО катка.

Анализ динамики развития напряженно-деформированного состояния в толще грунтового слоя при вибрационном уплотнении дорожными катками и при вибротрамбовании следует проводить в рамках подхода о квазистационарности происходящих колебательных процессах в толще грунтового слоя. В том случае, когда частоты вынуждающей силы находятся в рамках применяемых для виброуплотнения значений – 20-100 Гц, на рекомендованных диапазонах для соответствующих амплитуд вынуждающей силы [71], можно считать, что подверженная воздействию область слоя совершает вынужденные колебания с частотой силового воздействия. При этом амплитуды колебаний частиц слоя



существенно превышают амплитуду свободных колебаний вальца, определяемых конструктивными особенностями катка.

Частным случаем динамического уплотнения дорожными катками является уплотнение с использованием **вибрационно-осцилляционных систем**. Схема работы приведена на Рис.1.9

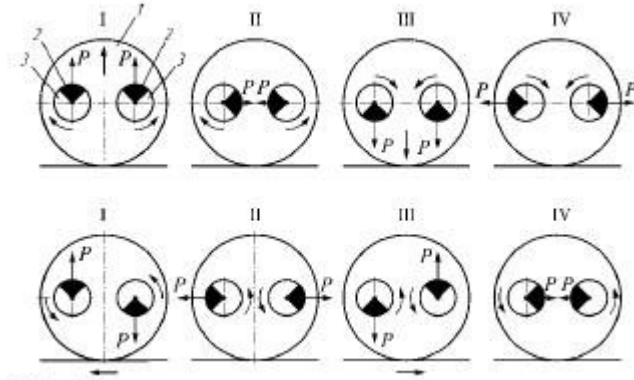


Рисунок 1.9. – Схема возникновения вращательных осцилляций  
вибрационного вальца вокруг своей оси при работе

1-валец, 2,3- согласованно вращающиеся дебалансные валы.

Режим работы катка с вибрационно-осцилляционным РО реализуется при наличии согласованного вращательного движения массивных дебалансов, оси вращения которых разнесены по отношению к оси вращения вальца. Движение дебалансов вибровозбудителя, имеющих постоянную разность фаз, приводит к возникновению вращательных колебаний вальца, происходящих с частотой вращения дебалансных валов. Сопутствующие сдвиговые колебания в касательной плоскости по отношению к нормали к поверхности слоя нарушают структуру связей между частицами материала слоя и облегчают их перераспределение и переупаковку [132].

Достоинством этого режима работы катков с вибрационно-осцилляционным РО является его направленность и возможность регулировать преимущественное направление осцилляционных колебаний, которое задается взаимным положением дебалансных валов вибровозбудителя [132].

Основным условием работы катка с осцилляторным вальцом является сохранение контакта с поверхностью грунтового слоя, толщина которого должна

быть небольшой для распространения сдвиговых деформаций, создаваемыми осцилляциями. Это требование накладывает ограничение на амплитуду силы вынуждающего вибрационного воздействия, однако обеспечивает равномерное и качественное по глубине слоя уплотнение.

Однако, указанные преимущества не дают возможность использовать осцилляторные катки для уплотнения грунтов до достижения требуемого значения плотности в силу недостаточных значений обеспечиваемых ими контактных давлений. Этот факт требует использования на уплотненном осцилляторным вальцом слое более тяжелого статического вальца, способного создать контактные давления, достаточные для того, чтобы грунт набрал требуемую прочность.

Гладкие металлические вальцы не являются единственными доступными для использования рабочими органами в случае вибрационного уплотнения и вибротрамбования. Решетчатые вальцы, кулачковые вальцы различных типов и пневмошинные рабочие органы катков также могут быть применены для реализации динамических режимов уплотнения. В случае пневмошинных рабочих органов катков ограничивающим фактором выступают потери, неизбежно возникающие при деформировании рабочих органов за счет их диссипативных свойств, что также снижает эффективность передачи среде энергии уплотняющего воздействия.

Исследователями предпринимаются попытки устранить недостатки жестких рабочих органов гладковальцовых катков и деформируемых пневмошинных рабочих органов. Конструкция адаптируемого рабочего органа пневмошинного катка, теоретически обоснованная и разработанная С.В.Савельевым [127], позволила варьировать жесткость рабочего органа в широком диапазоне. Высокая степень адаптивности по жесткости РО обеспечивалась наличием системы дополнительных металлических бандажей, влияющих на деформативные свойства РО при изменении давления в шине. При этом значения жесткости могли варьироваться от значений, близких к жесткости пневмошины, до величин,

практически соответствующих жесткому вальцу. Основной проблемой при практическом использовании такой конструкции РО катка является эффективное управление адаптационным параметром. Это тем более важно, что современные технологии уплотнения требуют возможности адаптации в реальном времени.

Ряд указанных выше недостатков катков вальцами единственного типа позволяет устранить использование **комбинированных катков**, сочетающих, согласно ГОСТ 21994-82 использование рабочих органов различных видов. Уплотнение комбинированными катками позволяет применить к грунтовому слою последовательно различные режимы уплотняющего воздействия, обусловленные характером комбинации рабочих органов, реализуемых в конструкции катка.

Вопрос о повышении эффективности использования уплотняющих дорожных машин разрешается в рамках современных теоретических подходов к совершенствованию технологий уплотнения путем адаптивного регулирования характеристик уплотняющего воздействия согласованных с изменениями физико-механических деформативных свойств уплотняемых грунтовых сред. Однако, существующие методы адаптирования силового уплотняющего воздействия руководствуются, в основном, необходимым критерием сохранения значений контактных напряжений в рамках диапазона, требуемого для уплотнения грунтовых сред. Изменение деформативных свойств грунтовой среды с возрастанием плотности при работе катков, требует более точного учета всех деталей процесса взаимодействия рабочего органа уплотнителя с уплотняемой средой, в первую очередь, энергопередачи. Характеристики, связанные с преобразованием затрачиваемой на уплотнение энергии и поглощением ее уплотняемой средой, если и учитываются, то косвенным образом, по величинам, описывающим эффективность уплотнения или по производительности уплотняющей машины. Таким образом, становится очевидным, что в настоящее время проблема анализа энергоэффективности работы катков при уплотнении грунтовых сред в дорожном строительстве проработана недостаточно.

#### 1.4. Энергоэффективность дорожных катков при уплотнения грунтовых слоев земляного полотна – совершенствование технологических процессов в дорожном строительстве

Технологии, применяемые для уплотнения дорожно-строительных материалов, имеют глубокие исторические традиции, восходящие к самым истокам человеческой цивилизации. Основной целью всех технологий дорожного строительства, непрерывно развивающихся по настоящее время, было достижение надлежащего качества, выражающегося, в первую очередь, в соответствии требованиям эксплуатационных характеристик автомобильных дорог. Однако, современные требования, выдвигаемые по отношению к технологическим процессам в дорожном строительстве, не ограничиваются установлением жестких критериев качества, обеспечивающих эксплуатационные характеристики. Одним из главных подходов к оценке эффективности обеспечения технологических процессов и, что является ключевым на современном этапе, оказывается обеспечения минимальных затрат ресурсов при достижении требуемого качества.

Выражением этого подхода во многом является реализуемый как у нас в стране, так и за рубежом принцип интеллектуального или разумного уплотнения грунтов – «Intelligent soil compaction» [196]. Разумность подхода к уплотнению интерпретируется как соответствие параметров воздействия характеристикам материала слоя грунтовой среды в заданный момент времени. Параметры воздействия могут характеризоваться амплитудными, частотными и временными зависимостями свойств среды, которым должны точно соответствовать. Реализация концепции «Intelligent soil compaction» сопряжена с разработкой и использованием средств контроля состояния среды и регулирования параметров воздействия в реальном времени, что не всегда выполнимо для катков существующих моделей [196]. Целью этого является совершение катком работы над слоем, обеспечивающей пиковую величину накапливаемой пластической деформации для его заданного начального состояния. Это дает возможность

оценки процесса уплотнения как процесса преобразования энергии уплотнителя в работу, совершенную над материалом слоя и ушедшую на его пластическое деформирование, происходящее с изменением плотности, деформационных и прочностных свойств. Тем самым встает важная научная задача о путях повышения энергоэффективности технологического процесса уплотнения.

Современная отрасль знаний о рациональном использовании энергетических ресурсов в технологических процессах и процессах, связанных с потреблением энергии рассматривает энергоэффективность как эффективное (рациональное) использование энергии. Таким образом, энергоэффективность технологического процесса это качество использования требующейся для его осуществления энергии (в том числе и на единицу продукции). Из двух процессов более качественным с точки зрения энергоэффективности будет тот, у которого полезная работа при одинаковых затратах энергии будет выше или тот, у которого при одинаковой величине полезной работы, затраты энергии на ее совершение будут ниже. Повышение энергоэффективности, тем самым, возможно как снижением потерь мощности при осуществлении технологического процесса, так и улучшением качества передачи и преобразования энергии, идущей на совершение полезной работы [104].

В отношении работы катков в дорожном строительстве, в том числе при уплотнении грунтовых сред, а также бетонов, асфальтобетонных смесей, вопросы энергоэффективности исследованы недостаточно. Следует отметить работы В.Г. Зедгенизова, в частности [62], где устанавливается полезная доля энергии, пошедшая на преодоление сопротивления грунтовой среды при выполнении земляных работ, а также работу [53], в которой энергия, затраченная на уплотнение асфальтобетонной смеси, играет роль одного из основных факторов, определяющих эффективность ресурсосберегающей технологии устройства дорожных одежд. Отдельно следует отметить класс работ, например [184], в которых изучаются различные способы выявления характеристик грунтовой среды в процессе стандартных исследований, аналогичных испытаниям

ударником ДорНИИ, и обсуждаются вопросы передачи энергии среде в зависимости от характеристик измерительной установки.

Для работы катков при уплотнении технологических слоев автомобильных дорог задачи повышения энергоэффективности являются актуальными и стоят особенно остро в силу того, что доля энергии уплотнителя, идущая на неупругое деформирование среды, незначительна в силу особенностей самого процесса уплотнения грунтовой среды и составляет единицы процентов [104].

Дальнейшее изучение конкретных путей повышения энергоэффективности уплотнения грунтов дорожными катками, требует анализа потерь энергии в уплотнителях и факторов, оказывающих влияние на качество ее передачи от уплотнителя уплотняемому слою. При выборе причин и факторов, существенных для оценки потерь энергии при уплотнении, необходимо учитывать особенности взаимодействия рабочего органа катка и грунта, представляемого в виде упруговязкопластичной среды с известными свойствами. Результаты исследования взаимодействия рабочего органа катка и слоя уплотняемой среды, проведенные в рамках настоящей работы, позволяют сделать выводы о наиболее значимых источниках потерь и проанализировать доступные способы их полной или частичной компенсации [104].

В комплексе причин и факторов, влияющих на рассеяние энергии при осуществлении уплотняющего воздействия РО катка на среду можно провести классификацию, разделив их на типы, определяющие характер и способ реализации.

Часть причин потерь энергии при уплотнении грунтов дорожными катками имеют своим источником конструктивные особенности катков и являются неизбежными. Их анализ не относится к предмету исследования в настоящей работе.

1-я группа объединяет типы потерь, реализующиеся в вязкоупругих элементах подвески рамы катка, устройствах вибрационной защиты и т.д. Способы повышения энергоэффективности работы катков устранением или

компенсацией этих потерь относятся к методам конструирования и технологиям изготовления соответствующих элементов и узлов уплотняющей машины и непосредственного отношения к задаче эффективной передачи энергии уплотнителя слою уплотняемого грунта не имеют.

2-я группа потерь реализуется в рабочем органе катка за счет диссипации энергии в его узлах и механизмах, в частности приводах. Особо необходимо выделить потери, связанные с работой генераторов возбуждения периодической силы в служащих для обеспечения динамических режимов воздействия. При этом часть энергии, переданной возбудителю, с неизбежностью расходуется на возбуждения силы, направленной по нормали от поверхности слоя и не оказывающей уплотняющего воздействие на обрабатываемую среду (случай необходимости перехода к режиму вибротрамбования должен рассматриваться особо).

3-я группа факторов, влияющих на потери при работе катков, обеспечивается характером отклика деформируемой среды на силовое воздействие со стороны рабочего органа, отвечает за передачу энергии слою. Эта группа факторов может быть компенсирована полностью или частично регулированием параметров вида и режима уплотняющего силового воздействия катка. Недостаточная величина контактных давлений приводит к тому, что необходимое условие эффективного уплотнения (В.Б.Пермякова) не выполняется и энергия рассеивается на упругие колебания грунта и диссипацию за счет сил вязкого трения. Это может происходить на заключительных этапах уплотнения при приближении плотности среды к нормативным значениям. Следующим фактором, влияющим на передачу энергии от работающего катка грунтовой среде, выступает зависящая от режима нагружения глубина проработки слоя. Выбор рациональной толщины слоя происходит с учетом гарантированной проработки, что зачастую ведет к избыточным затратам энергии уплотнителя. Рассмотрение влияния режима деформирования на передачу энергии прорабатываемой области может позволить уточнить глубину проработки слоя с

учетом требования энергоэффективности. Временной фактор оказывает существенное воздействие на передачу грунтовому слою энергии уплотняющего воздействия – за проход катка активная область грунта может находиться различное время в состоянии, ведущем к пластическому деформированию, и не накопить величины необратимой деформации, которая могла бы быть обеспечена при энергоэффективном режиме уплотнения [104].

4-я группа факторов обуславливает неизбежные потери в среде при передаче ей энергии уплотнителя. В эту группу факторов входят потери при амплитудах смещения частиц среды, не обеспечивающих их перераспределения с последующим уплотнением, и потери на работу диссипативной силы вязкого трения частиц среды. Неконсервативная сила вязкого трения частиц среды присутствует при любом движении активной области слоя упруговязкопластичной грунтовой среды, обеспечивая рассеяние энергии, независимо от того, являются соответствующие деформации необратимыми, частично обратимыми или пластическими. Другим источником потерь этой группы является затраты энергии уплотнителя на работу по возбуждению упругих колебаний среды, смещение частиц при которых не приводит к уплотнению за счет их перераспределения в случае вибрационного уплотнения [76-78].

Тем самым повышение энергоэффективности состоит в устранении или уменьшении влияния доступных для регулирования факторов с тем, чтобы доля поглощенной слоем уплотняемой упруговязкопластичной среды энергии поверхностного силового воздействия, преобразованная в работу пластического деформирования слоя, увеличивалась. При этом качество энергии, затраченной на пластическое деформирование, определяется приращением коэффициента уплотнения на единицу переданной грунтовому слою энергии [104].

Разработка конструкций катков и определение режимных параметров, обеспечивающих повышение энергоэффективности их работы при уплотнении грунтов, должна проводиться с учетом тех источников потерь, влияние которых



на качество передачи уплотняемому грунту энергии уплотнителя при этом будет частично или полностью устраняться. Основой для этого служит подход, при котором динамическое воздействие на грунт в каждый момент времени должно осуществляться в таком режиме, чтобы среда находилась в состоянии с наименьшим сопротивлением неупругому деформированию для ее текущих физико-механических характеристик.

Совершенствование рабочих органов катков и режимов их использования позволяет повысить эффективность уплотнения, обеспечив рост энергии, переданной уплотняемой среде, воздействуя на следующие факторы, влияющие на потери (см. Рис. 1.10):

- низкая энергоэффективность устройств катка, обеспечивающих силовое воздействие, когда при их работе для генерирования полезного периодического воздействия на грунт затрачивается дополнительная мощность;

- высокая сопротивляемость уплотняемой среды внешнему силовому воздействию со стороны катка в силу зависимости физико-механических свойств среды от его параметров и, как следствие, неэффективная передача энергии уплотнителя уплотняемой среде.

- глубина эффективной проработки катком материала слоя, когда накапливающие необратимые деформации области среды не являются оптимальными по глубине;

- недостаточное время эффективного нагружения материала слоя;

- недостаточная величина относительного смещения частиц при деформировании слоя рабочим органом катка;

- рассеяние энергии уплотнителя за счет вязкого трения в среде.

Таким образом, анализ возможных причин и факторов потерь энергии уплотнителя при передаче ее грунтовой среде позволяет сформулировать пути решения проблемы по повышению энергоэффективности процесса уплотнения в рамках усовершенствования конструкций и рекомендаций по эксплуатации катков различных типов.

1. Обоснование и разработка инновационных конструкций рабочих органов катков различных типов и генераторов возбуждения периодического воздействия, уменьшающих потери при осуществлении поверхностного силового воздействия на слой среды.

2. Оптимизация режима работы катка варьированием доступных параметров воздействия на слой грунтовой среды, с учетом ее текущего состояния, таким образом, чтобы доля энергии, затраченная на пластическое деформирование слоя, была максимально возможной.

Конкретизация использования приемов для устранения различных причин потерь энергии при уплотнении грунтовых слоев дорожными катками в рамках настоящей работы представлена в таблице 1.3.

Несомненно, количественное повышение энергоэффективности катков при использовании новых конструктивных и эксплуатационных решений должно рассматриваться с точки зрения решения задачи оптимизации.

В качестве целевой функции, комплексно определяющей энергоэффективность работы катков для уплотнения грунтовых сред, предлагается рассматривать векторную функцию

$$\left( \begin{array}{c} k_y \\ \frac{\Delta W_{\text{пласт}}}{\Delta W_{\text{полн}}} \\ k_y \\ \frac{\Delta W_{\text{пласт}}}{\Delta W_{\text{полн}}} \end{array} \right), \quad (1.8)$$

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.

Условие для определения комплекса конструктивных параметров рабочего органа и режимных параметров эксплуатации катка, задающих энергоэффективный режим уплотнения имеет вид

$$\left( \begin{array}{l} k_y \rightarrow 1 \\ \frac{k_y}{\Delta W_{\text{пласт}}} \rightarrow \max \\ \frac{\Delta W_{\text{пласт}}}{\Delta W_{\text{полн}}} \rightarrow \max \end{array} \right). \quad (1.9)$$

Компоненты вектора – функционалы упорядочены в порядке приоритета с точки зрения влияния на эффективность уплотнения. Выполнение первого условия реализует требование необходимости достижения нормативной плотности, отвечающей коэффициенту уплотнения  $k_y = 1$ .

Второе условие обеспечивает энергоэффективность работы катка, гарантируя максимальность приращения коэффициента уплотнения на единицу энергии, затраченной машиной на неупругое деформирование материала.

Третьим условием выступает требование минимизации энергоемкости уплотнения при работе катка, обеспечивая максимум доли энергии, затрачиваемой на пластическое деформирование слоя.

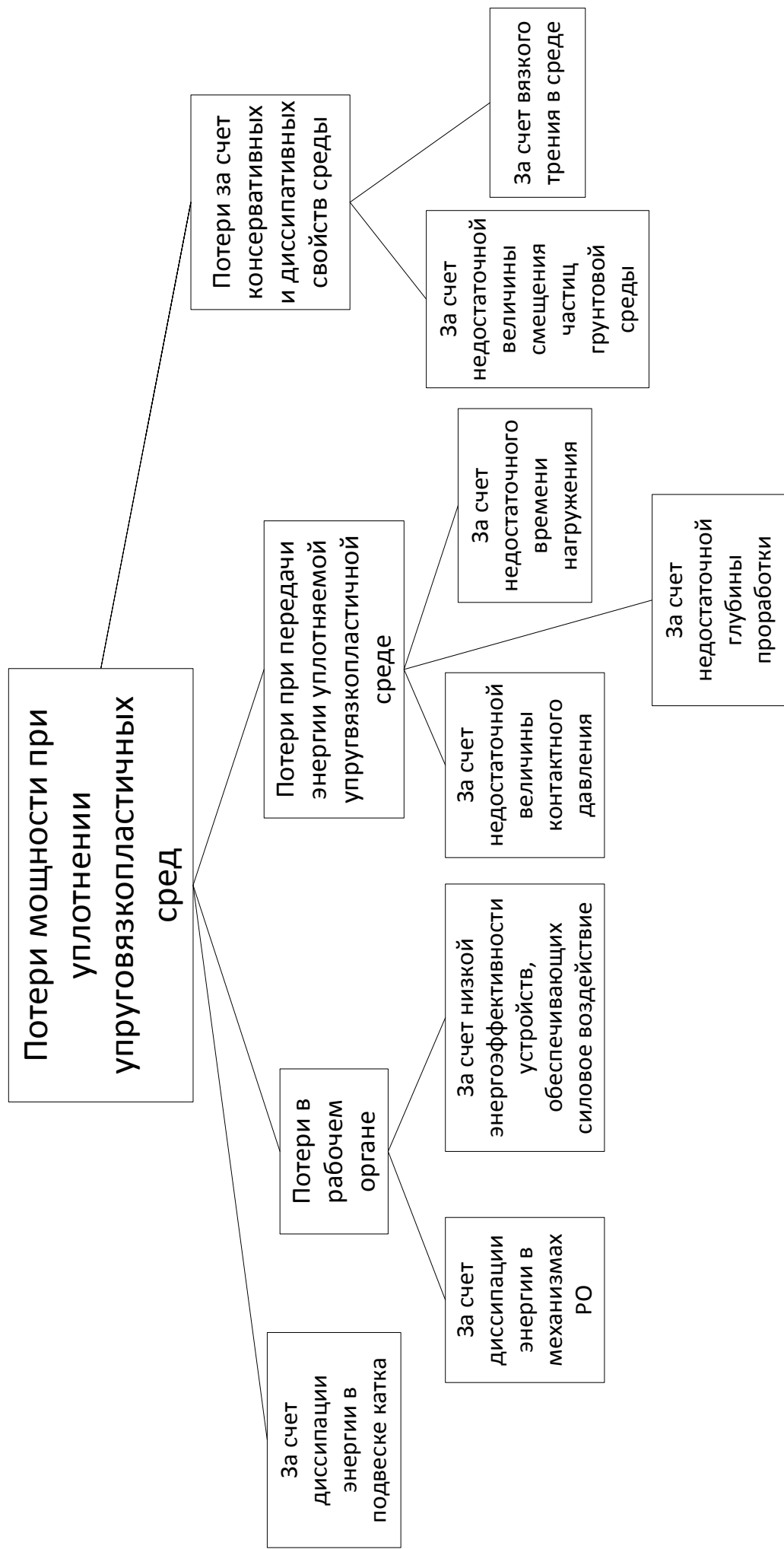


Рисунок 1.10 – Источники потерь мощности при уплотнении упруговязкопластичных сред грунтовыми насыпями оснований дорог дорожными катками [104].

Таблица 1.3 – Перспективные технические способы повышения энергоэффективности работы катков при уплотнении грунтовых сред

	За счет диссипации энергии в подвеске катка	За счет диссипации энергии в РО	За счет энергоэффективности устройств, обеспечивающих силовое воздействие	За счет низкой энергоэффективности контактного давления	За счет нерациональной глубины проработки	За счет недостаточного времени нагружения	За счет недостаточной величины смещения частиц грунтовой среды	За счет вязкого трения в среде
Регулирование диссипативных свойств РО	-	+	-	-	-	-	-	-
Применение повышающих устройств, эффективность использования силы, генерируемой источником периодического воздействия	-	-	+	-	-	+	-	-
Использование конструкций РО, позволяющих регулировать контактное давление	-	-	-	+	+	+	-	-
Использование режимов воздействия, вовлекающих достаточный объем грунтового слоя в состоянии пластического деформирования	-	-	-	-	+	-	-	-
Управление скоростным режимом согласованно с частотой приложения силы, ведущее к увеличению времени пластического деформирования	-	-	-	-	+	+	-	-
Использование резонансных характеристик активной области слоя среды	-	-	-	-	+	-	+	+

### 1.5. Обзор методик повышения энергоэффективности работы катков при уплотнении грунтовых сред.

Задачи повышения энергоэффективности уплотнения грунтовых сред дорожными катками на динамических режимах требуют расширения спектра параметров, регулирующих тип и зависимость вынуждающей силы, обеспечивающей требуемые для уплотнения значения контактного давления [108].

В случае уплотнения грунтовых сред дорожными катками примененный подход, однако, ограниченно применим в силу особенностей материала, характеристик рабочих органов и режимов воздействия, но в целом не теряет своей актуальности. Существенный вклад в разработку теоретических основ эффективного уплотнения грунтовых сред, разработки инновационных методик уплотнения и конструкций рабочих органов был внесен учеными СибАДИ, МАДИ и др. Среди работ специалистов кафедры ЭСМиК необходимо упомянуть серию работ профессора В.Б.Пермякова, установившего условие эффективного уплотнения по контактному давлению рабочего органа катка и сформулировавшему принцип учета релаксационных характеристик среды при выборе частотных параметров периодических режимов воздействия. В работах С.В. Савельева был обоснован подход рационального адаптирования силового воздействия по контактному давлению регулированием жесткости деформируемого рабочего органа катка. Работы А.В. Захаренко содержат подробную классификацию средств и методов, в том числе и оригинальных, позволяющих обеспечить рациональные режимы воздействия на широкий спектр уплотняемых сред – от асфальтобетонов до скальных грунтов.

Разработка теоретических основ энергоэффективного уплотнения дорожно-строительных материалов базируется на условии минимизации энергоемкости работ по неупругому деформированию среды. Этот подход был, в частности, использован в работах С.Н. Иванченко, сформулировавшего условия для выбора

сложного комбинированного режима динамического деформирования асфальтобетонов при уплотнении РО катков [66], порождающего максимальную величину остаточной деформации при минимуме затраченной на деформирование мощности.

На основе развитых механического и термодинамического подхода к деформированию асфальтобетонов были обоснованы критерии выбора режимных параметров воздействия комбинированных рабочих органов асфальтоукладчиков [67], обеспечивающих понижение энергоемкости процесса уплотнения асфальтобетонных смесей. В качестве примера технической реализации этого подхода можно привести устройство рабочего органа асфальтоукладчика [66].

Основным типом устройств, обеспечивающим периодическое динамическое возмущение грунтовой среды при уплотнении дорожными катками, являются вибровозбудители различной природы. Вибрация, как частный случай результата циклического динамического воздействия эффективно используется при работе уплотняющих дорожных машин. При этом решается задача передачи механической энергии от источника колебаний к объекту воздействия наиболее эффективным образом для качественного изменения его структуры при уплотнении [108]. Основным способом возбуждения механических колебаний является вращательное движение несбалансированных систем вокруг осей, не совпадающих с их центрами масс. На оси вращения массы  $m$  с частотой  $\omega$  на расстоянии  $R$  от оси возникает центробежная сила инерции по модулю равная

$$F_{in} = mR\omega^2,$$

которую можно трактовать, как реализацию теоремы Гюйгенса-Штейнера для точечной массы [108].

При этом проекция силы на вертикальную ось является периодической и может быть легко определена как

$$F_{in} = mR\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Известны различные типы несбалансированных систем, применяемых в состав РО катков, среди которых наиболее широкое распространение получили

дебалансные вибровозбудители. Их преимуществами являются простота конструкции и высокие прочностные характеристики, позволяющие генерировать периодическое силовое воздействие значительной величины. Для вибрационных катков дебалансный вибровозбудитель является конструктивным элементом вибровальца [108].

Особое место среди конструкций генераторов периодической силы занимают вибровозбудители планетарного типа, как позволяющие получать более сложные виды зависимости силы воздействия от времени, чем чисто гармонический. Как правило, в планетарных вибровозбудителях используется массивный бегунок, перемещающийся по обечайке формой отличающейся от круговой [57, 58, 63]. Это позволяет получить более широкий спектр типов периодического воздействия, однако их практическое использование требует решения ряда прикладных задач. В этой связи следует упомянуть работы П.С. Кузнецова, выполненные в СибАДИ. Основной задачей является передача динамического воздействия на ось вибровозбудителя и обеспечение непрерывного движения бегунка по обечайке без ударов и проскальзывания. Эти недостатки устраняются конструкциями планетарных возбудителей, в которых движение бегунка согласуется с параметрами обечайки с помощью жесткой кинематической связи [108].

Из известных технических решений, реализующих этот принцип, иллюстративным является устройство для его осуществления способа получения направленных механических колебаний по патенту РФ № 2381078 [65], содержащее корпус с коронной шестерней (опорным центральным колесом внутреннего зацепления), водило и сателлит с закрепленным на нем инерционным элементом, а также находящиеся во взаимном контакте ролики и беговые дорожки, диаметры которых равны диаметрам делительных окружностей, соответственно соединенных с ними, сателлита и коронной шестерни [108].

Недостатками указанного устройства являются невозможность регулирования величины возбуждаемой силы иными способами, кроме изменения



частоты вращательного движения бегунка и изменения положения центра масс инерционного элемента, а также невозможность получить более сложные виды зависимости силы от времени, чем семейств гипоциклоид, указанное в его описании. Кроме этого, использование в его конструкции зубчатых передач требует высокой точности изготовления и повышает требования к используемым материалам и выбору режимов работы. Следует отметить, что возбуждаемая сила устройства в описании к изобретению [65] вычисляется без учета влияния вращения эксцентрической массы водила, в силу чего реальный ее вид отличается от заявленного [108].

Результаты исследований взаимодействия рабочего органа уплотнителя с грунтовой средой показывают, что учет характеристик развития в среде напряженно-деформированного состояния с неперемещением должен приниматься во внимание при разработке перспективных устройств, реализующих динамическое воздействие на грунт. Это в первую очередь связано с процессами восстановления деформированной среды ввиду наличия свойств пластичности и различием модулей деформации при нагружении и разгрузке. Рассмотрение указанных свойств при конструировании рабочих органов уплотняющих дорожных машин позволяет добиться повышения эффективности процесса уплотнения как с точки зрения затрачиваемой мощности, так и качества. Простым примером того, как это может быть реализовано на практике, могут выступать попытки сконструировать генератор направленного динамического воздействия, позволяющий максимально эффективно проводить поверхностное уплотнение грунтового слоя [190]. Кроме этого, как будет показано ниже, возможно осуществление на поверхность грунта динамического воздействия, при котором разгрузка не сопряжена с изменением знака действующей на поверхность грунта силы. Это приводит к исключению энергозатрат на осуществление части периода действия силы, при котором уплотняющего воздействия на грунт не происходит, чем повышается интенсивность процесса уплотнения.

Устройства для генерирования периодических динамических воздействий

различного рода находят широкое применение во многих областях техники. Основной целью их использования является передача энергии колебательного движения (вибрации) различным объектам. Они различаются по принципу действия, величине амплитуды генерируемой силы, виду зависимости силы от времени, характеру связи с объектом, подвергаемым вибрационному динамическому воздействию и т.д. Такого рода генераторы (вибровозбудители) широко используются на производстве, в строительстве и могут решать технологические задачи самого широкого спектра [106].

Одним из основных принципов возбуждения механических колебаний является использование инерционных сил, возникающих при вращательном движении несбалансированных систем твердых тел (дебалансов) вокруг осей, не совпадающих с их центрами масс [41]. Преимуществом таких систем является простота технической реализации, а недостатком низкий коэффициент полезного действия и недостаточно направленный характер воздействия на объект, которому передается энергия вибровозбудителя. Предпринимаются попытки устранить эти недостатки, например, путем одновременного включения двух или большего числа одинаковых или различных вибровозбудителей, вращательные движения дебалансов которых сдвинуты друг относительно друга по фазе для обеспечения повышенной направленности [41]. Также следует упомянуть конструкции вибровозбудителей планетарного типа, как с вращающимися бегунками-сателлитами, так и со скользящими вдоль обечаек [106].. Они позволяют добиться более сложных зависимостей силы воздействия от времени и повысить ее направленность, но более сложны в изготовлении и имеют более узкий спектр областей применения [58, 63]. Отчасти указанных недостатков лишены вибровозбудители кривошипно-шатунного типа действия, применяемые, например, в виброплитах, виброситах и вибротрабовках [133]. У них отсутствует необходимость вращать массивные дебалансы и тем самым они могут обеспечить высокую направленность действия. Тем не менее, указанные конструкции не являются идеальными по нескольким причинам:

- 1) Высокие значения механических напряжений, возникающие при работе в элементах конструкции кривошипно-шатунного механизма и, как следствие, повышенные требования к их прочностным характеристикам [106];
- 2) В случае отсутствия жесткой связи между источником вибрационного воздействия и объектом возможен переход к ударному типу воздействия, часто неприемлемому.

Это заставляет развивать иные конструкции вибровозбудителей, позволяющие генерировать периодическое динамическое воздействие высокой степени направленности для использования в различных отраслях техники. Среди перспективных конструкций возбудителей механических колебаний необходимо упомянуть электромеханические устройства, например, описанную в [206] электрогидравлическую систему, позволяющую получать сложные двумерные колебания. Также неослабевающий интерес исследователей вызывают различные динамические колебательные системы, в состав которых входят вибровозбудители, исследуемые, как правило, в рамках численного моделирования и компьютерной симуляции [106]. Силы инерции, возникающие в таких системах, играют как положительную роль [209], так и носят паразитный характер и требуют компенсации, особенно в случае высоких и сверхвысоких частот работы механической колебательной системы [163].

Согласно проведенному аналитическому исследованию причин потерь мощности уплотняющей дорожной машины и способов повышения энергоэффективности уплотнения слоев грунтовых сред дорожными катками, реализующими динамические режимы силового воздействия, значительная ее часть теряется при преобразовании энергии в процессе генерировании периодической силы.

Известны конструктивные технические решения, целью которых декларируется повышение энергоэффективности уплотнения грунтовых сред путем корректировки характера динамического воздействия или конфигурации рабочих органов и характера их эксплуатации. В качестве примера можно

привести самоходный вибрационный каток по патенту РФ 2079610 [39], состоящий из привода, сочлененной рамы, вальцов и вибровозбудителя комбинированного действия. Его особенностью выступает специальным образом организованный вибровозбудитель, скомбинированный из нескольких дебалансных валов.

К его недостаткам можно отнести сложность механической конструкции вибровозбудителя, обусловленная наличием дополнительных движущихся агрегатов, требующих высокой точности изготовления. Также следует отметить необходимость дополнительных затрат энергии для реализации режима работы вибровозбудителя и потери мощности на движение вибровальца вверх, которые не компенсируются конструкции [89].

Из известных технических решений показательным является дорожный каток по патенту SU 1401097, состоящий из рамы, двигателя и двух рабочих органов, состоящих из пары разнородных вальцов, один из которых пневмошинный, а другой гладкий – вибрационный или статический. Пара вальцов каждого рабочего органа установлена на балансирной тележке, оснащенной гидроцилиндрами, позволяющими произвольно подвешивать один из вальцов, оставляя второй в контакте с уплотняемой средой (одновременный контакт с уплотняемой средой обоих вальцов рабочего органа также возможен). Такая конструкция позволяет реализовать конечный ряд режимов уплотнения, большинство из которых являются статическими или близкими к статическим.

Недостатком прототипа являются существенные потери мощности при работе вибровальца на всех режимах из приведенных в описании. На режимах, которые характеризуются контактом вибровальца с уплотняемым грунтом, потери вызваны тем, что полезная работа – по уплотнению грунта – совершается вибровальцом лишь на меньшей части периода его колебательного движения. На режиме, который характеризуется отсутствием контакта вибровальца с уплотняемым грунтом, потери вызваны тем, вибровалец совершает свободные колебания, практически вся энергия которых передается раме. Все потери энергии

связаны с ключевым для прототипа использованием гидроцилиндров, действием которых выбирается режим работы катка, жестко связывающих балансирную тележку с рамой катка, и препятствующих передаче колебаний от вибровальца к пневмошинному валцу, закрепленному на другом конце тележки.

Идея, сформулированная в предыдущем патенте, легла в основу ряда семейств конструкций и методик, предназначенных для уплотнения грунтовых сред и асфальтобетонных смесей, запатентованных А.А.Шестопаловым, Э.И. Деникиным, С.А. Тарантиным и др. В качестве устройства, максимально использующего преимущества комбинированного катка можно рассматривать каток по патенту на полезную модель 169573 [160], фрагмент которого приведен на Рис.1.11 с комментариями, поясняющими его работу.

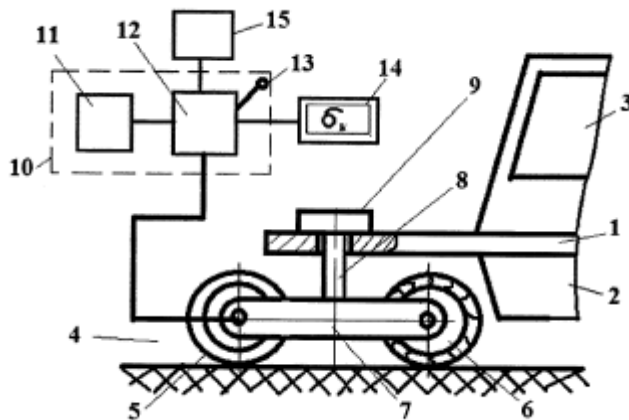


Рисунок 1.11 - Самоходный дорожный каток (фрагмент)

1- несущая рама; 2 – ДВС; 3- кабина оператора; 4- пара уплотнительных модулей, содержащих рабочие органы; 5- пневматический цилиндрический валец; 6 - гладкий цилиндрический валец; 7- балки; 8 – вертикальная стойка; 9 – поворотный механизм; 10 - регулируемый источник сжатого воздуха; 11 - блок, содержащий компрессор и ресивер; 12 – регулятор давления; 13 - рукояткой для ручного регулирования давления; 14 – монитор; 15 – ЭВМ.

Самоходный каток с парой рабочих органов комбинированного типа и системой регулирования контактных давлений пневматических вальцов, используемый для энергоэффективного уплотнения асфальтобетонной смеси по патенту [139] изображен на Рис.1.12

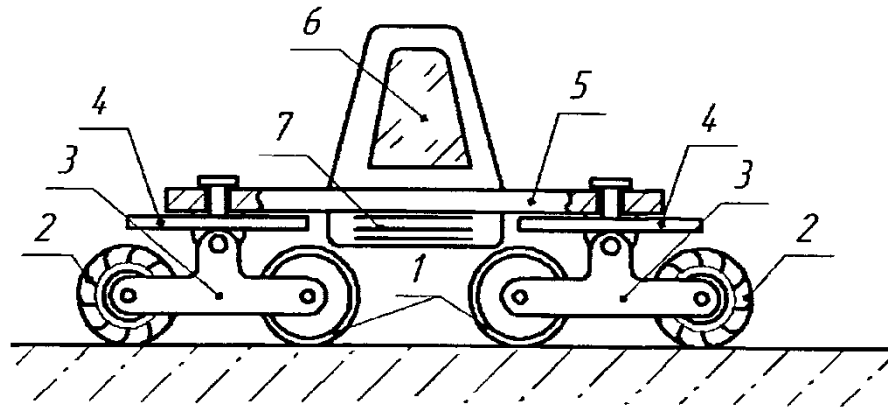


Рисунок 1.12. – Дорожный каток для уплотнения асфальтобетонной смеси по патенту РФ 2012120598

1- гладкие металлические рабочие вальцы; 2 - пневмошинными вальцы; 3- балансирные тележки; 4 - платформы; 5- рама; 6 – кабина; 7 – двигатель.

Повышение эффективности уплотнение заданным методом достигается использованием возможности произвольной ориентации балансирных тележек с рабочими органами на поверхности материала с изменением ее от неперекрывающейся до тандемной. Этим реализуется принудительное адаптирование воздействия по контактному давлению. Однако применение вибрационного воздействия делает неизбежными потери мощности в генераторе периодического воздействия на доле периода, в который возмущающая сила не оказывает давление на грунт.

## 1.6 Выводы по главе 1.

В главе выполнен анализ существующих методов уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве путем приложения поверхностного силового воздействия со стороны рабочих органов катков с дальнейшим развитием в толще слоя напряженно деформированного состояния, приводящего к накоплению слоев необратимых деформаций, влекущем изменение его физико-механических характеристик.

Все режимы уплотняющего воздействия, реализуемого при работе дорожных катков для уплотнения слоев грунтовых сред, можно разделить на

статические и динамические.

Наиболее широко используемым типом катков являются в настоящее время гладковальцовые статические катки, характеризующиеся простотой конструкции, но недостаточной производительностью, особенно значимой в условиях повышения интенсивности инфраструктурного строительства. Единственным способом адаптирования статического действия таких катков по контактным давлениям 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 вибрация, наряду с повышенной производительностью демонстрируют и значительно более высокие возможности адаптации как по скоростным и силовым, так и по частотным параметрам. Адаптация по контактным давлениям является для вибрационных катков несущественной, однако 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, реализованной активной областью грунтового слоя, 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. Наряду с этим, выбор рациональных параметров дорожных катков и в том числе и параметров адаптации, обеспечивающих повышение производительности, обеспечивается исходя из динамических критериев, задаваемых требуемыми значениями контактного давления. Такой подход косвенным образом учитывает особенности изменения комплекса деформативных, характеристик материала грунтовых сред при уплотнении.

**Идея работы:** осуществлять подбор рациональных параметров катков, режимов динамического воздействия и конструкций средств их реализующих таким образом, чтобы наряду с выполнением неперемного условия на требуемые контактные давления при работе катков соблюдались условия, энергопередачи, обеспечивающей наиболее интенсивное накопление грунтом остаточных деформаций.

Ключевым свойством энергетического подхода, используемого при решении поставленных в работе задач, является универсальность. Рассмотрение



работы катков при уплотнении грунтовых сред с точки зрения эффективности энергопередачи позволяет объединить критерии качества процесса уплотнения для различных типов катков, используемых для проработки слоев сред, отличающихся как толщиной, так и физико-механическими характеристиками. Единый теоретический подход, предполагающий энергоэффективность ключевым качеством уплотнения грунтовых сред дорожными катками, при этом необходим для рассмотрения, как деформирования среды, так и движения рабочего органа, в первую очередь, при осуществлении динамических режимов уплотнения.

Тем самым задача выявления особенностей и характеристик энергоэффективной работы катков для уплотнения грунтовых сред является проблемой унификации подхода к рассмотрению движения уплотняемой грунтовой среды, находящейся в напряженно-деформируемом состоянии и движения рабочего органа уплотнителя, обменивающегося с ним энергией.

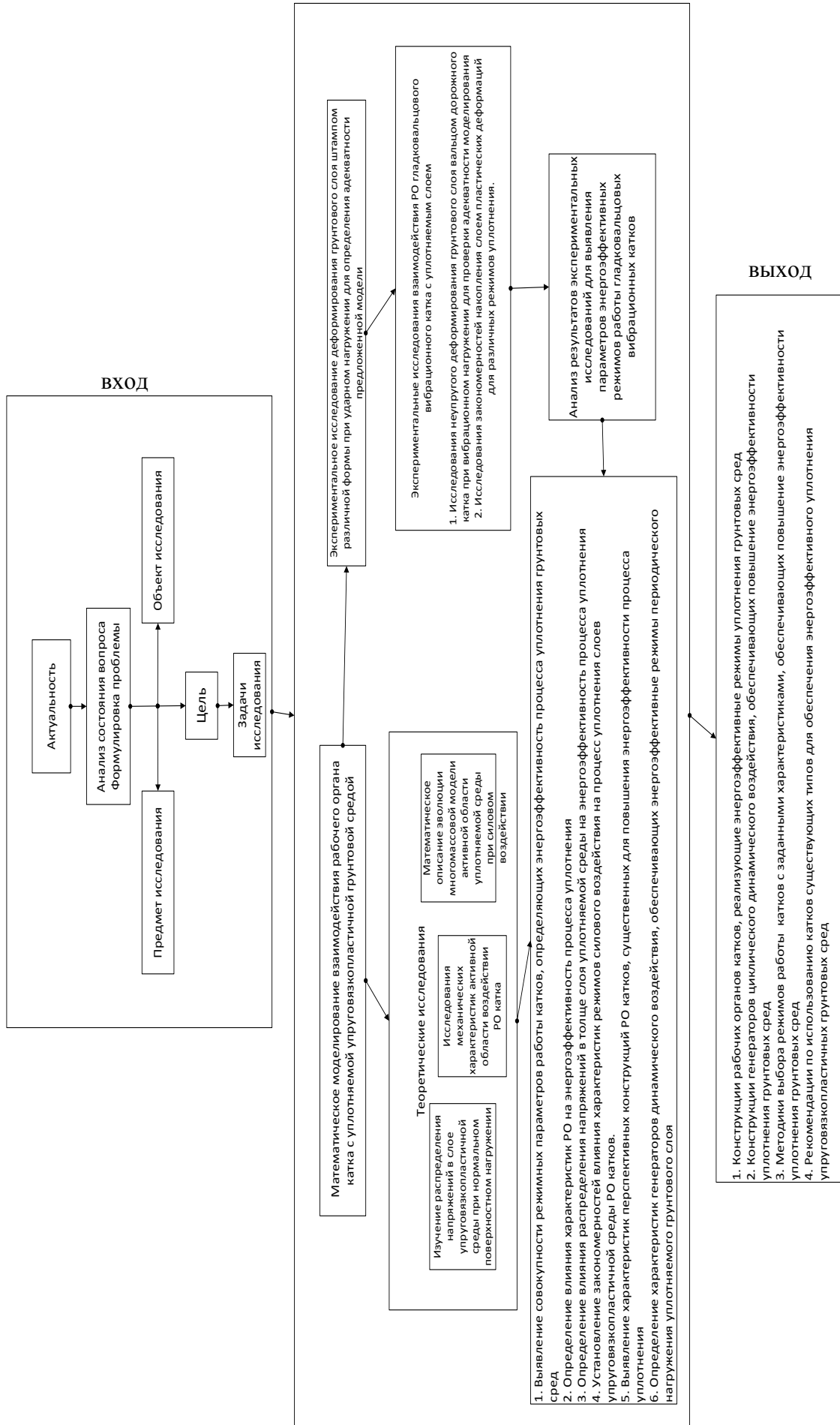


Рисунок 1.13 – Структура работы

## ГЛАВА 2. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ГРУНТОВЫХ СРЕД ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РАБОЧИМ ОРГАНОМ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПЛОТНЕНИЯ

Изучение вопросов интенсификации и повышения энергоэффективности работы дорожных катков при уплотнении грунтовых сред является ключевой задачей настоящей работы. Однако, решение этой задачи не представляется возможным без принятия во внимание особенностей взаимодействия рабочего органа уплотнителя с уплотняемым материалом, что требует рассмотрения теоретических основ физических процессов, происходящих в грунтовых средах при поверхностном силовом воздействии и развития в них напряженно-деформированного состояния (НДС).

Выбор оптимальных характеристик уплотняющей машины, параметров рабочего органа и динамического воздействия находится в неразрывной и тесной связи с характеристиками уплотняемого материала. Комплексность этой задачи заключается в широком спектре значений величин, определяющих деформационные свойства, как для различных типов грунтов, так для грунта одного типа в зависимости от состояния, которое было достигнуто при работе уплотняющей машины. В этой связи особый интерес вызывает разработка и внедрение адаптивных технологий уплотнения и средств их реализующих, чтобы внешнее силовое воздействие по своим характеристикам соответствовало текущему состоянию грунтового слоя и обеспечивало наиболее интенсивный характер уплотнения.

Этим объясняется неубывающий интерес исследователей к данной теме и обилие важных результатов, полученных при обращении к различным аспектам задач физики деформируемых грунтовых сред отечественных и зарубежных учеными, среди которых нужно упомянуть В.Ф. Бабкова, О.Т. Батракова, Д.Д. Баркана, И.И. Блехмана, А.А. Борщевского, И.И. Быховского, С. А. Варганова, Г. Ю. Джанилидзе, А. Е. Дубровина, С.В. Жирковича, А.В.Захаренко, Н.Н. Иванова,

А. С. Ильина, Я. А. Калужского, Н.И. Наумца, М.П. Костельова, Г.В. Кустарева, В. Б. Пермякова, Г.Н. Попова, С.В.Савельева, Н. Я. Хархуты, W. V. Ping, P. E. Guiyan Xing, Michael Leonard, Zenghai Yang, K. Rainer Massarsch, Michael A. Mooney, Robert V. Rinehart, H.B. Seed, C.K.Chan, H.J. Schmertmann, Paul van Susante и др. [8, 22, 23, 31, 33, 60, 76-78, 117, 127-129, 151, 155, 156, 185,186,191, 196, 210-212].

## 2.1 Физико-механические характеристики грунтовых сред, влияющие на интенсивность работы дорожных катков

### 2.1.1 Особенности протекания деформационных процессов в грунтовых средах при уплотнении катками

Целью уплотнения грунтовых сред дорожными катками является повышение прочностных свойств грунтовых слоев, лежащих в основании инженерных сооружений. Особенно важное значение качественное уплотнение грунтов играет роль в дорожном строительстве. Повышающиеся требования стандартов, предъявляемые к характеристикам оснований дорог, имеют очевидное объяснение рядом факторов. Во-первых, это увеличивающиеся с ростом интенсивности перевозок эксплуатационные нагрузки, испытываемые полотном дороги и приводящие к развитию высоких механических напряжений в материалах дорожных одежд и оснований. Эти нагрузки, возрастая как по величине, так и по времени воздействия, будут приводить к разрушению полотна дороги даже при качественном проведении работ по укладке дорогостоящих верхних слоев полотна дороги в том случае, если они не будут скомпенсированы и перераспределены при взаимодействии верхних слоев полотна дороги и уплотненных грунтов ее основания. В случае некачественного уплотнения грунтов основания дорожными катками устойчивость полотна дороги к внешним эксплуатационным нагрузкам падает драматическим образом. Во-вторых, на

большой части территории Российской Федерации, в силу климатических условий, все материалы, используемые в дорожном строительстве, подвергаются воздействию низких температур, что может приводить к нарушению целостности, в первую очередь, поверхностных слоев дорожных одежд. Отметим, что при этом эксплуатационные свойства дорог резко снижаются и высокое качество работы катков при уплотнении грунтов оснований в этой ситуации способно продлить срок эксплуатации дороги до проведения необходимого ремонта, а также увеличить межремонтный период эксплуатации отремонтированной дороги. Это объясняется тем, что повышенные прочностные характеристики качественно уплотненных грунтовых слоев земляного полотна уменьшают вероятность деформации дорожных одежд, способных привести к разрушению вследствие воздействия температурных факторов.

Работа дорожных катков при уплотнении грунтовых слоев земляного полотна, выполняет основную функцию – перевод грунтовой среды внешним силовым воздействием в такое состояние, что величины, определяющие физико-механические характеристики среды, принимают необходимые для достижения требуемых прочностных свойств значения.

Основной величиной, характеризующей состояние грунтовой среды при работе катков, является коэффициент уплотнения. Он может быть использован как независимая переменная при описании изменения характеристик грунтовой среды в процессе уплотнения. Определяющим фактором для этого выступает то, что коэффициент уплотнения, будучи безразмерной величиной, не зависит от геометрических параметров слоя грунтовой среды и ее конкретного типа. Напротив, параметры грунтовой среды, могут быть в процессе ее взаимодействия с РО катков заданы как функции коэффициента уплотнения. Некоторые из этих функциональных соотношений легко определяются аналитически, как, например, для текущей плотности и величины накопленной пластической деформации, для других же величин могут быть найдены только экспериментально и вид их зависимостей от коэффициента уплотнения определяется аппроксимацией.

Описание динамических процессов, происходящих в среде при работе катков, с точки зрения коэффициента уплотнения, затруднено. Проблематично осуществлять контроль процесса уплотнения в реальном времени, используя коэффициент уплотнения в качестве основного переменного показателя.

Уплотнение меняет весь спектр физико-механических характеристик слоя грунтовой среды. К ним относятся как геометрические и массовые – толщина и плотность, так и величины, определяющие особенности развития в толще грунта НДС при внешнем поверхностном силовом воздействии. Динамический характер взаимодействия катка со средой при ее уплотнении требует максимального точного учета эволюции указанных показателей в силу существенно нелинейных зависимостей характеристик среды от накопленной пластической деформации при работе катка.

Существенно меняется при уплотнении грунтовых сред их текущая плотность  $\rho(t)$ , определенная в момент времени  $t$ , непосредственно связанная с коэффициентом уплотнения  $k_y$  соотношением

$$\rho(t) = k_y(t) \rho_{ном}. \quad (2.1)$$

Суммарная пластическая деформация  $\Delta x_{plastic}^{total}(t)$ , накопленная грунтовым слоем к моменту времени  $t$  в результате уплотняющего воздействия показывает, насколько изменилась толщина грунтового слоя  $h(t)$  из начального состояния  $h_0$

$$h(t) = h_0 - \Delta x_{plastic}^{total}(t). \quad (2.2)$$

Величины  $\Delta x_{plastic}^{total}(t)$  и  $h(t)$  могут быть связаны с коэффициентом уплотнения (усредненным по толщине слоя), достигнутым при работе катка простыми соотношениями при том условии, что слой грунта деформируется только в направлении, нормальном к его поверхности за счет осевого сжатия

$$h(t) = \frac{h_0 \rho(t)}{\rho_{ном}}, \quad (2.3)$$

$$\Delta x_{plastic}^{total}(t) = h_0 \left(1 - \frac{\rho(t)}{\rho_{ном}}\right). \quad (2.4)$$

Следует отметить, что величина полной пластической деформации, накопленной грунтовым слоем в ходе уплотнения дорожным катком, может быть определена достаточно легко непосредственно и, как следствие может служить «кинематической» переменной, определяющей характер протекания процесса уплотнения в реальном времени.

При работе катков по уплотнению грунтов, как правило, реализуется циклическим динамическое воздействие, в том числе вибрационное или трамбующее, при котором поверхность грунта смещается сложным образом, с достаточно высокой скоростью. Использование текущей толщины грунтового слоя при описании процесса уплотнения как поверхностного деформирования также является затруднительным. Однако, эта проблема может быть решена соглашением считать текущей толщиной  $h(t)$ , определяемой выше формулами (2.2) и (2.3), толщину слоя грунта после снятия внешней нагрузки, действовавшей в момент времени  $t$  с учетом релаксации механических напряжений [101].

Особенности напряженно-деформированного состояния в толще грунта, развивающегося при взаимодействии с РО катка с ним, могут быть определены исходя из информации о характеристиках отклика грунтовой среды на силовое воздействие. Величинами, определяющими интенсивность отклика грунта на внешнее воздействие, являются модуль деформации, модуль упругости (модуль Юнга) и коэффициент вязкости. Они входят в определяющие соотношения между относительной деформацией, механическим напряжением в точке грунтовой среды, а также скоростью относительной деформации. Тип отклика задается выбором реологической модели, наиболее адекватно соответствующей текущим характеристикам грунтовой среды и особенностям уплотняющего воздействия.

Взаимодействие РО катка со средой приводит к накоплению в ней пластических деформаций, влекущее изменение модуля деформации, упругости и вязких свойств, а также и предельных величин, характеризующих поведение грунта при одноосном сжатии. Динамика процесса деформирования грунта традиционно описывается кривой «напряжение – деформация», которая имеет

особенности, существенно отличающую ее от аналогичных кривых для твердых тел, в частности металлов.

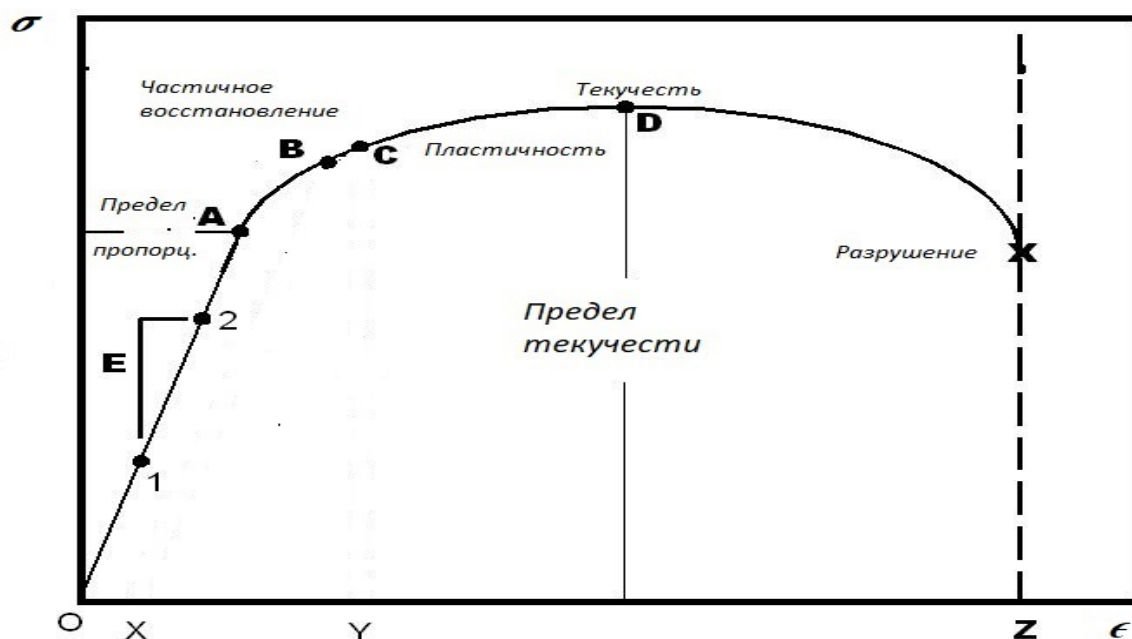


Рисунок 2.1 – Кривая зависимости «напряжение - деформация» для грунтовой среды

Возрастание плотности грунта при поверхностном силовом воздействии приводит к изменению предельных значений напряжений и к изменению вида самой кривой. Это объясняет тот факт, что при сохранении эксплуатационных параметров катка, которым требуемая плотность не может быть достигнута, после набора грунтовым слоем соответствующей прочности, дальнейшее уплотнение становится невозможным и для уплотнения до номинальных значений необходимо изменять характер поверхностного силового воздействия (либо использовать другую уплотняющую технику). Такое поведение грунтовых сред при уплотнении учитывается соответствующими нормативными документами [137].

Из параметров грунтовой среды, существенных для описания взаимодействия с ней РО катка, наиболее важными являются значения напряжений, характерные для описания деформативных свойств среды:

- 1) Точке A отвечает  $\sigma_{np}$  - предел пропорциональности до достижения которого



связь между напряжением и деформацией линейна и выполняется закон Гука, однако при разгрузке возможны остаточные неупругие деформации.

- 2) Точка В, находящаяся в области между точками А и С отвечает состоянию частично неупругого деформирования. Связь между напряжением и деформацией нелинейная.
- 3) Точке С отвечает -  $\sigma_{пл}$  предел пластичности, после которого деформирование происходит абсолютно неупруго, связь напряжения и деформации перестает быть линейной;
- 4) Точке D отвечает –  $\sigma_m$  предел текучести и материал среды деформируется без оказания дальнейшего сопротивления;
- 5) Предел прочности  $\sigma_{разр}$ , характеризует напряжение, при котором структура среды разрушается.

Важным фактором для сжимаемой грунтовой среды является то, что кривая разгрузки не совпадает с кривой нагружения при сжатии, тем более, отсутствует участок кривой, соответствующий растяжению, как например у металлов, что практически полностью исключает гистерезис. На рисунке 2.2 изображена кривая «напряжение – деформация» с участками, соответствующими различным случаям разгрузки грунтового слоя после приведения его в НДС.

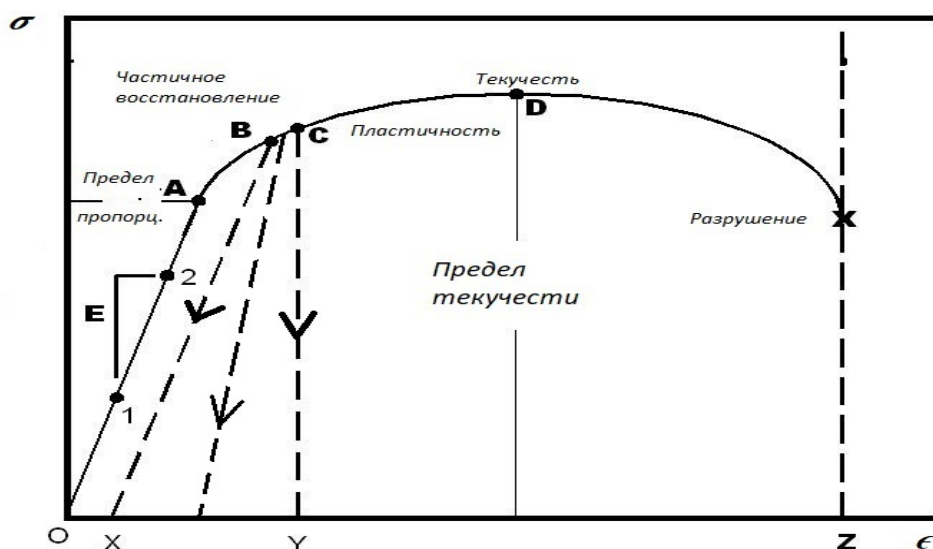


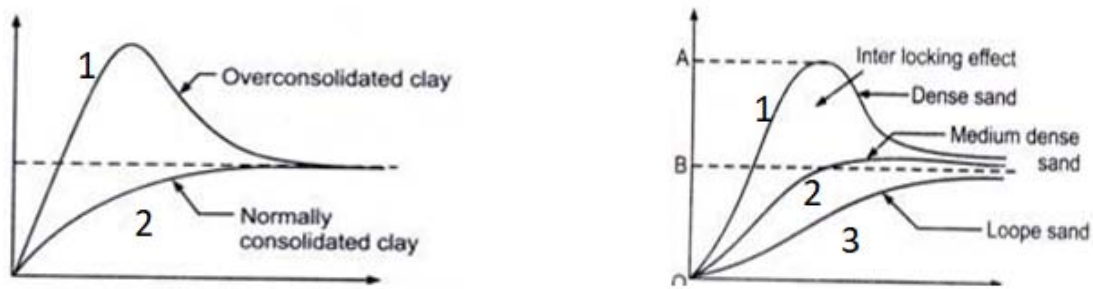
Рисунок 2.2 – Кривая «напряжение - деформация» для грунтовой среды (пунктирные линии соответствуют разгрузке)

Каждый участок кривой «напряжение – деформация» отвечает определенному типу поведения грунтовой среды, находящейся в напряженно-деформированном состоянии, соответствующему точке на кривой. В этом состоянии грунтовый слой может претерпевать пластические деформации, что приводит к уплотнению, однако конкретный вид временной зависимости накопления пластических деформаций при разгрузке грунтового слоя определяется режимом нагружения и точке на участке кривой «напряжение – деформация», в которую взаимодействие с РО катка перевело грунтовую среду. Другой тип напряженно-деформированного состояния реализуется при повышении прочностных характеристик грунтовой среды, когда дальнейшее приложение прежней поверхностной силы со стороны катка приводит к незначительным деформациям и такие деформации могут считаться упругими и не приводят к изменению плотности (начальный участок кривой). В таком случае напряжение, соответствующее точке 1, можно назвать пределом упругости  $\sigma_{упр}$ . Если напряжения, вызванные взаимодействием с РО катка, в среде достигают значений, превосходящих предел прочности грунта, отвечающий существующему значению плотности, то грунт разупрочняется при работе катка и в конечном итоге может произойти разрушение структуры грунта при практически постоянном значении достигнутого механического напряжения (или даже при его снижении) в результате возникновения деформаций, не позволяющих межчастичным силам связи восстановить структуру среды.

### 2.1.2 Анализ влияния структурных характеристик грунтовой среды на интенсивность работы дорожных катков для ее уплотнения

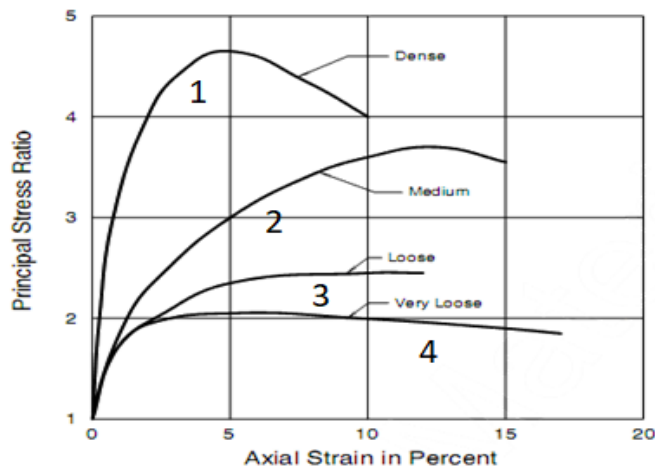
Повышение прочностных характеристик грунтового слоя отражается на виде кривой «напряжение-деформация», так что при рассмотрении особенностей протекания работы катков для его уплотнения необходимо учитывать изменение характера отклика среды на внешнее силовое воздействие и характера развития в

ней напряженно деформированного состояния. На Рис. 2.3 представлена примерная эволюция кривой «напряжение-деформация» при уплотнении дорожными катками для песчаных и глинистых грунтовых сред в зависимости плотности. Общая тенденция, выявленная в многочисленных исследованиях, проявляется как в количественном возрастании величины силы сопротивления грунтовой среды деформированию, обеспечиваемому работой катка, так и изменению вида зависимости деформации от напряжения.



а)

б)



в)

Рисунок 2.3 – Эволюция кривой «напряжение - деформация» для грунтовой среды при уплотнении а) для глины (1 – переуплотненная, 2 – уплотненная до нормативных значений), б) для песка (1 – сильно уплотненный, 2 – уплотненный, 3 – рыхлый, АВ – область эффекта возникновения межчастичных связей), в) связь «напряжение при осевом сжатии – относительное смещение в %» для песка согласно экспериментальным результатам (1 – сильно уплотненный, 2 – уплотненный, 3 – рыхлый, 4 – очень рыхлый),

L.Bjerrum [165]

Видно, что на начальных этапах уплотнения зависимость «напряжение-относительная деформация» более эффективно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, а при возрастании плотности зависимость становится близкой к параболической.

Эти факты могут быть учтены при анализе влияния свойств грунтовой среды на особенности ее отклика на силовое воздействия при работе катка. К основным факторам, которые принимаются во внимания исследователями, относятся гранулометрический состав грунтовой среды, ее минералогический состав и содержание жидкости. В свою очередь эти физические факторы определяют механические характеристики среды, регистрируемые исследователями как упругие, вязкие и прочие составляющие сил сопротивления грунта деформированию при уплотняющем воздействии со стороны РО катка.

Свойства грунтовых сред неразрывно связаны с их структурой и текстурой. **Структурой** называются особенности внутреннего строения грунтовых сред с известными размерами и формой частиц, характером их поверхности, относительными долями составляющих компонентов и типом межчастичного взаимодействия. Компонентами грунтов могут считаться твердые частицы, их блоки, пакеты и агрегаты. Структурными компонентами также считают адсорбированные грунтом воду и газ, оказывающие существенное влияние на характер взаимодействия твердых частиц [9, 27, 148].

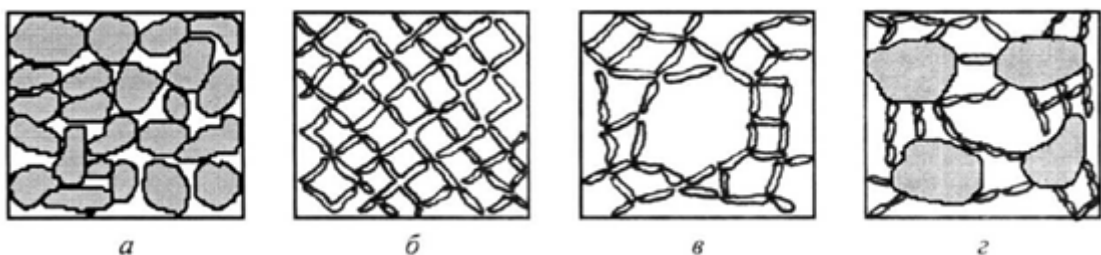


Рисунок 2.4. – Разновидности структуры грунтов: а) зернистая, б) сотоподобная (губчатая), в) хлопьевидная, г) смешанная

**Зернистая структура** характерна для несвязных грунтов и наиболее ярко проявляется у песков и гравия, с характерной пористостью 20-25% [133].

**Сотоподобная (губчатая) структура** имеет место прежде всего для грунтов осадочного происхождения - разнообразных глинистых почв, образовавшихся при осаждении глинистых и пылевидных частиц в пресной воде без коагуляции. Силы межчастичного притяжения, превышают собственный вес частиц. Неуплотнённые грунты с сотоподобной структурой скелета могут иметь пористость выше 50%.

**Хлопьевидное строение** является результатом осаждения с коагуляцией глинистых частиц в воде при наличии растворенных солей. Объединение глинистые частицы в хлопья происходит до их осаждения. Грунты с хлопьевидной структурой характеризуются крайне высокой пористостью, достигающей у морских илов 90 ... 95%. Уплотнение грунтов хлопьевидной структуры приводит к ее переходу в сотоподобный тип [9, 27, 144].

**Смешанную (каркасную) структуру** имеют неоднородные грунты, состоящие из различных частиц — глинистых, пылевидных, песчаных и обломочных. Материал, частицы и агрегаты которого образуют твердый каркас грунтовой среды, обладает значительно более высокой прочностью, чем сам грунт. Это обусловлено наличием структурных связей между частицами и агрегатами и определяется их устойчивостью. Структурные связи являются результатом протекания сложных физико-химических процессов, происходящих при геологическом формировании грунтов. Классифицируют несколько видов элементарных структурных связей, способных проявляться совместно [9, 27, 144].

**Химические связи (кристаллизационные)** - жесткие кристаллические связи (в большинстве случаев не уступают по прочности внутрикристаллическим химическим связям), характерные для скальных пород, хотя в некотором незначительном количестве могут присутствовать и в дисперсных телах. Реализуются при консолидации материалов в процессе образования почв. Для почв магматического происхождения химические связи возникают одновременно с образованием самих минеральных зерен в процессе застывания магмы; в метаморфических почвах - при кристаллизации материнской породы; в осадочных

- вследствие выпадения солей из растворов [9, 27, 125,144].

**Молекулярные и ионно-электростатические связи** возникают при сближении твердых частиц грунта под действием межмолекулярных сил. Молекулярные силы характеризуются бОльшим, чем химические радиусом действия и меньшей интенсивностью увеличиваются с увеличением удельной поверхности системы твердых частиц. Силой они уступают химическим связям. Они малопрочные, но после разрыва возобновляются, то есть являются связями обратимыми [52, 125].

**Капиллярные связи**, обусловленные капиллярным давлением, которое возникает на границе воды и воздуха, в местах соприкосновения твердых частиц, проявляясь как эффект поверхностного натяжения. Благодаря капиллярным силам даже чистые маловлажные пески обладают незначительной связностью [52, 125].

**Электростатические связи** возникают при непосредственном контакте электрически заряженных твердых частиц вследствие накопления на их поверхностях статических электрических зарядов. Являются результатом проявления кулоновского взаимодействия [52, 125].

**Магнитные связи** обусловлены наличием в тонкодисперсных грунтах частиц ферромагнитных материалов, образующих на поверхности глинистых частиц тонкие пленки, которые обеспечивают коагуляционный эффект между частицами за счет ориентирования магнитных моментов соседних частиц [52, 125].

Для уплотнения грунтов силовым поверхностным воздействием необходимо решить две задачи

- 1) Разрушения существующих связей и перераспределения частиц в более компактную структуру при минимальных затратах энергии уплотнителя;
- 2) Восстановления разрушенных связей в новом структурном состоянии для обеспечения его максимальной устойчивости за приемлемое время.

П.А. Ребиндер в [125, 126] провел важнейшую классификационную работу, объединив типичные для различных классов глинистых грунтов структурные

силы связи в два класса – коагуляционно-тиксотропные (молекулярные в широком смысле) и конденсационно-кристаллизационные (химические). Это позволило сделать правильные выводы о качественном характере зависимости деформирующей силы со стороны РО катка, предпочтительной для обеспечения оптимального уплотняющего воздействия.

Коагуляционно-тиксотропные связи проявляются, обеспечиваемые межмолекулярным взаимодействием, как правило, в присутствии достаточного количества жидкой фазы, обуславливающей существенную вязкую составляющую силы сопротивления деформированию, помимо структурной силы. Хотя со сближением частиц при деформировании коагуляционно-тиксотропные силы возрастают, но при возрастании силы деформирующего воздействия со стороны РО катка как легко разрываются, так и восстанавливаются. Как этих обратимость связей, так и существенность сил вязкого сопротивления должны учитываться при выборе режима уплотняющего воздействия.

Конденсационно-кристаллизационные связи являются более жесткими, их разрыв необратим и требует значительной величины силы воздействия катка на грунт. Грунты с конденсационно-кристаллизационной структурой демонстрируют высокие прочностные характеристики. Они могут иметь различную природу, но наличие в среде жидкой фазы для их возникновения не требуется. Так, чисто конденсационный тип связи реализуется при сближении сухих частиц до контакта поверхностями с возникновением сил сцепления (диффузии). Кристаллизационные связи имеют химическую структуру, возникают при цементации и являются жесткими и полностью необратимы при разрыве. Физическая природа кристаллизационных сил может быть различной. При уплотнении грунтов с конденсационно-кристаллизационными структурными связями должны учитываться все указанные особенности их природы и генезиса, особенно при использовании динамических режимов работы катков для их уплотнения [125, 145].

Дальнейшее развитие классификации П.А. Ребиндера, предложенное И.М.

Горьковой, подразделяет структуры дисперсных грунтов, к которым относятся глины, суглинки, супеси и пески, в зависимости от степени их агрегированности, т.е. соотношения содержания частиц согласно данным гранулометрического и микроагрегатного анализов, как показателя, определяющего характер взаимодействия частиц [27,124].

Стабилизационные структуры с частицами размерами менее 1 мкм отвечают коэффициенту агрегированности ( $K_A$ ), равному 1, что происходит при практическом равенстве показателей для гранулометрического и микроагрегатного анализов. Этот тип структур характерен для тонкодисперсных пород при наличии на поверхности частиц гидрофильных стабилизаторов, которые стремятся воспрепятствовать слипанию частиц. Их наличие приводит к увеличению адсорбционного слоя воды вокруг частиц и соответственно снижает прочность грунта при деформировании [127]. Стабилизационные структуры характерны для осадочных пород, образующихся в щелочной среде [27, 52].

Коагуляционные структуры с частицами менее 2 мкм характеризуются коэффициентом агрегированности, равным 4,5–5, и равный 1 для частиц с размером менее 5 мкм. Эти структуры имеют место для пород, содержащих небольшое (до 1,5%) количество электролита, что приводит к структурной коагуляции и образованию структурного каркаса [127]. Межчастичные связи у сред с коагуляционной структурой значительно выше, чем у сред, обладающих стабилизационной структурой [52].

Пластифицированно-коагуляционные структуры характеризуются значением коэффициента коагуляции, не превышающим 3 для частиц менее 1 мкм, и коэффициентом не меньшим 2 – для частиц менее 5 мкм. Эти структуры образуются также в условиях коагуляционного структурообразования, но в присутствии пластифицирующих органических соединений (более 0,7%), в особенности карбонатов кальция (до 50%) [127]. Концентрация электролитов у сред с пластифицированно-коагуляционными структурами колеблется в широких пределах — от 0,3 до 10% [27,52].



Смешанные коагуляционно-кристаллизационные или коагуляционно-конденсационные структуры характеризуются значениями коэффициента агрегированности от 6 до 38 для частиц менее 1 мкм и лежащими в пределах от 2 до 30 — частиц размером менее 5 мкм. Эти структуры имеют коагуляционно-цементные связи, обусловленные, кроме межчастичных сил силами химической связи [127]. Такого рода связи, отличающиеся большой прочностью, хрупкостью и водостойкостью, характерные для кристаллов, возникают при цементации пород аморфным кремнеземом, окислами железа и др. [9, 27, 114]. Для использования в целях интенсификации уплотнения дисперсных грунтов, наиболее подходящими являются грунты с конденсационно-кристаллизационной структурой, так как они обладают более жесткими связями, чем коагуляционно-тиксотропные структуры, характеризующиеся малопрочными водно-коллоидными связями, способными к тиксотропному восстановлению, как было указано выше [127].

В процессе виброуплотнения дисперсных грунтов, грунты с коагуляционной структурой легко разрушаются и быстро изменяются за счет повторного образования структурного каркаса [127]. Смешанные коагуляционно-кристаллизационные и коагуляционно-конденсационные структуры отличаются большей прочностью, хрупкостью и водостойкостью и в меньшей степени подвержены действию вибрации при уплотнении дорожными катками [125, 151].

Текстура грунтовых сред отражает условия течения образования и формирования свойств грунтовых отложений в естественной среде [144]. Различают следующие типы текстур (рис. 2.5):

**слоистая** (тонко и ленточная, волнообразная, сланцевая и др.);

**слитная** (массивная)

**сложная**

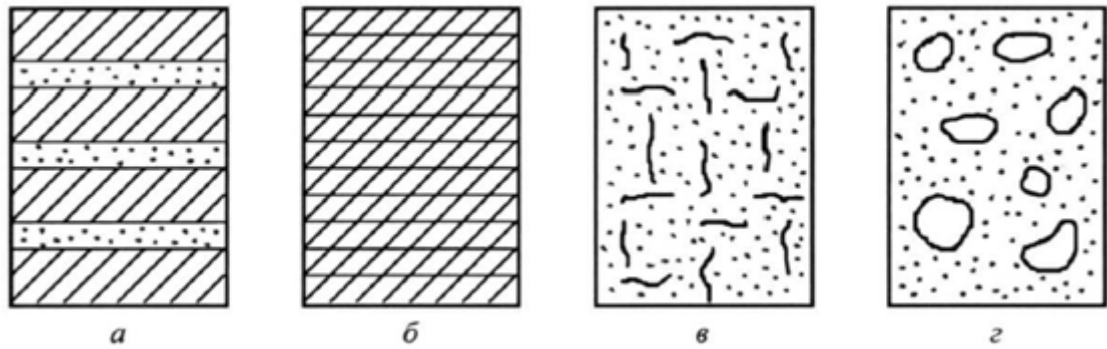


Рисунок 2.5 – Разновидности текстуры грунтов: а — слоистая, б- слитная, в- сложная ячеистая и г - сложная порфировая.

Наиболее распространенные грунты со слоистой текстурой возникли вследствие накопления осадка грунтовых частиц в воде, например при образовании аллювиальных, озерных и морских отложений.

Слитная текстура присуща морским отложениям (первоначальные глины), имеющих однородное строение в различных точках массива. Следует отметить, что при сохранении структуры, текстура грунтов естественного залегания претерпевает существенные изменения при дорожно-строительных работах. При выемке и перевозке, грунтовой среды к месту осуществления работ, текстура полностью нарушается, но при последующей укладке и уплотнении вновь образуется. Однако, при нарушении первоначальной текстуры такие грунтовые среды, даже будучи уплотненными до требуемой плотности, не всегда восстанавливают свои прочностные характеристики полностью [144].

### 2.1.3 Особенности состава грунтовых сред и их влияние на интенсивность работы дорожных катков при их уплотнении.

Характер связей, определяющих особенности структурного строения и текстуры грунтовых сред тесно связан с составом материала. Основными факторами при этом выступают минералогические и гранулометрические характеристики среды, а также содержание жидкости (влажность). Все эти факторы влияют на интенсивность уплотнения грунтовых сред поверхностным

силовым воздействием при работе дорожных катков [9, 27].

Минералогический состав грунтовых сред может существенно различаться в зависимости от того в результате каких процессов и из каких исходных структур происходило образование материалов. Крайне редко в природных условиях можно встретить грунты однородного минералогического состава. Как правило, используемые при строительстве грунтовые среды являются полиминеральными с преобладанием определенного типа минерального вещества [141].

Существенную роль для описания характеристик уплотняемости и упрочняемости грунтовых сред при работе дорожных катков играет сочетание в них твердых частиц различного размера (фракций). По размеру частиц  $d$  фракции подразделяют на глинистые ( $d < 1$  мкм), пылеватые ( $2 < d < 5$  мкм) и песчаные ( $0.05 < d < 2$  мм). В зависимости от характера процессов, ведущих к образованию частиц фракций, их форма может быть от угловатой до сферической [144].

Твердая фаза грунтовой среды взаимодействует с межчастичной жидкостью (жидкой фазой). Жидкая фаза, в свою очередь, обеспечивает межчастичное взаимодействие, отвечая за характер отклика среды при работе катков по их уплотнению. Жидкость удерживается в грунтовых средах и для уменьшения ее содержания требуется приложение значительных усилий со стороны РО катка. Природа наличия жидкой фазы в среде может быть объяснена различными факторами. Подход, связывающий наличие жидкой фазы и вязкие свойства грунтовой среды с действием капиллярных сил восходит к К.Терцаги [217,219], обоснованно приписывавшем связанной в грунтах жидкости свойства, отличные ее свойств в свободном состоянии, в частности, отсутствие возможности испарения. Однако, анализ свойств реальных сред позволяет сделать вывод о том, что капиллярные силы являются не единственными, а для некоторых грунтов и не преобладающими при образовании связей между твердыми частицами и способствующими удержанию жидкой фазы. А.Ф. Лебедев [82] объяснял природу удержания жидкой фазы преимущественно молекулярным взаимодействием, не отрицая влияния и капиллярных сил.

Тип минералогического состава различаются как в зависимости от вида грунтовой среды, так и в рамках одного и того же типа. Например, глинистые среды в зависимости от характера образующих минеральных веществ могут подразделяться на каолиниты, гидрослюды и монтмориллониты. Из них наибольшую рыхлость с наличием полостей демонстрируют монтмориллонитовые глины, что определяет эффективный режим работы катков для их уплотнения как отличающийся длительным временем приложения силы и меньшей по отношению к другим типам глинистых грунтов ее абсолютной величиной. Каолиновые глинистые грунты эффективно уплотняются на интенсивных динамических (вибрационных) режимах работы катков [154].

В грунтовых средах возможно содержание как нерастворимых (карбонаты), так и слаборастворимых (гипс) и растворимых (галит и сильвин) минеральных веществ. Это существенно влияет на свойства сред при взаимодействии с РО катка. Наличие карбонатов в твердой фазе глинистых грунтов положительно влияет на уплотняемость грунтов, уменьшая вязкую компоненту силы сопротивления, и повышает прочностные свойства уплотненного материала [149].

При рассмотрении взаимодействия РО катка со средой в процессе его работы необходимо учитывать, что характеристики грунта, находящегося в исходном рыхлом состоянии при возведении насыпей, существенно отличаются от характеристик грунта в уплотненном состоянии. Зерна и комья рыхлого грунта при работе катка взаимодействуют между собой и с РО катка иным образом, чем в сплошном состоянии. При этом связи между зернами и комьями, обусловленные наличием жидкой фазы, в основном имеют капиллярную природу. Характер связи между частицами грунта внутри зерен и комьев, как было показано В.И. Бирулей [30,34] не отличается от связей в сплошном грунте.

Минералогический состав грунтовых сред, наряду с типом и интенсивностью межчастичных связей твердой фазы на физико-механические свойства грунтов и, как следствие, их влияние на особенности деформирования при уплотнении дорожными катками, является определяющим фактором при

определении эффективных режимных параметров работы катков. Макроскопической величиной, хорошо описывающей зависимость физико-механических характеристик от состава глинистых грунтов, является удельная активная поверхность. Даже в случае различного происхождения, свойства глин с одинаковой активной поверхностью не различаются. Согласно фундаментальным исследованиям Н.Я Хархуты [151-154] по изучению влияния активной удельной поверхности глинистых грунтов на их свойства и поведение, при различном минералогическом составе деформационные характеристики грунтов по отношению к уплотняющему воздействию со стороны РО катка являются функцией только активной удельной поверхности. В то же время минералогический состав определяет устойчивость грунтовых сред по отношению к погодно-климатическим условиям, в том числе и при промерзании.

Основные типы грунтов, используемые в дорожном строительстве, отличаются сложным композиционным гранулометрическим составом, сочетая различные доли частиц, принадлежащих разным фракциям. В рамках самой простой классификации грунты разделяют на связанные и несвязанные.

Для связанных грунтов влияние межчастичных связей, обусловленных величиной удельной активной поверхности (гранулометрическим составом), минералогическим составом частиц грунта и долей жидкой фазы более ярко выражено и оказывает существенное влияние на деформативные (в том числе и вязкие) свойства при уплотнении. Именно характер связанности определяет величину уплотняющей силы, необходимую для разрушения межчастичных связей при необратимом деформировании во время работы катка по уплотнению, а при более тонком анализе в случае динамических режимов уплотнения и зависимость силы сопротивления от времени приложения силы со стороны РО катка.

Принятая в строительстве более тонкая классификация по фракционному составу относит пески к существенно несвязанным грунтам, супеси, в том числе и пылеватые – к несвязанным или малосвязанным, а суглинистые и глинистые

грунты – к связанным. Критерием для классификации выступает относительная доля содержания частиц заданного типа, согласно таблице 2.1 [144].

Гранулометрические характеристики и тип связности при наличии жидкой фазы является определяющим для принятия решения о характере оптимально эффективного комплекса эксплуатационных параметров катка для их уплотнения. В зависимости от типа фракционного состава параметры силового воздействия, обеспечивающего эффективное работу дорожного катка по уплотнение грунтов, могут различаться, причем кардинально как по амплитуде, так и по временным характеристикам.

Таблица 2.1 – Гранулометрический (фракционный) состав грунтов

Название грунта	Содержание фракций по весу, %		
	песчаных с частицами диаметром от 2,0 до 0,05 мм пылеватых	пылеватых с частицами диаметром от 0,05 до 0,005 мм	глинистых с частицами диаметром менее 0,005 м
Песчаный	-	< 15	<3
Песчаный пылеватый	-	15 - 20	<3
Супесчаный	Больше 50% (частицы диаметром 2,0 – 0,25 мм)	<5	3 - 12
Супесчаный мелкий	Меньше 50% (частицы диаметром 2,0 – 0,25 мм)	<5	3 - 12
Пылеватый	-	Больше песчаных	<12
Суглинистый	Больше пылеватых	-	12 – 18
Тяжёлый суглинистый	Больше пылеватых	-	18-25
Суглинистый пылеватый	-	Больше песчаных	12-25
Глинистый	-	-	>25

При этом рекомендуемые значения уплотняющих контактных напряжений лежат в диапазоне от  $\sigma < 0,5$  мПа для песчаных грунтов,  $0,5 < \sigma < 0,7$  мПа для супесчаных и  $\sigma > 0,7$  мПа для суглинков и глин. Для всех типов грунтовых сред использование вибрационных катков для их уплотнения оказывается приемлемым и они демонстрирует более высокую производительность, однако состав грунта влияет как на значения амплитуд и частот вынуждающей силы, так и на длительность времени воздействия со стороны РО катка. Амплитуды и частоты, как и время приложения гармонической силы, возрастают с увеличением связанности грунта [151], [154].

Учитывая тот факт, что грунты естественного залегания, имеют сложный фракционный и неоднородный минералогический состав, ответ на вопрос о выборе комплекса режимных, обеспечивающего оптимальную эффективность и производительность катка, в том числе и энергоэффективность его работы, должен решаться для каждого конкретного случая используемого материала отдельно. Основой для выбора служат результаты испытаний и теоретических исследований, определяющие характер деформативных свойств уплотняемого грунта при работе катков.

#### 2.1.4 Анализ работы дорожных катков с учетом изменения деформативных и прочностных свойств при уплотнении грунтовых сред.

Интенсификация работ по уплотнению грунтов, рассматриваемого как накопление пластических деформаций грунтовым слоем при силовом воздействии со стороны РО уплотняющей дорожной машины (катка) требует анализа того, как характеристики грунтового слоя, отвечающие за сопротивление деформированию, меняются при возрастании его плотности при работе катка.

Это необходимо в первую очередь потому, что позволяет выявить наиболее эффективные с различных точек зрения режимы работы катков, которые приводят к достижению характеристиками грунта требуемых нормативных значений.

Следует подчеркнуть, что именно это в конечном итоге является целью работы катков по уплотнению грунтовых сред.

Коэффициент уплотнения, как удобная для измерения макроскопическая характеристика, процесса служит независимой переменной при описании зависимостей величин, определяющих деформативные свойства материала.

Информация о характере зависимости «напряжение - деформация» (Рис.2.1) и связанных с ней параметрах среды, как было показано выше, играет критическую роль при моделировании взаимодействия рабочего органа уплотняющей дорожной машины (катка) с грунтом при ее работе. Это актуально на всех этапах технологического процесса уплотнения грунтов дорожными катками, независимо от того, какой подход к моделированию взаимодействия «РО катка - грунт» – сплошной среды или сосредоточенных параметров используется.

Выявление энергоэффективных режимов работы дорожных катков для уплотнения грунтовых сред требует анализа зависимостей, описывающих возникновение и развитие НДС в среде деформируемой РО катка. К параметрам, влияющим на возникновение и развитие НДС в среде, относятся предел упругости  $\sigma_{el}$ , предел пропорциональности  $\sigma_{prop}$ , предел пластичности  $\sigma_{pl}$ , предел текучести  $\sigma_{fl}$  и предел прочности  $\sigma_{destr}$ . Значения этих величин различаются для разных типов грунта в зависимости от гранулометрического и минералогического состава, а также в рамках одного типа и даже образца грунта в зависимости от текущего состояния материала при работе катка. Состояние определяется совокупно мгновенным значением коэффициента уплотнения, то есть достигнутой плотностью и параметрами режима работы катка, определяющими напряженно-деформированное состояние материала слоя в заданный момент времени его работы. Все эти факторы необходимо учитывать для эффективного решения задачи выбора комплекса эксплуатационных параметров катка, максимально интенсифицирующего его работу по уплотнению грунта [184].

Вязкие свойства грунта, характеризуются величиной коэффициента



вязкости  $\eta$ , не испытывающей, однако, таких существенных изменений (на порядки), как модули деформации и упругости. Тем не менее, увеличение вязкости грунтовой среды с возрастанием плотности не может игнорироваться при исследовании поведения грунтового слоя при его деформировании в ходе работы катка. Это явление может быть объяснено с точки зрения структурных изменений при уплотнении и возникновении новых связей между перераспределившимися частицами.

Основной величиной, характеризующей деформативные характеристики среды, выступает модуль деформации, определяемый в случае линейной зависимости деформации от приложенного напряжения как

$$E_d = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}. \quad (2.5)$$

В случае линейного участка кривой «напряжение-относительная деформация» модуль деформации, по крайней мере для ветви нагружения грунтового слоя может считаться постоянным до значения предела пропорциональности  $\sigma_{prop}$ . Полная деформация, приобретаемая материалом слоя при выполнении закона Гука, линейно зависит от модуля полной деформации  $E_d$ . Значения модуля полной деформации и коэффициента Пуассона, определяющего связь продольной и поперечной деформации при поверхностном деформировании согласно [144] приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Среднее значение коэффициента Пуассона  $\mu$  и модуля деформации

Тип грунта	Коэффициент Пуассона $\mu$	Модуль деформации $E_d$
Песок и супесь	0.3	21-23
Суглинок	0.35	10-12
Глина	0.42	12-15

Упругая часть  $E_y$  модуля полной деформации  $E$  характеризует способность материала слоя восстанавливать часть деформации после снятия нагрузки.

Информация о величине модуля упругой деформации позволяет рассчитать сохраняющиеся пластические деформации, накопление которых является целью процесса уплотнения грунтов.

Согласно исследованиям Д. Д. Баркана [19, 21], значения  $E_y$  возрастают от степени связанности грунта (таблица 2.3), что отражает хорошо известный факт того, что связанные грунты требуют более длительного времени приложения внешней уплотняющей силы по сравнению с несвязанными грунтами для достижения сравнимой по величине пластической деформации. Это объясняется необходимостью разрушения и последующего восстановления более интенсивных межчастичных связей в связанных грунтах [127].

Таблица 2.3 – Зависимость модуля упругой деформации грунтов от коэффициента уплотнения

Тип грунта	Значения модуля упругости $E_y$ , МПа для различного коэффициента уплотнения, $k_y$									
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0
Супесь	40	41	42	43	45	49	43	56	60	70
Песок пылеватый	43	48	54	60	66	72	78	84	90	96
Суглинок легкий и тяжелый, глина	23	24	25	29	34	41	50	72	90	108
Супесь пылеватая, суглинок легкий пылеватый	25	26	27	32	38	46	54	72	90	108

Модуль упругой деформации может существенным образом варьироваться в рамках одного типа грунта в зависимости от гранулометрического состава (Таблица 2.4). Это заставляет при выборе параметров эффективных режимов уплотнения уделять особое внимание выяснению исходных характеристик уплотняемого материала, получаемых в ходе испытаний.

Таблица 2.4 – Значения модуля упругой деформации грунтов (модуля Юнга)

Тип грунта	Модуль упругости $E_{el}$ , МПа
Песок	83
Суглинок	31-295
Лесс	100-130

Важной характеристикой для описания процессов развития напряженно-деформированного состояния в уплотняемых грунтовых средах при работе дорожных катков является предел прочности, который определяется как отношение вертикальной нагрузки на образец грунта, при которой происходит его разрушение, к площади поперечного сечения образца. Предел прочности служит для выявления наиболее эффективных режимов работы катков при уплотнении грунтовых сред с точки зрения критерия В.Б.Пермякова [117].

Таблица 2.5 – Пределы прочности грунтов оптимальной влажности (при статической укатке) [143, 160]

Тип грунта	Пределы прочности уплотненных грунтов $\sigma_{destr}$ , МПа		
	$k_y=0.85$	$k_y=0.95$	$k_y=1.0$
Песчаный, супесчаный пылеватый	0.2-0.3	0,3 – 0,4	0,39 – 0,52
Среднесвязанный суглинистый	0.25-0.35	0,4 – 0,6	0,64 – 0,96
Тяжелый суглинок	0.45-0.55	0,6 – 0,8	0,96 – 1,28
Связанный глинистый	0.6-0.7	0,8 – 1,0	1,28 – 1,60

Существенное влияние на сопротивление грунтовых сред деформированию на при работе дорожных катков, реализующих динамические режимы уплотнения, оказывает вязкая составляющая силы сопротивления, зависящая от влажности грунта. [42, 82]

Количество жидкой фазы в грунтовой среде грунте может оцениваться с использованием различных величин - объемной и весовой влажности.

Объемная влажность ( $W_n$ ), или объемное содержание жидкости, численно равна отношению объема воды (жидкости) в грунте ( $V_w$ ) к объему всего грунта

$$V_{tot}$$

$$W_n = \frac{V_w}{V_{tot}} 100\% \quad (2.6)$$

Эта величина измеряется в % или в долях единицы и может меняться от нуля (для абсолютно сухого грунта) до 100% или 1 (для полностью насыщенного грунта).

Весовая влажность (W), или весовое (массовое) содержание жидкости, численно равна отношению массы воды (жидкости) в грунте ( $m_w$ ) к массе твердой фазы грунта ( $m_s$ ):

$$W = \frac{m_w}{m_s} 100\% \quad (2.7)$$

Эта величина также измеряется в % или долях единицы. В отличие от объемной влажности весовая влажность имеет ограничение – 0% для абсолютно сухого грунта. Объемная и весовая влажности связаны между собой соотношением:

$$W \rho = W_n \rho_w \quad (2.8)$$

где  $\rho$ - плотность скелета грунта, г / см [127].

*Степень* (коэффициент) *влажности* ( $S_e$ ) характеризует относительную долю заполнения пор водой (жидкостью) в данном грунте. Ее величина численно равна отношению объема воды или жидкости ( $V_w$ ) к объему пор грунта ( $V_{пор}$ ):

$$S_e = \frac{V_w}{V_{пор}} 100\%. \quad (2.9)$$

Величина  $S_e$  измеряется в долях единицы или в % и может меняться от 0 (в случае абсолютно сухого грунта) до 1 или 100% (при полном насыщении пор) [127].

Известно, что для плотности грунта и влажности существует функциональная связь (Рис 2.7), имеющая максимум при значении влажности, которое называется оптимальным. При оптимальной влажности грунтовая среда наиболее эффективно достигает требуемой плотности.

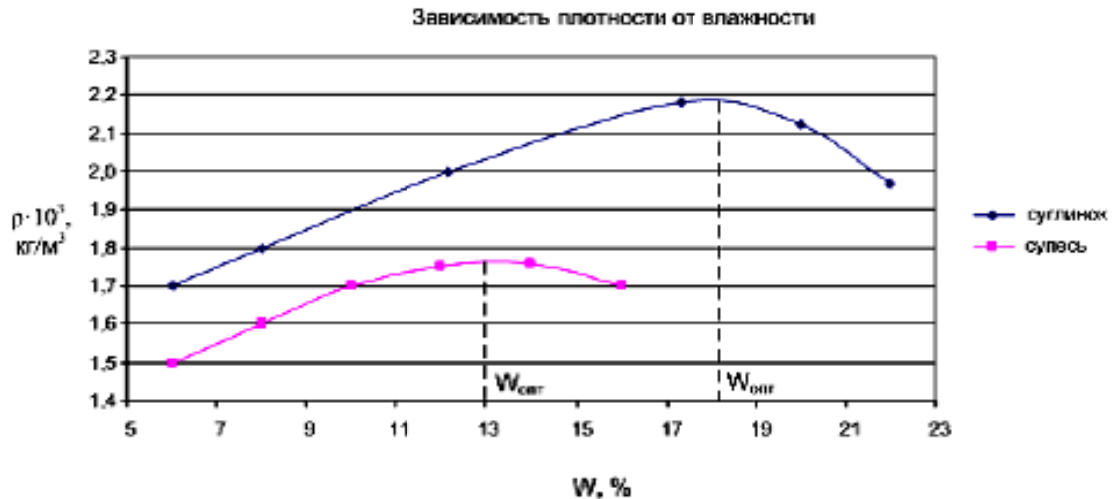


Рисунок 2.7. Зависимость плотности супесчаного и суглинистого грунтов, достигаемой при уплотнении дорожными катками от влажности.

Вязкие свойства грунтовых сред зависят как от влажности грунта, так и от этапа силового воздействия. Динамическая вязкость  $\eta$  как величина, определяющая вязкие свойства материала, существенно зависит от того осуществляется нагужение или разгрузка материала. Информация об этой зависимости важна для описания поведения среды при динамических режимах уплотняющего воздействия [154]. На рис.2.8 и в Таблице 2.8 приведены зависимости динамической вязкости суглинистого грунта от влажности для ветвей нагужения и разгрузки.

Таблица 2.6 – Значения коэффициента вязкости  $\eta$  в зависимости от влажности среднесуглинистого грунта на различных ветвях нагужения

Влажность грунта	Объемный вес скелета грунта, Н/м³					
	12100		13000		14000	
	$\eta, 10^6 \cdot \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$					
	$\eta_n$	$\eta_p$	$\eta_n$	$\eta_p$	$\eta_n$	$\eta_p$
0,4W <sub>T</sub>	19,2	46,2	—	—	—	—
0,5W <sub>T</sub>	21	9,64	4,4	15,75	11	21
0,6W <sub>T</sub>	3,3	4,89	0,78	5,3	1,1	5,36

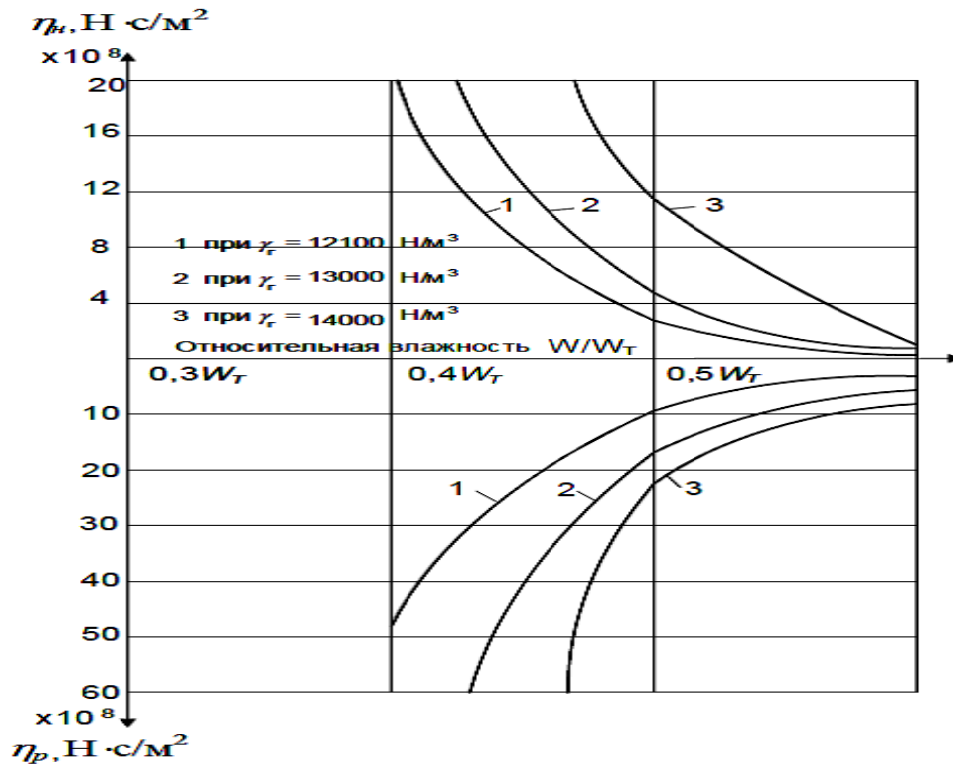


Рисунок 2.8 – График зависимости вязкости грунта  $\eta$  от его влажности в долях от предела для различных ветвей нагружения при работе дорожного катка

Данные о деформативных свойствах грунтовых сред и характеризующих их величинах играют важную роль в модельном описании взаимодействия РО уплотнителя со слоем уплотняемой среды.

2.2 Существующие подходы к описанию развития напряженно-деформированного состояния при взаимодействии РО дорожной машины с грунтовой средой.

Эффективное описание развития напряженно-деформированного состояния грунтовой среды выступает в качестве неперемного условия для рассмотрения процесса взаимодействия РО с грунтом при работе катка для уплотнения дорожно-строительных материалов. Спектр режимных параметров работы катков, достаточно широк, соответственно, процессы, проходящие при этом в толще грунтовой среды, могут существенно различаться по своей природе. Тем не

менее, общим для всех них требованием является накопление пластических деформаций, в результате которого повышается плотность грунтовой среды и изменяются ее физико-механические, в первую очередь прочностные, характеристики. Источником пластических деформаций выступают развивающиеся в толще грунта напряжения. Грунт под действием поверхностного силового воздействия можно рассматривать как упруговязкопластичную среду и исследовать ее поведение в рамках различных подходов.

Особый интерес при исследовании развития напряженно-деформированного состояния при уплотнении представляет картина распределения напряжений в толще грунтового слоя. От ее вида зависит не только сопротивляемость грунта внешнему воздействию, но и эффективное перераспределение энергии, передаваемой грунту при работе дорожного катка. Решение этой задачи позволяет оценить эффективность протекания процесса уплотнения как накопления необратимых пластических деформаций. Выявление особенностей динамики грунтовой среды при взаимодействии с РО катка осложнено существенным изменением характеристик грунтовой среды. Как будет показано ниже, это делает уравнения, получающиеся в результате моделирования отклика грунтовой среды на внешнее воздействие, существенно нелинейными по величине деформации при реализации любого из подходов к его описанию.

При описании уплотнения динамическим воздействием смещением частиц грунта касательным по отношению к поверхности грунтового слоя можно пренебречь при уплотнении силой, нормальной по отношению к поверхности.

1. Считается, что уплотнение происходит за счет перераспределения и проникновения частиц грунта из более высоких слоев в промежутки между частицами более низких [19] при том условии, что гранулометрический состав грунта остается неизменным. Можно считать, что суммарное горизонтальное смещение слоев равно нулю, поскольку в толще грунта в среднем одинаковое число слоев сместятся вправо и влево.

2. При этом, в силу одинакового количества смещений слоев грунта в

направлениях касательных к поверхности, касательная составляющая силы для различных слоев компенсируется, а сопротивление смещению обеспечивается ее нормальной составляющей.

В случае перемещения дорожной машины, осуществляющей уплотнение, это приближение будет требовать, поскольку при движении рабочий орган машины будет смещаться с более уплотненных участков грунтовой среды на менее уплотненные.

Для вычисления величины напряжений, обеспечиваемых работой катка для уплотнения грунтовых сред, необходимо рассматривать характеристики грунта, принимая во внимание перераспределение нормальных контактных напряжений по толщине грунта, для чего рассматривается модуль деформации грунта (в том числе и для неупругой составляющей) с учетом влияния коэффициента Пуассона  $\mu$  [143]

Таблица 2.7 – Зависимость коэффициента Пуассона  $\mu$  грунта от состояния грунта

Тип грунта	Суглинок			Супесь		
	$k_y$	0,85	0,95	0,99	0,85	0,95
$\gamma$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,34	0,37

Рассмотрим существующие подходы к описанию взаимодействия РО катка с грунтовой средой и развития в толще грунтовой среды напряженно-деформированного состояния.

Наиболее наглядным является в этом случае микроскопический подход, описывающий уплотнение как перераспределение частиц грунта [71]. Его преимуществом выступает простота объяснения процессов, происходящих в толще слоя. Микроскопический подход позволяет оценить номинальную требуемую плотность грунта известного типа и гранулометрического состава. При этом сила сопротивления грунта внешнему воздействию складывается из нескольких составляющих:

- 1) Сила сопротивления сухого трения между частицами грунта;



- 2) Сила сопротивления вязкого трения между частицами грунта за счет наличия в среде жидкой фазы;
- 3) Квазиупругая сила сопротивления, зависящая от величины деформации и связанная с вытеснением воздуха и жидкости из пространства между частицами грунта, а также с разрушением связей между частицами;
- 4) Упругая сила сопротивления, возникающая в результате деформирования частиц грунта;
- 5) Сила сопротивления, идущая на изменение гранулометрического состава среды.

Передача импульса в среде от поверхности в глубину слоя происходит за счет контактного, в том числе и ударного взаимодействия между частицами по законам классической механики.

Взаимодействие РО дорожной машины со средой в рамках микроскопического подхода реализуется при преодолении силой внешнего воздействия силы сухого трения, квазиупругой силы и силы, возникающей при разрушении частиц грунта. Эти силы имеют неконсервативный характер и, будучи приведенной в напряженно-деформированное состояние взаимодействием с РО катка, грунтовая среда не полностью восстанавливает исходное положение границы поверхности. Таким образом, соответствующая деформация грунтового слоя является необратимой и ведет к повышению плотности среды.

Реализация модели взаимодействия РО катка с грунтовой средой с точки зрения микроскопического подхода РО встречает сложности. Основной из них является необходимость точного описания движения взаимодействующих сложным образом частиц среды. Такой подход встречает трудности вычислительного характера и не может быть применен для попытки контролировать процесс уплотнения в реальном времени без использования стохастических моделей.

Однако, в случае гранулированных сред, подход, рассматривающий движение отдельных частиц, является достаточно плодотворным. Следует

указать, что решение задач механики гранулированных сред базируется на классических методах механики ударного взаимодействия систем многих тел. Более детальное рассмотрение проблем теории может быть найдено в работах отечественных специалистов В.В. Козлова и Д.В. Трещева [73,75], Я.Г.Синая [136], Р.Ф.Нагаева и Н.А.Холодилина [111,112], а также таких зарубежных авторов как Р. Бэгнопд, С. Коуин, Р. Неддерман, С. Сэвидж [87], Д.Бидо и А.Хансена [164], Р.Л. Брауна и Дж. Ричардса [1167], Е. Отта [200, 201] и др. Наряду с задачами механики грунтовых сред, стохастические модели с трением используются и для решения других технических задач, в частности задачах обработки материалов. Существенный вклад в теорию этих процессов внес И.И.Блехман [36-38]. Практические аспекты задач вибрационной обработки материалов гранулированными средами изучались А.П. Бабичевым и С.Н. Шевцовым [6, 7, 159].

Подход к описанию взаимодействия РО с материалом уплотняемого слоя, основанный на методах механики сплошной среды, традиционно используемый для описания развития НДС в слоях различных сред при оказании на них поверхностного динамического воздействия также может быть использован в случае грунтовых сред. В основе этого метода лежат фундаментальные представления, восходящие к работам Ш.О.Кулона [169], О.Мора, В.Ранкина, Р. Мизеса [193], Ж.Буссинеска по теории прочности твердого тела и К.Терцаги [217], Н.Одемарка [197], В.А.Флорина [147, 148], Н.А.Цытовича [157], Н.М.Герсеванова [45], М.Н. Гольдштейна [47, 48], по механике грунтов и теории прочности оснований дорог и сооружений.

В рамках этого подхода грунтовая среда считается обладающей непрерывными локальными характеристиками, определяющими силу сопротивления при смещении частиц грунтовой среды, ведущего к деформированию. Реакция среды на внешнее воздействие, ведущая к деформированию и последующему накоплению пластических деформаций с возрастанием плотности может быть описана при помощи стандартных уравнений

для распространения упругих волн с затуханием в сплошной среде. При этом для эффективного решения волнового уравнения с затуханием существенную роль играет правильный выбор начальных и граничных условий.

В случае рассмотрения контактных задач для упруговязкопластичных сред выбор граничных условий усложняется в силу наличия пластических свойств у среды и изменения ее физико-механических свойств, в частности упрочнения. Это ведет к изменению уравнений, определяющих смещение частиц среды, а также координат их исходных положений с накоплением необратимых деформаций при уплотнении. Другой особенностью, требующей учета, выступает сложность формы профиля пятна контакта рабочего органа, определяющего границу уплотняемой среды. Решение уравнений, описывающих движение грунтовой среды, в этой ситуации ведется с использованием приближенных численных методов. Целый ряд отечественных и зарубежных научных коллективов обладают вычислительными средствами и успешно решают с их помощью чрезвычайно сложные динамические контактные задачи о поведении деформируемых грунтов. Решение ряда задач о взаимодействии штампов различной формы на высоких скоростях с различными по характеристикам грунтовыми средами при проникновении было осуществлено В.Г.Баженовым с соавторами [10-12] в рамках подхода, развитого в работах школы С.С. Григоряна [50] и А.Я. Сагомоняна [126]. Однако, рассмотренные динамические задачи являются существенно нестационарными и параметры воздействия на грунт со стороны внешнего источника – скорости и контактные давления превосходят характерные для уплотняющего воздействия дорожных машин в сотни раз, что делает развитые при их решении методы ограниченно применимыми для описания процесса уплотнения.

Более эффективным с точки зрения практического применения для исследования взаимодействия катков с грунтовыми средами, происходящих без разрушения последних, является подход сосредоточенных параметров. Его использование, в первую очередь, обусловлено особенностями работы катков при

уплотнении грунтовых сред, как технологического процесса. Его можно рассматривать для описания взаимодействия двух механических систем – «рабочий орган – область грунтовой среды», обладающих характеристиками, определяющими особенности взаимодействия. Рабочий орган уплотняющей дорожной машины встречает сопротивление грунтовой среды, которое может быть при моделировании реализовано в виде элемента, обладающего вязкими, упругими и пластичными свойствами.

При этом объем грунтовой среды, непосредственно вступающий во взаимодействие с рабочим органом со стороны поверхности грунта, представляется своего рода механическим «черным ящиком», характеристики которого могут быть выяснены только в результате анализа особенностей этого взаимодействия. Основной величиной, позволяющей оценить характеристики уплотняемого грунта, выступает смещение его поверхности по отношению к исходному состоянию в ходе взаимодействия с ним РО катка. Этот подход успешно развивался, в частности, В.И. Баловневым [13-15] в рамках линейных механо-реологических моделей грунтовой среды, в том числе и для выявления оптимальных характеристик уплотняющих дорожных машин и режимов поверхностного силового воздействия.

Возможность представления активной области (зоны) грунтовой среды при возникновении с ним РО катка механической системой с сосредоточенными параметрами обусловлена существующими режимными параметрами дорожных машин и определяемой нормативными документами [137] толщинами уплотняемых слоев грунта. Скорости изменения контактного давления и параметры среды удовлетворяют условию квазистационарности процесса деформирования активной зоны. Тем самым можно считать, что зависимость отклика элементов, представляющих уплотняемый объем среды, на деформирующее воздействие (его деформация и скорость) зависят от значения напряжения в заданный момент времени.

Таким образом, в случае подхода сосредоточенных параметров,

взаимодействие рабочего органа и грунтовой среды сводится к взаимодействию двух или более механических систем, характеризующихся известными массами (точечными или имеющими известное распределение пространственной плотности) и величинами, определяющими упругие, вязкие и пластические свойства рабочего органа и самой среды.

Применение подхода сосредоточенных параметров к описанию поведения грунтовых сред невозможно без моделирования процессов, происходящих в слое грунта при взаимодействии с РО катка, для определения величин жесткости, вязкости и массы объема грунта, вовлеченного во взаимодействие.

Уравнения, определяющие поведение взаимодействие механических систем, представляют собой систему уравнений, описывающих набор связанных нелинейных осцилляторов, допускающих наличие элементов сухого трения. Количество и механические характеристики систем, описывающих уплотняемый объем грунтовой среды могут быть определены из параметров поверхностного воздействия с учетом геометрических и деформационных особенностей рабочего органа.

Деформационные свойства грунтовой среды под воздействием поверхностной силы могут более точно быть оценены из известных зависимостей «напряжение - относительная деформация» для элементарных объемов грунта. Следует отметить, что требуемые для накопления пластических деформаций напряжения в толще грунтовой среды, лежат на нелинейных участках этих зависимостей, что приводит к значительному усложнению коэффициентов уравнений, делая их нелинейными. Способом избежать этого является аппроксимация зависимостей «напряжение - относительная деформация» кусочно –линейной функцией.

Другим фактором, требующим учета при моделировании грунтовой среды в рамках подхода сосредоточенных параметров, выступает наличие «памяти» или наследования, выражающееся в том, что характеристики среды изменяются при уплотнении и последующие циклы воздействия должны описываться с учетом

предыдущей истории пластического деформирования.

Особо необходимо рассматривать случай деформируемых рабочих органов, например, в случае работы катков с пневмошинными РО. Необходимость учета деформирования рабочего органа при работе катков вызывает дополнительные сложности при моделировании в рамках подхода сосредоточенных параметров. Однако эти сложности носят технический характер и при численном решении сопутствующих уравнений могут быть учтены.

### 2.3 Особенности распределения напряжений в слое при уплотнении грунтовых сред дорожными катками

Задача об описании распределения напряжений в слое грунтовой среды в случае приложения к нему поверхностной нагрузки является традиционно рассматриваемой задачей механики грунтов. Классические результаты в этой области были получены для случая абсолютно упругой изотропной среды J.L. Boussinesq (Буссинеск) и обобщены Н.М. Westergaard (Вестергаард) [223] на связанные среды. Эти работы и предложенные в них методы являются актуальными по сей день и широко используются при расчетах оснований и фундаментов сооружений [107].

Картина распределения напряжений в грунтовом слое при приложении к его поверхности распределенной нагрузки со стороны рабочего органа уплотняющей машины играет при описании процесса уплотнения важнейшую роль и позволяет качественно оценить процессы, происходящие в грунтовом слое [211], а кроме этого выступает в качестве отправной точки для описания движения деформируемого объема грунтовой среды и накопления пластических деформаций. Величина механического напряжения для участка среды полностью определяет его динамическое поведение согласно точке, определяющей напряженно-деформированное состояние грунтовой среды на кривой «напряжение – относительная деформация» (Рис 2.2). Поскольку необратимая

деформация, ведущая к уплотнению грунтового слоя, происходит в направлении, нормальном к поверхности по которой происходит приложение силы, то для ее развития достаточно рассмотрения нормальной составляющей напряжения.

Для распределения вертикальных напряжений от точечной нагрузки величины  $Q$  теория Буссинеска дает следующий известный результат

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2} \frac{1}{(1 + (r/z)^2)^{5/2}}, \quad (2.10)$$

который принято представлять в виде

$$\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B,$$

где  $I_B = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{(1 + (r/z)^2)^{5/2}}$  - безразмерная функция - коэффициент влияния Буссинеска. Графики сечения вертикальной плоскостью, проходящей через точку приложения нормальной единичной нагрузки, поверхностей постоянного напряжения, приведены на рис 2.9

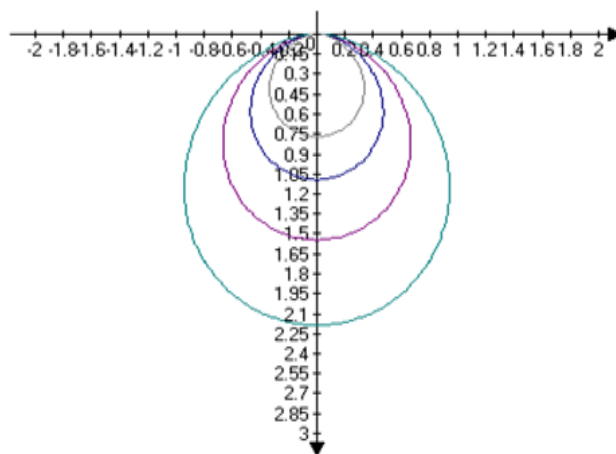


Рисунок 2.9 – Распределение поверхностей постоянного напряжения в толще грунтового слоя по Буссинеску

В свою очередь, теория Вестергаарда для того же случая точечной вертикальной нагрузки величины  $Q$  дает

$$\sigma_z = \frac{Q}{2\pi z^2} \frac{\gamma}{(\gamma^2 + (r/z)^2)^{3/2}}, \quad (2.11)$$

где коэффициент  $\gamma$  служит для учета перераспределения напряжений в точке в толще среды

$$\gamma = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2-\mu}},$$

$\mu$ - коэффициент Пуассона [107]. И, аналогично введенному выше обозначению для коэффициента влияния Буссинеска, можно записать

$$\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_W,$$

$I_W = \frac{\gamma}{2\pi(\gamma^2 + (r/z)^2)^{3/2}}$  - коэффициент влияния Вестергаарда.

Во всех формулах выше переменная  $r$  - расстояние от точки наблюдения до вертикальной прямой, проходящей через точку приложения нагрузки, переменная  $z$  - глубина точки наблюдения по отношению к поверхности грунтового слоя [107]..

Графики сечения вертикальной плоскостью, проходящей через точку приложения нормальной единичной нагрузки, поверхностей постоянного напряжения, приведены на рисунке 2.3.2

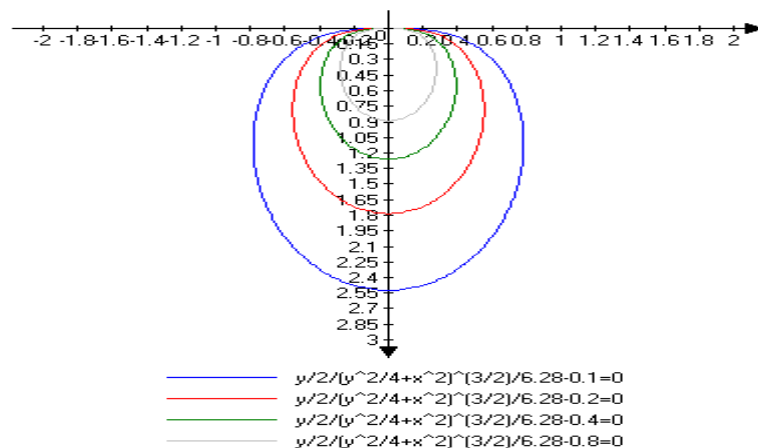


Рисунок 2.10 – Распределение поверхностей постоянного напряжения в толще грунтового слоя по Вестергаарду [107]. (случай  $\mu = 1/3$ ,  $\gamma = 1/2$ )

Выражения для напряжений, возникающих в результате приложения к поверхности грунтового слоя точечной нагрузки, позволяют определить вид нормальных напряжений в грунтовом слое и в случае распределенных нагрузок.



Наиболее интересным является случай нагрузки, распределенной вдоль прямой линии, позволяющий произвести дальнейшее обобщение результатов на случай произвольной прямоугольной области [107].

Теория Буссинеска для нагрузки, распределенной вдоль прямой с линейной плотностью  $q$ , дает следующий результат для вида нормальных напряжений

$$\sigma_z = \frac{q}{z} \frac{2/\pi}{(1 + (x/z)^2)^2}, \quad (2.12)$$

где координата  $x$  представляет расстояние от проекции точки наблюдения на поверхность грунтового слоя до линии распределения нагрузки.

Рассмотрев нагрузку в виде бесконечной полосы шириной  $2b$  с поверхностной плотностью  $\sigma_0$  как совокупность линейно распределенных элементарных нагрузок, можно получить выражение для распределения напряжений в толще грунтового слоя в виде

$$\sigma_z = \frac{\sigma_0}{\pi} \left( \arctan\left(\frac{x+b}{z}\right) - \arctan\left(\frac{x-b}{z}\right) - \frac{2bz(x^2 - b^2 - z^2)}{(x^2 - b^2 + z^2)^2 + 4b^2z^2} \right), \quad (2.13)$$

где, перейдя к безразмерным переменным, приведенным к полуширине полосы, на которой осуществляется приложение нагрузки  $\zeta = z/b$ ,  $\xi = x/b$ , получим

$$\sigma_z = \frac{\sigma_0}{\pi} \left( \arctan\left(\frac{\xi+1}{\zeta}\right) - \arctan\left(\frac{\xi-1}{\zeta}\right) - \frac{2\zeta(\xi^2 - 1 - \zeta^2)}{(\xi^2 - 1 + \zeta^2)^2 + 4\zeta^2} \right) \quad (2.14)$$

Графики безразмерной функции  $f(\xi, \zeta) = \frac{\sigma_z}{\sigma_0} = C$ , определяющей поверхности равного напряжения в толще грунтовой среды для различных значений константы  $C$  представлены на рисунке 2.11 [107]

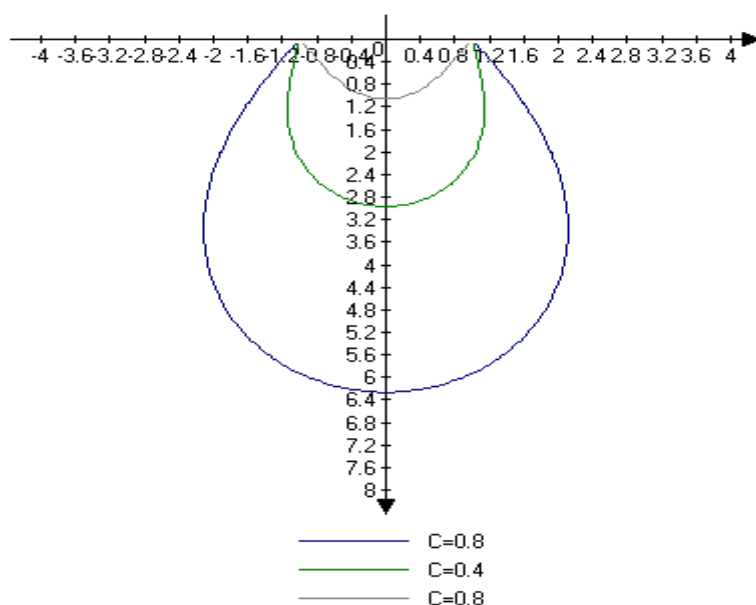


Рисунок 2.11 – Распределение поверхностей постоянного напряжения в толще грунтового слоя по Буссинеску [107] (случай равномерного распределения нагрузки по бесконечной полосе известной ширины)

Стоит отметить, что функция  $f(\xi, \zeta) = C$  задает зависимость между переменными  $\xi, \zeta$  неявно и получить аналитическую зависимость между ними в виде  $\xi = \xi(\zeta)$  не представляется возможным из-за необходимости решать при этом трансцендентное уравнение [107].

## 2.4 Выводы по Главе 2

При описании работы дорожных катков упруговязкопластичные среды выступают модельным представлением материала. Они обладают физико-механическими характеристиками, варьирующимися в широких пределах в зависимости от особенностей минералогического и гранулометрического состава, от особенностей сил взаимодействия, связывающих между собой частицы среды, а также текущего состояния среды в процессе уплотнения, достигнутого работой катка. Это не только делает более комплексной задачу выбора оптимального комплекса режимных параметров, обеспечивающего эффективную работу катка,

но и расширяет диапазон характеристик, позволяющих адаптировать его воздействие на среду изменяющимся в процессе уплотнения свойствам грунтовой среды.

Теоретические основы взаимодействия РО уплотняющих машин с грунтами, реализованные в рамках различных подходов к механике грунтовых сред, основывающиеся и подтверждающиеся совокупностью эмпирических данных для многих типов используемых грунтов были развиты такими специалистами, как Э.А. Абраменков [1], В.А.Анфимов [4], В.Г. Баженов [10-12], Д.Д. Баркан [19-21], В.Ф. Бабков [8,9], О.Т.Батраков [22-26], В.А. Бидерман [28], А.К. Бируля [29-33], В.И. Гребенщиков [49], А.И. Доценко [53], А. В. Захаренко [60, 61], В.И. Кнороз [69], Г.И. Кустарев [79], А. А. Малышев [83], Н.Н. Иванов [63], В. Б. Пермяков [117], В. Н. Тарасов [140-141], Р. Хедекель [179] Н.Я. Хархута [151-155] и др.

Результаты совокупности теоретических и экспериментальных исследований приводят к выводу, что наиболее действенным способом повышения интенсивности работы катков для уплотнения грунтовых сред выступает адаптирование параметров воздействия во всем спектре доступных видов и режимов для учета особенностей текущего состояния среды.

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

2. Деформационные характеристики грунтовой среды – модули деформации, показатели вязкости, пределы пластичности, текучести и прочности находятся в прямой зависимости от состояния, в которое среда была приведена работой уплотняющей машины (текущего значения коэффициента уплотнения), а также типа грунтовой среды и ее состава.

3. Интенсивность работы дорожного катка по уплотнению среды

существенно зависит от ряда факторов, определяемых эксплуатационными параметрами и особенностями взаимодействия РО катка со средой. К этим факторам относятся величина контактных давлений, параметры режима нагружения – величина статической составляющей силы, частота и амплитуда периодической силы катка, его скорость, а также величины определяющие особенности состава грунтовой среды, пористость, доля жидкой фазы (влажность).

4. Для определения активной области уплотняемого грунта ключевой является информация о распределении напряжений внутри слоя, порождаемых работой катка. Характер распределения напряжений определяется размерами и формой пятна контакта РО уплотнителя при его взаимодействии с грунтом.

5. Описание взаимодействия РО уплотнителя с уплотняемым объемом грунтовой среды может вестись в рамках ряда теоретических подходов. Для крупнозернистых грунтов могут быть использованы стохастические методы, рассматривающие материал как гранулированную среду, изучающую деформацию грунта как результат взаимодействия составляющих ее частиц. Рассмотрение грунтов как непрерывной упруговязкопластичной среды позволяет эффективно использовать методы механики сплошных сред для описания взаимодействия с РО катка.

6. Для описания взаимодействия РО катка с уплотняемой средой при квазистационарных динамических режимах уплотнения подходит метод сосредоточенных параметров. Несмотря на существенную зависимость от эмпирических данных о физических свойствах грунтовой среды, этот подход позволяет осуществлять как выбор параметров поверхностного силового воздействия и рабочего органа уплотнителя, так и выявлять энергоэффективные режимы использования уплотняющих машин с технически ограниченными эксплуатационными характеристиками.

7. Использование энергоэффективных режимов работы катков при уплотнении грунтовых сред ведет к интенсификации технологических процессов в дорожном строительстве. Их определение требует описания взаимодействия РО уплотнителя с активной областью слоя, учета и контроля величин, определяющих

деформационные свойства среды.

8. Взаимодействие РО катка с уплотняемой средой существенно зависят от влажности (доли содержащейся воды) в грунте, что заставляет осуществлять подбор оптимальных по энергоэффективности режимов работы катка с учетом этого важного фактора.

9. Толщина уплотняемого грунтового слоя является, с одной стороны величиной, определяющей производительность катка, а с другой накладывает требования на режимные параметры работы катка, ограничивая их рациональными значениями, для проработки всего слоя с требуемой интенсивностью.

11. Интенсификация и повышение эффективности работы катков при уплотнении грунтов, в том числе и их энергоэффективности, требуют адаптирования уплотняющего воздействия в соответствии с изменяющимся комплексом характеристик среды при работе катка. Анализ экспериментальных и теоретических исследований выявил ряд способов адаптирования параметров, позволяющих повысить интенсивность работы дорожных катков:

- адаптирование по контактному давлению может проводиться как изменением величины силы воздействия, так и изменением величины площади контакта (в случае деформируемых РО);
- 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 повышенной эффективностью и качеством передачи грунтовой среде энергии уплотнителя.

### ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА УПЛОТНИТЕЛЯ С АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ СРЕДЫ

#### 3.1 Модели взаимодействия рабочих органов уплотняющих дорожных машин с упруговязкопластичной средой.

При работе дорожных катков большинство дорожно-строительных материалов, в том числе и грунты земляного полотна, могут считаться обладающими упругими, вязкими и пластическими свойствами [48]. Грунты, применяемые в дорожном строительстве, представляют собой многокомпонентные (многофазные) распределенные механические системы, обладающие сложной структурой, свойства которых существенно различаются не только для разных типов грунта, но и в рамках грунта одного типа в зависимости от параметров, определяющих характеристики грунта. К этим параметрам относится гранулометрический состав, количество жидкой фазы и ее тип, текущая плотность. Динамическое воздействие приводит к изменению характеристик грунта, приводя в первую очередь к легко регистрируемому возрастанию плотности (уплотнению), в результате чего повышается прочность грунта [151].

Воздействие при работе дорожных катков на упруговязкопластичную среду осуществляется рабочими органами и характеризуется величиной внешней силы, площадью контакта рабочего органа со средой, скоростью, временем приложения силы и ее направлением. Основным параметром, определяющим эффективность внешнего воздействия при уплотнении, традиционно выступает величина контактного давления.

Таким образом, математическое моделирование взаимодействия рабочих органов катков с упруговязкопластичными средами с должно учитывать изменение характеристик сред, сопряженное с уплотнением.

Деформирующие воздействия рабочих органов катков на сплошные среды

(непрерывные тела) и явления, в том числе и связанные с текучестью, изучают с точки зрения общих подходов в рамках реологии. Реология предполагает наличия у всех сред (тел) под воздействием нагрузки четырех свойств – упругости (жесткости), вязкости, пластичности и прочности. Все эти свойства проявляются у деформируемых тел одновременно, однако, в различной степени в зависимости от состояния тела и режима приложения нагрузки.

Механическими характеристиками грунтов, как упруговязкопластичных сред, используемыми при описании их взаимодействия с рабочими органами уплотнителей выступают: для жесткости модуль деформации (упругой – модуль Юнга и неупругой – модуль пластической деформации), для вязкости – коэффициент вязкости, для прочности – предел прочности, для пластичности – предел упругости, нелинейные свойства характеризует предел пропорциональности между напряжением и относительной деформацией [53].

Модельное рассмотрение грунта при взаимодействии с ним РО катка как сплошной упруговязкопластичной среды возможно с применением ряда простых элементарных моделей, отвечающим различным реологическим характеристикам, при помощи которых могут быть построены более сложные структуры, описывающие механические свойства среды с учетом приближений и степени подробности, выбранными при формулировании основных положений модели.

Рассмотрение взаимодействия РО катка с упруговязкопластичной грунтовой среды предполагает представление ее в виде системы с сосредоточенными параметрами, реализующими деформационные и реологические характеристики среды, описывающее ее взаимодействие с рабочими органами уплотняющих дорожных машин. Это приближение является приемлемым для описания напряженно-деформируемого состояния деформируемых слоев грунта под воздействием быстро меняющихся нагрузок с периодическим чередованием процессов нагружения и разгрузки. Моделирование предполагает следующие этапы:

1. Построение модели активной области деформируемой упруговязкопластичной

грунтовой среды, взаимодействующей с РО дорожного катка;

2. Определение параметров модели в зависимости от характеристик материала слоя и параметров дорожной машины;

3. Описание изменения модели деформируемой среды в зависимости от стадии процесса уплотнения и режима работы дорожного катка.

Основными элементарными моделями, описывающими процессы, происходящими при взаимодействии рабочих органов дорожных катков с упруго-вязкопластичными средами, находящимися в напряженно-деформированном состоянии и их отклик на внешнее динамическое воздействие являются элементарные и составные тела и их комбинации:

- 1) Тело Гука (H)
- 2) Тело Ньютона (N)
- 3) Тело Сен-Венана (Кулона)(StV)
- 4) Тело Максвелла ( $M = N-H$ )
- 5) Тело Фойгта ( $F = N|H$ )
- 6) Тело Прандтля ( $Pr = H - StV$ )
- 7) Тело Бингама (Бингама-Шведова)

Существует также большое количество более сложных комбинированных моделей, созданных для описания поведения различных сред (тел) со свойствами, не подчиняющимися приближениям элементарных моделей. К таким телам (средам) относятся суспензии, эмульсии, грунты, пластмассы, полимерные материалы, пищевые продукты, объекты сложной структуры – ткани и т. д.

В монографии [41] приведен, однако, без подробного качественного анализа, ряд реологических моделей применительно к работе катков при уплотнении асфальтобетонных смесей, обладающих специфическими характеристиками, отличающих их от природных грунтов, в частности, зависимостью свойств от температуры, которую необходимо учитывать особо.

Отдельно стоит отметить, что частицы грунтовой среды, перегруппировываясь при воздействии РО катка, образуют больше межчастичных



связей, в результате чего грунт упрочняется. Кроме этого сами, частицы грунта деформируются, что также приводит к образованию новых связей и повышению жесткости и прочности грунта. Другим фактором, обязательным при учете описания неупругих деформаций грунтов при уплотнении, является выдавливание жидкости из межчастичного пространства уплотняемого объема грунта. Этот процесс существенно влияет на характер протекания уплотнения грунта при превышении предела текучести. Однако при напряжениях, превышающих предел прочности, образованные связи разрушаются и грунт снова переходит в разуплотненное состояние [143]

3.2 Математическая модель взаимодействия рабочего органа уплотняющей машины с упруговязкопластичной средой в рамках подхода сосредоточенных параметров.

3.2.1 Обоснование модели взаимодействия РО катка с грунтовой средой, представленной в виде системы конечного числа элементарных столбов с эквивалентными реологическими характеристиками.

Основным шагом при описании взаимодействия РО катка со средой, находящейся в НДС, является выбор адекватной реологической модели, отражающей реальную среду и зависимости величин, характеризующих ее деформирование.

В первую очередь это зависимости смещения частиц грунта и их скорости от развивающихся в грунтовой среде напряжений. При воздействии РО катка использование единственной реологической модели для описания поведения всей толщи грунта оказывается недостаточным в силу различных механизмов сил сопротивления деформированию среды по толщине уплотняемого слоя.

Тем более невозможно использовать одну и ту же модель для описания поведения грунтовой среды на всем протяжении работы катка по уплотнению

среды в силу изменения ее деформативных свойств и реакции на внешнее воздействие за счет упрочнения грунта при уплотнении.

Предлагается описывать взаимодействие РО катка и грунтовой среды моделью, структура которой эволюционирует в ходе уплотнения (Рис. 3.1).

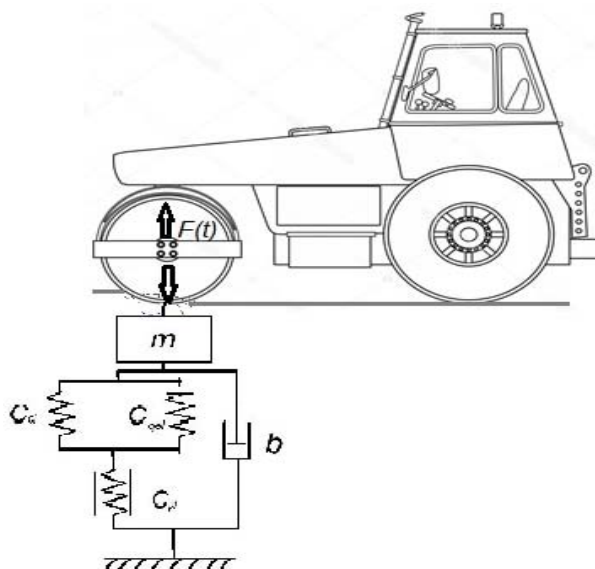


Рисунок 3.1 – Схема взаимодействия РО с грунтовой средой при работе дорожного катка

В зависимости от того, как выполняется для участка грунтовой среды, с которой взаимодействует РО, условие (2.1), для него реализуется определенный тип элементарной механо-реологической модели. Конкретный тип модели определяется по кривой «напряжение – относительная деформация» для заданного типа грунта.

При этом моделью должны учитываться пластические свойства грунта, определяющие величину и характер обратимости деформаций, а также неизотропные упругие свойства

Напряжение в упруговязкопластичной грунтовой среде в таком случае может быть в самом общем виде представлено как

$$\sigma_{el-pl} + \sigma_v = \sigma(t), \quad (3.12)$$

где  $\sigma_{el-pl}$  – напряжения, обусловленные упругими и неупругими деформациями различной природы, Па. Они обеспечиваются реализациями реологической модели Гука, реологической моделью Сен-Венана в зависимости от величины

реализованного в среде напряжения, обеспеченного поверхностным силовым воздействием.  $\sigma_v$  – напряжения, обусловленные вязким сопротивлением грунтовой среды деформированию, Па (реологическая модель Ньютона в линейном случае).

При взаимодействии РО катка с приповерхностным слоем грунта, напряжения определяются только параметрами внешнего воздействия, обуславливающими контактное давление, для областей грунта, лежащих в его глубине, величина напряжений определяется с учетом их распределения по толщине грунта как результата передачи силы посредством взаимодействия его слоев. При этом напряжения убывают в слое в силу увеличения потерь энергии деформирующего воздействия с глубиной слоя.

Реологическое уравнение упруговязкопластичной среды запишется в виде

$$E_d \varepsilon \Theta(\sigma_{fl} - \sigma) + \Theta(\sigma - \sigma_{fl}) \text{sign}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) \sigma_{fl} + \eta \frac{d\varepsilon}{dz} = \sigma(t), \quad (3.13)$$

где  $E_{qel}$  – модуль упругости среды, проявляющийся при нагружении и отсутствующий при разгрузке, Па;

$E_d = \left( \frac{E_{pl}(E_{el} + \Theta(\sigma)E_{qel})}{E_{pl} + \Theta(\sigma - \sigma_{el})(E_{el} + \Theta(\sigma)E_{qel})} \right) \Theta(\sigma - \sigma_{pl}) + \Theta(\sigma_{pl} - \sigma)E_{pl}$  – модуль деформации среды, Па;  $\Theta$  – функция Хевисайда,  $\Theta(x) = (\text{sign}(x) + 1) / 2$ ;  $\eta$  – вязкость среды, Нс/м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – относительная деформация среды в точке наблюдения;  $m$ ;  $\sigma$  – напряжения, возникающие в среде. Под действием всех приложенных в точке сил, Па;  $\sigma_{fl}$  – напряжения предела текучести среды, Па;  $\sigma_{pl}$  – напряжения предела пластичности среды, Па;  $\sigma_{el}$  – напряжения предела упругости среды, Па; знак производной  $\dot{\sigma}(t)$  определяет нагружению или разгрузке подвергается уплотняемая среда [127].

Взаимодействие РО со грунтовой средой возникновении в ней деформации сжатия. При этом масса деформируемой области грунтового слоя испытывает смещения, которые нельзя не учитывать как фактор, влияющий на интенсивность

уплотнения. Уравнение (3.13) предполагает среду безмассовой и этот фактор не учитывает, что делает затруднительным применение к задаче подхода конечных элементов. Это обусловлено наличием пластических деформаций и существенной нелинейных зависимостей характеристик грунтовой среды от величины текущей деформации и от предыстории уплотнения (накопленной средой пластической деформации). Таким образом, возникает необходимость решения динамической задачи уплотнения, для которой в уравнение движения будут входить не только члены, включающие величины смещений и скоростей, но и ускорений массы уплотняемой области – член, учитывающий инерционную силу сопротивления.

Особенность поверхностного взаимодействия РО с деформируемым грунтом состоит в том, что подверженная уплотняющему воздействию область грунтового слоя отвечает на него как объект неизвестной внутренней структуры, но обладающий зависящими от характера внешнего воздействия интегральными физико-механическими характеристиками – жесткостью, вязкостью и пластичностью, которые требуют теоретического и экспериментального исследования.

Известно, что динамические циклические режимы воздействия РО на грунтовые среды – вибрационное уплотнение и вибротрамбование происходят при частотах воздействия, лежащих в диапазоне 20-100 Гц. Это, с учетом толщины уплотняемых слоев, составляющей 0.2-0.8 м, позволяет считать деформационные процессы, происходящие в слоях уплотняемой упруговязкопластичной среды квазистационарными.

Учет вышеперечисленных факторов делает возможным применение подхода сосредоточенных параметров, при котором взаимодействие РО происходит со средой, представляемой в виде последовательно соединенных взаимодействующих слоев (столбов), каждый из которых обладает различными деформационными свойствами и, как следствие, характеристиками. РО воздействует на грунт, ограниченным определенным объемом, который активно взаимодействует с уплотнителем и реализует область накопления пластических

деформаций. На приповерхностный слой активной зоны действует внешняя сила со стороны рабочего органа, изменяющаяся с дальнейшим распространением напряжений по глубине слоя. Форма и размер каждого слоя (столба) определяются распределением напряжений в глубине слоя грунтовой среды.

В рамках такого подхода для каждой из сосредоточенных масс элементарных столбов в линейном приближении выполняется следующее уравнение движения

$$m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} + b_i \frac{dz_i}{dt} + c_{di} (\Theta(\sigma_{fl} - \sigma)) z_i + \Theta(\sigma_{fl} - \sigma) F_{fl} = F_i(t) \quad (3.14)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го элемента, кг,  $b_i$  – жесткость  $i$ -го элемента, Нс/м,  $c_{di}$  – жесткости по отношению деформированию с силой, пропорциональной деформации, Н/м,  $F_{fl}$  – постоянная сила пластического деформирования для слоя при достижении напряжением предела текучести, Н,  $F_i(t)$  – внешняя сила, действующая на  $i$ -ую элементарную область грунта, Н.

Известно, что характеристики  $i$ -го слоя активной зоны зависят от условий нагружения, размера и формы пятна контакта, а также исходного состояния слоя, не являясь константами. Такая форма уравнения движения является оригинальным результатом и позволяет описать процесс деформирования упруговязкопластичной грунтовой среды, находящейся в НДС, при уплотнении внешним воздействием.

Полная деформация слоя, вызванная взаимодействием РО с ним, определяется как сумма величин деформации для каждого из последовательно взаимодействующих элементарных объемов грунта.

Характер взаимодействия катка с грунтом, определяется видом отклика каждого из слоев грунта, который задается тем, в каком состоянии находится материал столба. Тем самым можно построить иерархию реологических моделей (тел), реализующих упруговязкопластичный уплотняемый грунт на различных этапах уплотнения в зависимости от того, как в толщу грунта передается контактное давление со стороны РО.

Работа катка, даже в случае статического режима уплотнения, считается

циклическим процессом (циклом уплотнения может считаться проход катка по одному следу). В случае работы вибрационного катка цикличность процесса очевидна и уплотнение происходит в результате накопления пластических деформаций на каждом цикле (если они имеют место), так что суммарная деформация составит

$$z = \sum_{k=1}^n z_k, \quad (3.15)$$

где  $n$  – количество циклов уплотнения (проходов статического катка, циклов вибраций или трамбования).

Работа катка по уплотнению грунта считается завершенной в случае выполнения условия достижения нормативной плотности для всего объема уплотняемого грунта

$$K_{\text{унорм}} = \rho_0 / \rho_{\text{конеч}} = (h_0 - z) / h_0, \quad (3.16)$$

где  $h_0$  – начальная толщина грунтового слоя, м;  $\rho_0$  – начальная плотность деформируемой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{конеч}}$  – конечная (нормативная) плотность среды, кг/м<sup>3</sup> [127].

Из значения для полной неупругой деформации (3.15) можно и условия (3.16) можно получить условие для необходимого числа циклов внешнего воздействия, необходимого для завершения процесса уплотнения.

Также можно оценить скорость уплотняющей машины, необходимую для достижения нормативной плотности при заданном количестве проходов как для статического уплотнения, так и для динамических режимов.

Полная система уравнений движения многомассовой модели взаимодействия РО дорожного катка со средой является результатом применения лагранжева формализма классической механики к описанию движения системы «рабочий орган - деформируемый объем среды» с учетом действия внешней силы, диссипации и зависимости характеристик РО и среды от их деформации.

В рамках формализма Лагранжа решение задачи может производиться следующим образом. Полная функция Лагранжа системы «рабочий орган -

деформируемый объем среды», в рамках трехмассовой модели, с учетом действия вынуждающей силы, диссипации и зависимости характеристик рабочего органа и среды от величины деформации может быть записана [127].:

$$\begin{aligned}
 L(z_{po}, z_1, z_2, z_3, \dot{z}_{po}, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, t) &= \frac{M(\dot{z}_{po})^2}{2} + \frac{m_1(\dot{z}_1)^2}{2} + \frac{m_2(\dot{z}_2)^2}{2} + \frac{m_3(\dot{z}_3)^2}{2} - \\
 &\frac{c_1(z_{po})(z_{po} - z_1)^2}{2} - \frac{c_2(z_{po}, z_1)(z_1 - z_2)^2}{2} - \frac{c_2''(z_{po}, z_2)(z_2 - z_3)^2}{2} - \\
 &\frac{c_2'''(z_{po}, z_3)(z_3)^2}{2} - (z_{po})F_\delta(t) + m_1gz_1 + m_2gz_2 + m_3gz_3; \\
 D(z_{po}, z, \dot{z}_{po}, \dot{z}) &= \frac{b_1(z_{po})(\dot{z}_{po} - \dot{z}_1)^2}{2} + \frac{b_2(z_{po}, z)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)^2}{2} + \\
 &+ \frac{b_2''(z_{po}, z_2)(\dot{z}_2 - \dot{z}_3)^2}{2} + \frac{b_2'''(z_{po}, z_3)(\dot{z}_3)^2}{2}, \tag{3.17}
 \end{aligned}$$

где  $D(z_{po}, z, \dot{z}_{po}, \dot{z})$  - диссипативная функция;  $z_{po}, z$ , - величины деформации грунта и рабочего органа, определяемые как смещения из состояния, соответствующего устойчивому равновесию системы, которое рассматривается как состояние с накопленной пластичной деформацией в результате уплотнения [127].

Уравнение (3.17) учитывает также вязкость и жёсткость рабочего органа, которые зависят только от его деформации, в то время как эти параметры для деформируемого объема грунта зависят от деформации рабочего органа как функции величины пятна контакта. Уравнения движения Эйлера-Лагранжа в этом случае будут выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \frac{\partial L(z_{po}, z_1, z_2, z_3, \dot{z}_{po}, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, t)}{\partial \dot{z}_{po}} &= \\
 = \frac{\partial L(z_{po}, z_1, z_2, z_3, \dot{z}_{po}, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, t)}{\partial z_{po}} - \frac{\partial D(z_{po}, z_1, z_2, z_3, \dot{z}_{po}, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, t)}{\partial \dot{z}_{po}}, \\
 \frac{d}{dt} \frac{\partial L(z_{po}, z_1, z_2, z_3, \dot{z}_{po}, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, t)}{\partial \Delta \dot{x}_1} &= \\
 = \frac{\partial L(z_{po}, z_1, z_2, z_3, \dot{z}_{po}, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, t)}{\partial z_2} - \frac{\partial D(z_{po}, z_1, z_2, z_3, \dot{z}_{po}, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, t)}{\partial \dot{z}_1}, \\
 \dots &
 \end{aligned} \right.$$

Рассмотрение РО, обладающего упругими и вязкими свойствами, позволяют более точно исследовать энергоэффективность уплотнения, принимая во внимание рассеяние энергии в РО, а в случае жесткого РО – в подвеске уплотняющей машины. Учитывая, что вязкость и жёсткость РО зависят только от его деформации (в то время, как эти параметры деформируемого объема грунта зависят от деформации РО), могут быть записаны уравнения движения Эйлера-Лагранжа, и получено уравнение движения для уплотняемого объема среды [127].:

$$\begin{aligned}
 & m\ddot{z} + b_2(z_{po}, z)\dot{z} - b_2(z_{po}, z)(\dot{z}_{po} - \dot{z}) + c_2(z_{po}, z)z - c_1(z_{po}, z)(z_{po} - z) + \\
 & + \frac{\partial c_1(z_{po}, z)}{\partial \Delta x} \frac{(z_{po} - z)^2}{2} + \frac{\partial b_1(z_{po}, z)}{\partial \dot{z}} \frac{(\dot{z}_{po} - \dot{z})^2}{2} + \\
 & + \frac{\partial c_2(z_{po}, z)}{\partial z} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \frac{\partial b_2(z_{po}, z)}{\partial \dot{z}} \frac{\dot{z}^2}{2} = F_{ext}(t).
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Решение этого уравнения, являющегося нелинейным, крайне затруднительно. Предполагаем зависимости вязкости и жесткости от координат слабыми по сравнению с зависимостями координат от времени. Пренебрегая членами, содержащими производные вязкости и жесткости по координатам, примем

$$\frac{\partial c_1(z_{po}, z)}{\partial z} \frac{(z_{po} - z)^2}{2} + \frac{\partial b_1(z_{po}, z)}{\partial \dot{z}} \frac{(\dot{z}_{po} - \dot{z})^2}{2} + \frac{\partial c_2(z_{po}, z)}{\partial z} \frac{z^2}{2} + \frac{\partial b_2(z_{po}, z)}{\partial \dot{z}} \frac{\dot{z}^2}{2} = 0$$

Представленная модель является следствием рассмотрения системы многих тел в рамках лагранжева формализма классической механики

$$\begin{cases}
 M\ddot{z}_{po} + b_1(\dot{z}_{po} - \dot{z}_1) + c_1(z_{po} - z_1) = F_{ext}(t); \\
 m_1\ddot{z}_1 + b_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_2(z_1 - z_2) - b_1(\dot{z}_{po} - \dot{z}_1) - c_1(z_{po} - z_1) = m_1g; \\
 m_2\ddot{z}_2 + b_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) - b_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_2(z_2 - z_3) - c_2(z_1 - z_2) = m_2g; \\
 m_3\ddot{z}_3 + b_2(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - b_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + c_2(z_3 - z_2) - c_2(z_2 - z_3) = m_3g,
 \end{cases} \tag{3.19}$$

где  $z_{po}$  – деформация РО, м;  $c_1$  – жёсткость РО, Н/м;  $b_1$  – коэффициент вязкого трения РО, Нс/м;  $M$  – масса, приходящаяся на РО катка, кг;  $\Delta x_i$  – деформация соответствующего элементарного столба среды, м;  $m_i = \rho_i V_i$  – приведенная масса соответствующего элементарного столба среды, кг;  $\rho_i$  – плотность соответствующего элементарного столба, кг/м<sup>3</sup>;  $V_i$  – объём соответствующего



элементарного столба,  $m^3$ ;  $h_0$  – толщина уплотняемого слоя среды, м;  $S$  – площадь пятна контакта,  $m^2$ ;  $c_{2i}$  – жёсткость соответствующего элементарного столба среды, Н/м;  $b_{2i}$  – коэффициент вязкого трения соответствующего элементарного столба, Нс/м;  $F_d(t)$  – внешняя периодическая сила, Н [97].

Поскольку интерес представляет смещение РО, с учетом гармонического характера внешней силы, модель описывает вынужденные колебания системы около положения равновесия аналогично процессам для недеформируемого РО уравнением движения:

$$m\ddot{z} + b_2(z_{po}, z)\dot{z} + c_2(z_{po}, z)z = F_{ext}(t). \quad (3.20)$$

Приведенный подход можно реализовать в том случае, когда зависимости для жесткостей и вязкостей среды известны. Кроме этого, распределение масс областей и последовательных глубин их залегания должно быть определено на начальном этапе моделирования.

### 3.2.2 Математическая модель взаимодействия РО катка с упруговязкопластичной грунтовой средой

Рассмотреть особенности взаимодействия РО с деформируемой средой позволяет модель, построенная в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров, учитывающего особенности развития напряженно-деформированного состояния в слое при квазистационарном взаимодействии РО катка с упруговязкопластичной средой. В его рамках рабочий орган взаимодействует с областью грунта, представляемой совокупностью конечного числа взаимодействующих масс, обладающих упругими, вязкими и пластическими свойствами. Также предлагаемый подход принимает во внимание изменение с величиной деформации массы активной области грунта, на которую непосредственно воздействует РО. Это может иметь место в случае деформируемого рабочего органа, а также жесткого рабочего органа цилиндрической формы, когда форма пятна контакта не может считаться плоской. Решение указанной задачи можно построить в рамках Лагранжева формализма

классической механики, позволяющего учесть связи и наличие диссипативных сил, с дальнейшим обобщением на силы сухого трения, реализующиеся при пластическом деформировании области уплотняемой среды. Преимуществами предлагаемого подхода является возможность более точного учета характеристик грунтовой среды и естественность выбора величин активных деформируемых областей слоя. При этом возможным становится рассмотрение задачи, учитывающее неоднородность развития в слое напряженно-деформированного состояния при взаимодействии рабочего органа дорожного катка со средой [99].

Аналогичный подход был развит в работе [96] в случае постоянного размера пятна контакта и величин областей грунтового слоя, выбираемых исследователем произвольно. При этом были достаточно точно выявлены закономерности процесса вибрационного уплотнения грунтового слоя рабочим органом изменяемой жесткости, подтвержденные экспериментально [127]. Более детальный анализ требует обобщения подхода к задаче о взаимодействии РО с активной областью слоя, что позволит расширить спектр зависимостей силы РО от времени, выявив наиболее эффективные с точки зрения накопления необратимых деформаций средой эксплуатационные режимы катка, максимально учитывающие эволюцию характеристик слоя грунтовой среды с увеличением ее плотности [99].

В качестве исходного приближения рассмотрим описание взаимодействия рабочего органа с единственным участком среды, обладающим жесткостью, вязкостью и массой, сосредоточенной в его центре тяжести, а также с возможностью перехода к пластическому деформированию при достижении внешней силой известного значения, определяемого предельными параметрами грунтовой среды. Характеристики участка среды – прорабатываемой РО катка области предполагаются непостоянными и зависящими от текущего значения величины деформации слоя, в общем случае, нелинейным образом. Кроме этого, модель должна учитывать наследственный характер взаимодействия РО со средой, зависящий от режима работы катка в предшествующие моменты времени. Это достигается с помощью функциональных зависимостей для модулей упругости, деформации и коэффициента динамической вязкости среды от

плотности, которой обладает среда к заданному моменту времени. Традиционно эти характеристики выбираются зависящими от безразмерного коэффициента уплотнения среды. Это позволяет не конкретизировать тип среды, ее гранулометрический состав, учитывая, однако, содержание воды [99]. Проводить описание взаимодействия РО со средой, используя в качестве координаты коэффициент уплотнения, в рамках предлагаемого подхода нецелесообразно в силу нескольких факторов [99]:

- коэффициент уплотнения является интегральной характеристикой всего времени работы катка, завися от полной величины накопленной грунтовым слоем пластической деформации за всю предшествующую историю уплотнения;
- значение текущего коэффициента уплотнения для активной области грунтового слоя сложным образом зависит от величины деформации в заданный момент времени, что существенно усложняет уравнения, получающиеся в результате моделирования;
- коэффициент уплотнения является величиной, которую практически невозможно измерить непосредственно в реальном времени при проведении экспериментальной проверки результатов моделирования [99].

Рабочий орган катка будем рассматривать также в рамках подхода сосредоточенных параметров, считая в общем случае обладающим конечными жесткостью и вязкостью, также нелинейно зависящей от величины деформации. Переход к жесткому рабочему органу при этом не представляет сложности. Предложенный подход позволяет органично включить в рассмотрение действие на грунт при уплотнении со стороны рамы дорожной машины и ее подвески [99].

Уравнения, определяющие динамику взаимодействия РО катка с активной областью грунтового слоя будут вытекать из принципа наименьшего действия как соответствующие уравнения Эйлера-Лагранжа [79] для одномерного движения материальной точки, моделирующей сосредоточенную массу активной области. Этот подход позволяет реализовать как диссипативные силы вязкого трения, возникающие при движении грунта, так и силу сухого трения, описанным в [72].

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial T}{\partial z} = F(z, \dot{z}, t) + F_{mp}, \quad (3.21)$$

где  $T(z, \dot{z}) = \frac{m(z)\dot{z}^2}{2}$  - кинетическая энергия активной области грунта,  $F(z, \dot{z}, t)$  - силы, действующие на грунт, как внешние, обусловленные внешним динамическим нагружением со стороны рабочего органа, так и внутренние силы упругости и вязкого трения,  $F_{mp}$  - отдельно выделенная сила трения, моделирующая элемент пластичности, включающийся при превышении контактным напряжением величины, определяемым пределом текучести грунта [99]. При переходе к пластическому деформированию упругая составляющая силы сопротивления исчезает, так что сила сопротивления становится постоянной. Обобщенная координата  $z$  представляет собой смещение по отношению к положению равновесия центра масс активной области, функционально связанное со смещением поверхности слоя при динамическом воздействии [99].

Отличие предлагаемого подхода от использованного в предшествующих исследованиях, выступает рассмотрение динамики массы эффективного объема грунта с деформированием, вызванное изменением площади пятна контакта из-за деформации рабочего органа, что имеет место, например, в случае пневмошинных вальцов, или, вызванное не только изменением площади пятна контакта, но и изменением ее формы, как в случае рабочего органа конечного радиуса кривизны. В этом случае правая часть выражения (3.21) с учетом принятых допущений примет вид

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{d}{dt} (m(z)\dot{z}) - \frac{\partial m(z)}{\partial z} \frac{\dot{z}^2}{2} = m(\dot{z})\ddot{z} + \frac{\partial m(\dot{z})}{\partial \dot{z}} \frac{\dot{z}^2}{2}, \quad (3.22)$$

демонстрируя большую общность по сравнению с уравнением движения для активной области постоянной массы, построенного в [93]. Даже в том случае, если масса активной области слоя грунтовой среды изменяется с деформацией слабо, так что производной по координате можно пренебречь, собственно

зависимость массы от смещения, достаточно сложная даже в простых ситуациях, усложняет уравнение движения. Примером этого может служить случай жесткого вальца в форме цилиндра, рассмотрение взаимодействия которого с грунтовым слоем имеет широкое практическое приложение.

Упругая или квазиупругая сила сопротивления слоя упруговязкопластичной среды при поверхностном нагружении также предполагается в общем случае нелинейной по деформации. Нелинейная зависимость силы от деформации моделируется зависящей от величины смещения жесткостью грунта

$$F_{уп} = c(z)z, \quad (3.23)$$

остающейся главной линейной частью по малому смещению  $z$  при вычислении силы в потенциальном поле упругости в лагранжевом формализме

$$U_{уп} = \frac{c(z)z^2}{2}, \quad (3.24)$$

которая дает в общем случае выражение

$$F_{уп} = c(z)z + \frac{\partial c(z)}{\partial z} \frac{z^2}{2}, \quad (3.25)$$

переходящее в (3.23) при слабой зависимости жесткости эффективного объема от смещения и возможности пренебречь вторым слагаемым.

Дальнейшее моделирование упругих свойств грунтовой среды, деформируемой дорожным катком, требует учета следующих экспериментальных фактов:

1) В зависимости от характера нагружения упругие свойства грунтового слоя изменяются – при разгрузке (убывании напряжений, обусловленных внешними силами) сила сопротивления зависит только от упругой составляющей модуля деформации, а при нагружении – от модуля полной деформации. Отметим, что для применяемых в дорожном строительстве супесчаных и суглинистых грунтов доля упругой деформации составляет в полной деформации долю от 0.1-0.3 до 1 [149].

2) После снятия деформирующего воздействия грунтовый слой не испытывает

растяжения.

Эти свойства можно учесть при моделировании, введя для описания упругих свойств грунтовой среды следующие соотношения:

$$\sigma_{def} = E\varepsilon, \quad E = \left( \left( \frac{E_{pl}(E_{el} + \Theta(\sigma)E_{gel})}{E_{pl} + \Theta(\sigma - \sigma_{el})(E_{el} + \Theta(\sigma)E_{gel})} \right) \Theta(\sigma - \sigma_{pl}) + \Theta(\sigma_{pl} - \sigma)E_{pl} \right) (1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})), \quad (3.26)$$

где  $E_{pl}$  - модуль пластической деформации среды слоя,  $E_{el}$  - модуль упругой деформации среды слоя,  $\dot{\sigma}$  - скорость нарастания напряжений, характеризующая нагружение,  $\theta(z)$  -  $\theta$  - функция Хевисайда,  $\sigma_{pl}$  - предел пластичности среды слоя.

Для перехода к сосредоточенным элементам это эквивалентно переходу к силе сопротивления и жесткостям для пластической и упругой деформации [107]:

$$F_{def} = c(z)x, \quad c(z) = \left( \left( \frac{c_{pl}(c_{el} + \Theta(\sigma)c_{gel})}{c_{pl} + \Theta(\sigma - \sigma_{el})(c_{el} + \Theta(\sigma)c_{gel})} \right) \Theta(\sigma - \sigma_{pl}) + \Theta(\sigma_{pl} - \sigma)c_{pl} \right) (1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) \quad (3.27)$$

Способы вычисления сосредоточенных жесткостей для различных форм активной области и вида пятна контакта приведены ниже. Следует указать, что жесткости вычисляются таким образом, чтобы сила квазиупругого сопротивления зависела от смещения центра масс активной области, а не от смещения поверхности грунта [101].

Вязкое сопротивление активной области грунтовой среды, моделируемое элементом вязкого трения, описывается определяющим соотношением:

$$\sigma_{visc} = \eta \dot{\varepsilon}, \quad (3.28)$$

приводящим к известному выражению для сосредоточенной вязкости

$$F_{visc} = b(z)\dot{z}, \quad (3.29)$$

причем необходимо отметить, что зависимость от смещения поверхности грунтового слоя, и, соответственно, от смещения его центра масс у сосредоточенной вязкости выражена слабо. Это объясняется тем, что площадь боковой поверхности активной области, от которой зависит сила вязкого трения, при смещении поверхности грунтового слоя меняется медленно.

Взаимодействие РО со средой, приводящее к пластическому деформированию без восстановления при неизменной силе воздействия имеет место при превышении контактным напряжением значения предела текучести, характерного для заданного состояния упруговязкопластичной среды слоя. В рамках представляемой модели необходимо ввести в систему сосредоточенных параметров, описывающих активную область деформируемой среды элемент сухого трения, порождающего при условии [101]

$$\sigma(t) \geq \sigma_{pl}, \quad (3.30)$$

где  $\sigma(t)$ - текущее значение контактного давления, постоянную силу сопротивления, не зависящую от величины деформации с одновременным прекращением действия упругих или квазиупругих сил (3.26), (3.27). Для той области грунтового слоя, в которой условие (3.30) выполняется, сила сопротивления может быть представлена в виде

$$F_{fr}(t) = S_{cont}(t)\sigma_{pl},$$

где  $S_{cont}(t)$ - площадь пятна контакта рабочего органа уплотнителя и поверхности грунтового слоя.

Таким образом, уравнение движения участка активной области грунтового слоя в общем виде (3.20) может быть переписано с учетом модельных допущений, описанных выше [107]

$$\begin{aligned} m(t)\ddot{z} + \frac{\partial m(t)}{\partial t} \dot{z} = \\ = -(c_{def}(z))(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl}))z - b(z)\dot{z} - \frac{\dot{z}}{|z|} \theta(\sigma - \sigma_{fl})S_{cont}(t)\sigma_{fl} + F_{ext}(t). \end{aligned} \quad (3.31)$$

Здесь  $F_{ext}(t)$ - сила воздействия РО дорожного катка на поверхность грунтового слоя и является варьируемой для достижения максимальной эффективности уплотнения. С точки зрения подхода сосредоточенных параметров предлагаемая модель активной области грунтового слоя моделируется одномассовой конфигурацией, представляющей комбинацию нелинейного тела Ньютона, нелинейного тела Гука с зависимостью жесткости от характера поверхностного нагружения и тела Сен-Венана, как показано на Рис. 3.2 [101]. Построенная модель является удобной и эффективно иллюстрирует процесс

уплотнения для режимов работы катка при уплотнении грунтовых сред.

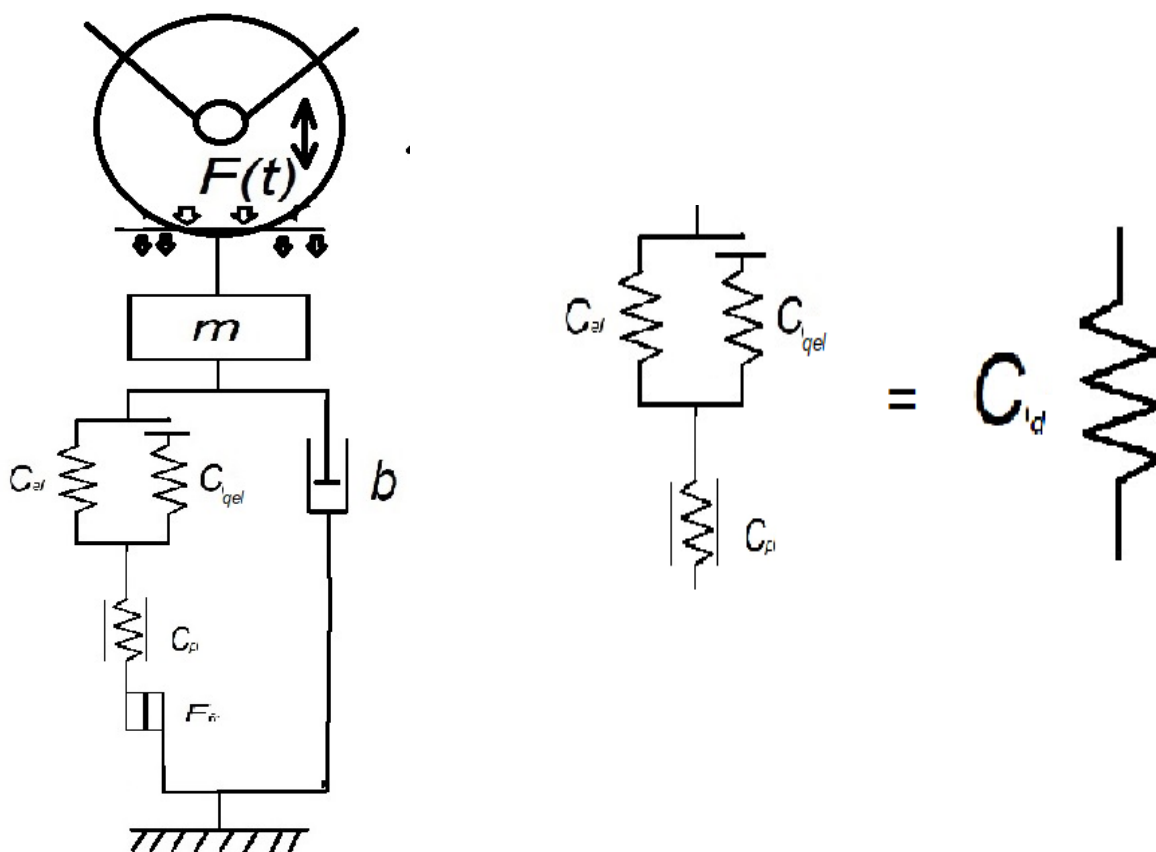


Рисунок 3.2 – Одномассовая модель активной области грунтового слоя при взаимодействии с рабочим органом уплотнителя и представление упруго-вязкопластически деформируемого элемента.

Однако более полное описание взаимодействия РО катка с уплотняемой средой требует привлечение многомассовых моделей, способных принять во внимание неоднородный характер деформирования материала и накопления им остаточных деформаций по толщине слоя. Они служат для более точного выявления связи передаваемой мощности уплотнителя слою среды с его пластическим деформированием.

Тем самым, для перехода к многомассовой модели, описанной в предыдущих главах, требуется дополнение, учитывающее различный характер послойного деформирования участков грунтовой среды. Многомассовая модель должна строиться с учетом развития напряженно-деформированного состояния участков грунтового слоя, лежащих на различной глубине [101].

Общий вид уравнения движения (3.31) для каждого из участков грунтовой



среды может быть модифицировано с учетом их взаимодействия и отклика на деформирующее воздействие.

Величинами, определяющими силу квазиупругого сопротивления последовательно взаимодействующих участков грунтового слоя, в таком случае будут не собственно смещения центров масс участков относительно начального положения, определяемого параметрами модели, а относительные смещения смежных слоев.

Схематичное описание многомассовой модели, характерной для представления взаимодействия активной области грунтового слоя с рабочим органом уплотнителя представлено на Рис. 3.16 [101].

Предложенная многомассовая модель порождает систему дифференциальных уравнений, требующую совместного решения для определения величины накопленной пластической деформации. Индекс РО относится к рабочему органу уплотнителя индексы 1,2,3 – к участкам активной области слоя грунта, находящегося под воздействием внешней силы [101].

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_2 + \frac{dm_1(t)}{dt}\dot{z}_1 = \\ = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) - b_1(z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl})S_{cont}(t)\sigma_{pl} \\ m_2(t)\ddot{z}_2 + \frac{dm_2(t)}{dt}\dot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl})S_{cont}(t)\sigma_{pl} - c_{2d}(z_2)(z_2 - z_3) - b_2(z_2 - z_3)(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) \\ m_3(t)\ddot{z}_3 + \frac{dm_3(t)}{dt}\dot{z}_3 = c_{2d}(z_2)(z_2 - z_3) - c_{3d}(z_3)z_3 - b_3(z_3)\dot{z}_3 \end{array} \right. \quad (3.32)$$

В этой системе уравнения для взаимодействия РО со средой отвечают последовательно рабочему органу, области грунта, испытывающей нагрузку, обеспечивающие механические напряжения, обеспечивающие пластические деформации без реализации упругой силы сопротивления, области грунта с различными упругими свойствами для нагружения и разгрузки, и области слоя с идентичными упругими свойствами для нагружения и разгрузки [101].

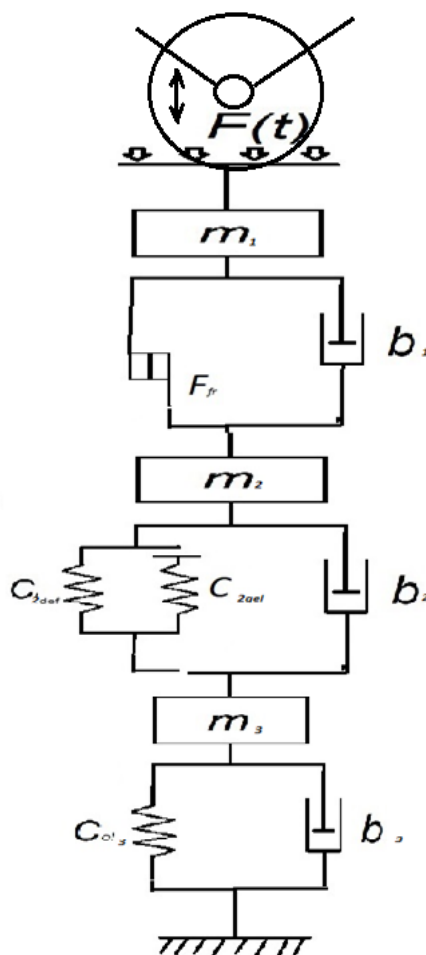


Рисунок – 3.3 Модель взаимодействия РО катка с грунтовой средой с тремя областями, отличающимися наличием и характером проявления пластических свойств

Система уравнений (3.32), описывающая модель с Рис. 3.3 является нелинейной и требует для своего решения применения численных методов. Следует отметить, что для исследования процесса взаимодействия РО со средой с накоплением пластических деформаций толщей слоя грунта при работе катка важную роль играет как смещение поверхности грунта при воздействии уплотняющего усилия, так и перераспределение характеристик участков активной области грунтового слоя. При этом интерес представляет не только величина пластической деформации, накопленная к заданному моменту времени, но и средняя за период приложения воздействия деформация, позволяющая определить скорость пластического деформирования [101]. Эта величина позволяет судить об эффективности работы катка и ее исследования в зависимости от характера режима внешнего воздействия и особенностей рабочего

органа позволяют сделать рекомендации по обоснованию выбора режимных параметров и характеристик рабочих органов уплотнителей.

Для решения системы (3.32) предлагается использовать алгоритм, учитывающий следующие физически обоснованные допущения [101].

1) Характеристики активной области уплотняемого грунта возможно вычислить, используя выражения, полученные в предыдущих параграфах [101].

2) Физико-механические и деформационные характеристики рамы уплотнителя, рабочего органа и вибровозбудителя считаются известными. Зависимость внешней силы  $F_{ext}(t)$  задана конструктивными и режимными параметрами уплотнителя.

3) Процессы в грунтовой среде будем считать квазистационарными, так что значение силы внешнего воздействия передается деформируемому слою без задержки на распространение. Для статических режимов нагружения такое приближение является допустимым без оговорок. Для случая вибрационного уплотнения предел применимости приближения лежит в диапазоне толщины слоев, небольших по сравнению с длиной волны упругих волн, возбуждаемых в толще грунта [101].

Ход реализации алгоритма решения можно представить в виде следующей блок-схемы, представленной на рисунке 3.17. Выбор шага по времени является важным ходом в процессе реализации разностной схемы, осуществляющей численное решение системы (3.32). Переход к конечным приращениям в рамках предложенной схемы можно построить традиционно [135], представив производные смещений первого и второго порядка в виде отношения конечных величин [101]

$$\dot{x}_i^{(k+1)} = \frac{x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}}{\Delta t}, \quad \ddot{x}_i^{(k+2)} = \frac{x_i^{(k+2)} - 2x_i^{(k+1)} + x_i^{(k)}}{\Delta t^2},$$

где верхний индекс задается номером интервала в разбиении по времени, отвечая соответствующему шагу разбиения, а нижний индекс - номеру сосредоточенной

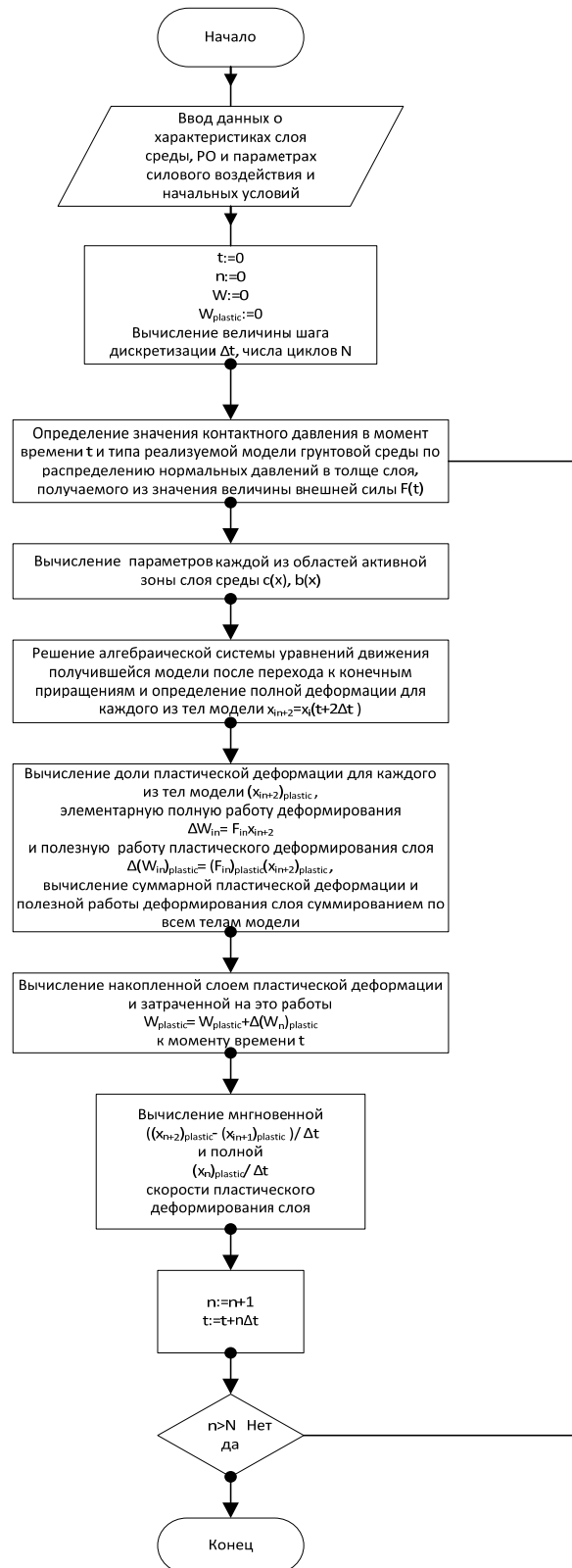


Рис. 3.4 Блок-схема разработанного алгоритма численного решения системы уравнений (3.32), описывающей уплотнение грунтового слоя при взаимодействии с рабочим органом уплотнителя

массы, соответствующей участку активной зоны уплотняемого грунта, характеристики которого зависят от типа реализуемой модели.

Производные входящих в систему величин по координатам (смещениям из положения равновесия), хотя и имеют достаточно сложный вид, но могут быть вычислены без особенных затруднений. При использовании для реализации численного алгоритма систем компьютерной алгебры задача упрощается.

Предлагаемый алгоритм можно описать, конкретизируя схему эволюционно модели грунтовой среды, следующим образом (область контакта рабочего органа со слоем грунта считаем плоской полосой) [101]:

- 1) На первом шаге задаются физико-механические характеристики рабочего органа и параметры режима работы катка по уплотнению слоя грунтовой среды, а также функциональные зависимости характеристик среды от плотности (коэффициента уплотнения);
- 2) Второй шаг предусматривает определение длины пятна контакта рабочего органа с поверхностью слоя и вычисления начального значения контактного давления, предшествующего моменту начала взаимодействия РО с грунтом;
- 3) По значению контактного давления вычисляется количество и физико-механические параметры участков активной зоны грунтового слоя, реализующих различные одномассовые модели;
- 4) Строится система уравнений (3.32) с учетом результатов, полученных в п.3;
- 5) Реализуется численная схема интегрирования системы (3.32), получающаяся переходом к конечным приращениям смещений, причем для каждого последующего момента времени (с учетом шага) производится вычисление параметров участков активной зоны слоя, позволяющее выявить динамику процесса;
- 6) Данные о величинах смещений участков активной зоны и их характере сохраняются;
- 7) Определяется накопленная к заданному моменту времени суммарная пластическая деформации грунтового слоя и вычисляется средняя скорость ее

накопления;

8) Пересчитываются характеристики среды грунтового слоя с учетом величины накопленной пластической деформации для перехода к следующему циклу воздействия (проходу дорожной машины) [101].

Реализация данного подхода сводит задачу к линейной, поскольку коэффициенты уравнений, способные содержать сложные зависимости от координат входят в уравнения системы, переопределяемые на каждом шаге, в качестве констант, значения которых вычисляются с учетом деформации участков активной области [101].

Помимо указанных величин, предлагаемый алгоритм, позволяет оценить энергоэффективность процесса уплотнения долей мощности, затрачиваемой на пластическое деформирование слоя.

Необходимо отметить, что помимо средней за цикл взаимодействия РО катка и грунта скорости накопления пластической деформации

$$\bar{v}_{pl}^{total} = \frac{\Delta x_{pl}^{total}}{\Delta t^{total}}$$

и ее абсолютного значения, в качестве измеряемой величины, показывающей эффективность уплотнения, может быть использована легко вычисляемая скорость накопления

$$v_{pl}^{(i)} = \frac{\Delta x_{pl}^{(i)}}{\Delta t_i},$$

определяемая на  $i$ -м шаге численного решения системы (3.32) как отношение неоднородной деформации, приобретаемой слоем на этом шаге к шагу по времени  $\Delta t_i$ , определенному при формулировании исходных условий. Эта скорость может быть измерена с использованием устройств непрерывного контроля укатки (уплотнения), широко применяемых для анализа хода протекания технологического процесса уплотнения в реальном времени [101].

### 3.3 Эволюционная модель взаимодействия рабочего органа уплотняющей машины с упруговязкопластичной грунтовой средой

Эффективность процесса уплотнения может быть оценена по затратам ресурсов, как материальных (ГСМ), так и времени и трудозатрат, требуемых для достижения нормативных значений плотности материала, соответствующих  $k_y = 0.98 - 1.0$ . Эта оценка, как правило, проводится по количеству проходов уплотняющей дорожной машины заданного типа/типов, требуемых для этого.

Работа катка приводит к повышению плотности среды вследствие накопления необратимых пластических деформаций. При этом механические характеристики уплотняемой среды с изменением плотности меняются, что заставляет решать оптимизационную задачу об адаптации режимных параметров катка к изменяющимся характеристикам среды для повышения эффективности процесса. Изменяется характер и временная зависимость отклика среды при взаимодействии РО катка с ней. Более того, в зависимости от значений контактных напряжений, а также напряжений в толще грунта, отклик грунта по глубине может также различаться, влияя на эффективность работы катка.

Изменение особенностей отклика грунта в ходе взаимодействия с РО катка и протекание последующей релаксации деформаций и напряжений делают невозможным применение одной и той же модели, описывающей грунт на всех этапах процесса уплотнения.

В ходе решения проблемы о выборе правильной модели для описания текущего этапа работы катка по уплотнению грунта, можно поставить в некотором смысле обратную задачу, представляющую значительно больший, с практической точки зрения, интерес. Это задача подбора режимных параметров работы катка для уплотнения – подбор характеристик силового воздействия, подходящего для того, чтобы перейти к такому развитию напряженно-деформированного состояния среды, которое обеспечивало бы наиболее интенсивное накопление неупругих деформаций при наиболее эффективной

передаче среде энергии уплотнителя и, как следствие, к соответствующей модели, это состояние описывающей. Кажущееся наиболее простым решение при этом – увеличение контактных напряжений, не является общим в силу условия о недопустимости превышении контактным давлением предела прочности грунта и перехода к его разрушению. Проблема анализа и выбора факторов, влияющих на процесс уплотнения рассматривалась В.Ф.Бабковым, В.И. Баловневым, О.Т.Батраковым, Н.Н. Ивановым, Я.А.Калужским, В.Б.Пермяковым, Н.Я.Хархутой, и многими другими авторами. В частности, в работе Г.В. Кустарева [80] с соавторами проведена классификация таких факторов и формализован процесс выбора наиболее значимых из них.

Наиболее интересным представляется рассмотрение предлагаемой задачи в случае виброуплотнения, как наиболее широко применяемого и эффективного типа режима работы и реализуемого широким спектром катков с различными рабочими органами, в том числе и деформируемыми [155].

Предлагается рассмотреть область грунтовой среды в процессе взаимодействия с РО катка в виде набора моделей, отвечающих каждому этапу и описать возможные переходы между этими состояниями при изменении режимных параметров работы машины. В рамках этого подхода решается задача о наиболее эффективном с точки зрения уплотнения изменении параметров воздействия и переходе к отвечающей этому состоянию модели среды.

Основной идеей предлагаемого подхода выступает описание грунта в рамках приближения сосредоточенных параметров, при котором взаимодействие уплотняемой среды и рабочего органа дорожной машины рассматривается как взаимодействие массивных тел, упругих, вязких элементов, а также элементов сухого трения.

Классификацию предлагаемых к рассмотрению реологических моделей, сопоставляемых участкам грунта как упруго-вязко-пластичной среды предполагается проводить по следующим критериям:

- 1) Количество тел, моделирующих среду при взаимодействии РО катка с ней;



- 2) Линейность или нелинейность зависимости механических характеристик среды от деформации;
- 3) Наличие неоднородности упругих свойств (различие между характеристиками при нагружении и разгрузке);
- 4) Наличие вязких свойств;
- 5) Наличие сухого трения.

Изменение свойств среды и ее отклика на внешнее воздействие в процессе уплотнения описываются возможными переходами между моделями. При этом переходы от одной модели к другой могут происходить как при изменении характеристик воздействия, так при постоянной совокупности режимных параметров, за счет изменения коэффициента уплотнения.

Удобное представление предлагаемого подхода возможно в виде таблиц, реализующих характеристику, представляющую зависимость состояния взаимодействия рабочего органа катка с уплотняемой средой от значения независимого параметра. Другим формальным способом наглядно представить результаты применения предлагаемого подхода является граф состояний, с вершинами, отвечающими реализации конкретного типа модели, осуществляющую описание среды на каждом этапе уплотнения [151, 168].

Переход между вершинами графа реализует изменение механических характеристик уплотняемой среды (появление новых или изменение значений существующих), отвечающее изменению модели среды, описывающей ее состояние.

### 3.3.1 Реализация моделей грунтовой среды для описания взаимодействия с ней рабочего органа катка

В рамках предлагаемого подхода грунт, при взаимодействии с РО катка, представляется системой с сосредоточенными параметрами. Такое рассмотрение является оправданным с практической точки зрения, поскольку рабочий орган,

воздействуя на поверхность среды, «чувствует» отклик той ее области, которая вовлекается во взаимодействие силой, действующей на пятне контакта [176] и вызывающей сопротивление среды. Вследствие этого при взаимодействии РО катка со средой последняя выступает механическим «черным ящиком», внутренняя структура которого неизвестна, но который обладает проявляющимися при взаимодействии с уплотнителем инерционными, деформативными и диссипативными свойствами [13,14,16,211]. Таким образом, информация о характеристиках грунта может быть получена только в результате анализа его ответа на работу катка изменением с течением времени координат, скоростей и ускорений поверхности взаимодействующего с РО участка грунта, а также характером накопления необратимых деформаций.

Традиционно, при проектировании рабочих органов катков, как жестких, так и деформируемых, например, пневмошин, в качестве важных характеристик выступают сосредоточенные жесткость и вязкость (как правило, в случае недеформируемого рабочего органа, за упруго-вязкие свойства рабочего органа считаются ответственными элементы подвески). Эти характеристики рабочих органов в общем случае могут иметь нелинейную зависимость от деформации, как, например, в случае пневмошинных рабочих органов [178]. Для эффективного моделирования процесса взаимодействия рабочего органа с уплотняемой средой и для использования при этом хорошо зарекомендовавших себя математических методов анализа динамических процессов представляется необходимым единым образом представлять как рабочий орган, осуществляющий динамическое воздействие, так и уплотняемую среду. Это органично возможно описать обобщенным выше подходом сосредоточенных параметров, как, например, в известной работе D.Pitzch [202].

Модель среды при взаимодействии с РО в рамках подхода сосредоточенных параметров должна строиться с учетом движения ее массы под внешним динамическим воздействием и с учетом реологических характеристик материала слоя. Основным допущением при этом является то, что взаимодействует с

рабочим органом только ограниченный объем грунта, которому и передается энергия - активная область [144]. Реологические и деформативные свойства уплотняемых грунтовых сред достаточно хорошо изучены [8,9,19,24,25,41,117,124]. Сведения об особенностях отклика среды на различные режимы нагружения будут ниже использованы для нахождения сосредоточенных жесткости и вязкости ее активной области с учетом зависимости от формы пятна контакта и этапа процесса уплотнения. Особенности их вычисления будут изложены ниже.

Описание поведения грунтовой среды под воздействием постоянных или медленно меняющихся нагрузок представляет собой известную и достаточно хорошо изученную задачу механики грунтов, различные варианты решения которой известны достаточно давно и результаты которых успешно применяются на практике [217]. Однако, в случае динамических режимов воздействий, механика деформируемого грунта не является настолько очевидной и представляет интерес как для экспериментальных, так и теоретических исследований, практическую важность результатов которых сложно переоценить. [117].

Реологические модели, описывающие уплотняемую среду в рассматриваемом приближении, являются по большей части составными и могут переходить друг в друга в процессе уплотнения, причем эволюция реологической модели не является односторонней. Это объясняется частичной релаксацией напряжений и деформаций [39, 107, 114]. В силу изменения прочностных и деформативных свойств грунтовой среды при уплотнении, характер ее отклика на динамическое воздействие и характер накопления деформаций также будут изменяться, что может привести к переходам между реологическими моделями, моделирующими состояние грунта, даже без изменения параметров внешнего воздействия.

Рассмотрим применимость моделей грунтовой среды, рассмотренных в параграфе 3.1 к описанию процессов ее взаимодействия с рабочим органом

уплотнителя. В качестве внешнего динамического воздействия будем рассматривать периодически меняющуюся по гармоническому закону силу, моделирующую процесс виброуплотнения.

1. Тело Гука – упругий элемент, соответствующий либо достаточно уплотненной среде, при значениях коэффициента уплотнения близких к 1, либо ситуации, когда смещения частиц грунта при колебаниях не могут обеспечить уплотнения. Как было показано в работах Хархуты и Костельова [78, 155], существуют предельные значения виброускорений в среде, при которых колеблющийся объем грунта не испытывает неупругих деформаций. Эти значения различаются в зависимости от типа грунта, однако, сам факт имеет достаточно простое физическое объяснение. Смещение, соответствующее критическим значениям виброускорений, не превышает размера самих частиц грунта и/или не ведет к разрыву связей между частицами для связанных грунтов, тем самым не обеспечивая их перераспределения и, как следствие, уплотнения. Последняя ситуация может возникнуть, когда уплотняемая среда уже набрала достаточную прочность для того, чтобы внешняя сила не смогла обеспечить необходимых значений амплитуды деформаций при сохранении площади пятна контакта, то есть при сохранении величины контактных напряжений. В случае деформируемого рабочего органа ситуация может усугубляться увеличением площади пятна контакта, что дополнительно уменьшает контактные напряжения. Для описания накопления неупругих деформаций представление грунта моделью тела Гука не подходит, поскольку последняя является консервативной – энергия внешнего динамического воздействия полностью переходит в энергию упругих колебаний грунта, которая не рассеивается.

2. Тело Кельвина-Фойхта – комбинация параллельно соединенных упругого и линейного вязкого элементов – достаточно эффективная модель грунтовой среды, не описывающая, однако, процессов накопления неупругой деформации. Может быть эффективно использована для описания среды, как граничная, при переходе к полностью уплотненной среде, описываемой телом Гука. Также тело Фойхта

хорошо описывает уплотняемую среду при виброуплотнении на каждом из этапов нагружения или разгрузки, однако при этом характеристики среды должны уточняться для каждого этапа. Тело Фойхта более точно описывает уплотняемую среду для высоких значений коэффициента уплотнения (близких к единице), когда вязкие свойства еще существенны. Другим доказательством возможности применения тела Фойхта для моделирования взаимодействия рабочего органа с реальной грунтовой средой является то, что от него грунту передается энергия, однако работа по уплотнению не совершается. Роль диссипативного элемента играет в этом случае вязкий элемент тела Фойхта. Однако введением, как было показано выше, модуля полной деформации, учитывающего и неупругие деформации, удастся модифицировать тело Фойхта для описания процессов уплотнения.

3. Элемент сухого трения с вязкостью – тело Прандтля играет особую роль в предлагаемом подходе. Переход к телу Прандтля может играть как положительную, так и отрицательную роль. Тело Прандтля реализует уплотняемый грунт в двух случаях, которые сходны по характеру деформирования, но существенно различаются по результатам. Работа элемента сухого трения реализуется, когда сила сопротивления грунта деформированию не зависит от величины деформации. С точки зрения кривой «напряжение - деформация» это эквивалентно выходу участка характеристики, когда деформации являются полностью необратимыми. Это может произойти на начальном этапе уплотнения при деформировании, когда грунт свободно насыпан и его частицы еще не консолидированы. Другое проявление свойств тела Прандтля грунт может демонстрировать в ситуации, когда на уплотненном грунте контактные напряжения превышают предел прочности. В этом случае деформирование грунта приводит к разрушению уплотненной структуры. Для многомассовых моделей реализация сухого трения в части уплотняемого грунта без превышения контактными напряжениями предела прочности является условием, приводящим к интенсификации процесса уплотнения.

4. Неоднородное тело Фойхта является моделью, которая часто используется для численного моделирования процессов уплотнения, и отражает различия в свойствах грунта оказывать сопротивление деформированию для различных типов нагружения. Математически это может быть выражено с помощью введения модуля полной деформации, описывающего свойства среды при деформировании. Он включает в себя как квазиупругую составляющую, играющую роль только при нагружении и отключающуюся при разгрузке, так и отвечающую реальному деформированию, которая работает и при нагружении и при разгрузке. Для реальных грунтовых сред характерно превалирование модуля упругой деформации над модулем полной деформации в разы. Это, наряду с очень высокой вязкостью связанных грунтов, обеспечивает быстрое затухание собственных колебаний. Такая модель эффективно используется как отечественными, так и зарубежными исследователями и зависимость упругих свойств грунта от характера нагружения является общепризнанным фактом.

5. Двухмассовая реологическая модель открывает список многомассовых моделей и представляет собой комбинацию упомянутых выше. Многомассовые модели более интересны с точки зрения корректности описания взаимодействия РО катка и грунтовой сред. Обоснованность их применения подтверждается рядом экспериментальных исследований, изучающих распределение деформаций и виброускорений в толще уплотняемого грунта при внешнем динамическом воздействии [128]. В ходе этих исследований было показано, что уплотняемую среду можно было условно разделить на ряд зон, неодинаково реагирующих на уплотняющее воздействие и различающихся размером, массой и характером отклика на деформирование при уплотнении. Следует отметить, что в рамках предлагаемого выше подхода к описанию уплотнения грунтов массы участков эффективного объема грунта, реализующего многомассовую модель, являются связанными между собой, взаимодействуют при передаче энергии деформирующего воздействия толще грунта и эволюционируют, изменяя свою форму и размеры. Ниже будут приведены важные примеры многомассовых

моделей, иллюстрирующие предлагаемый подход для различных этапов уплотнения.

Эволюцию реологических моделей при описании процесса уплотнения можно представить следующим образом в зависимости от характеристик уплотняющего воздействия. На начальных этапах нагружения большую роль играют деформации, связанные с сухим трением. При этом коэффициент уплотнения возрастает и механические характеристики грунтовой среды изменяются, так что необратимые деформации, происходящие без изменения силы реакции грунта, прекращаются, уступая место деформациям, связанных с силой сопротивления функциональной зависимостью. Следует отметить, что в силу различных причин эта зависимость не всегда является линейной, более того, именно этим нелинейным характером во многом объясняется сложность описания взаимодействия рабочего органа уплотнителя с уплотняемой средой.

Двухтельная модель начального этапа уплотнения – последовательная комбинация параллельно соединенных массивных тел Фойхта и Прандтля и Фойхта – упруго-вязко-пластичного элемента с сухим трением. Первое из них отвечает за деформирование той части грунта, в которой механические напряжения достаточно велики для того, чтобы реализовать элемент сухого трения, обеспечивающий деформацию грунта без изменения силы сопротивления. Второе соответствует деформированию оставшейся части эффективного объема грунта, происходящему без накопления остаточных деформаций.

Рассмотрим модель уплотняемого грунта, описываемую комбинацией элементарных моделей и реализующее одно из тел многомассовой модели. Эволюцию реологической модели в процессе уплотнения можно описывать как функцию на множестве моделей, зависящую от текущего состояния уплотняемой среды и параметров внешнего динамического воздействия. В дальнейшем будем предполагать, что модель каждого из тел модели, описываемой несколькими телами, может менять свое состояние.

В рамках настоящего исследования на основе анализа элементарных

реологических моделей и результатов теоретических и экспериментальных исследований по распределению напряжений, деформаций и виброускорений в толще грунта при поверхностном динамическом воздействии со стороны рабочего органа, предлагается построить модель взаимодействия рабочего органа уплотняющей дорожной машины с грунтом.

Допущениями, принимаемые для построения модели:

- 1) Грунт ведет себя как упруговязкопластичная среда;
- 2) Характеристики, определяющие сопротивление грунта деформированию зависят от накопленной пластической деформации;
- 3) Деформации и напряжения изменяются с глубиной грунта, таким образом, пластические деформации испытывает ограниченная часть слоя грунта (активной области грунта).
- 4) Процессы нагружения и разгрузки существенно отличаются по реализуемым упругим свойствам.
- 5) Деформации слоя грунта частично восстанавливаются (релаксации по В.Б.Пермякову) после полной разгрузки до состояния, соответствующего накопленной пластической деформации.
- 6) Грунтовая среда обладает вязкими свойствами и сила вязкого сопротивления пропорциональна скорости смещения частиц грунта.
- 7) Уплотнение происходит в номинальном для заданного грунта и уплотняющей машины режиме, таким образом, что контактные напряжения не превосходят предела прочности грунта и не влекут его разрушения.

Тем самым предлагается рассматривать одну из семейства возможных многомассовых моделей грунта в рамках подхода сосредоточенных параметров, учитывающую зависимость характеристик от накопленной пластической деформации, состоящую из трех подсистем – деформируемых объемов грунта, отличающихся глубиной залегания от поверхности.

- 1) Наиболее близкая от поверхности область грунта, для всех точек которой превышен предел текучести. В ней уплотнение происходит за счет накопления



полностью необратимых деформаций. Ее границей выступает изобара, соответствующая пределу текучести.

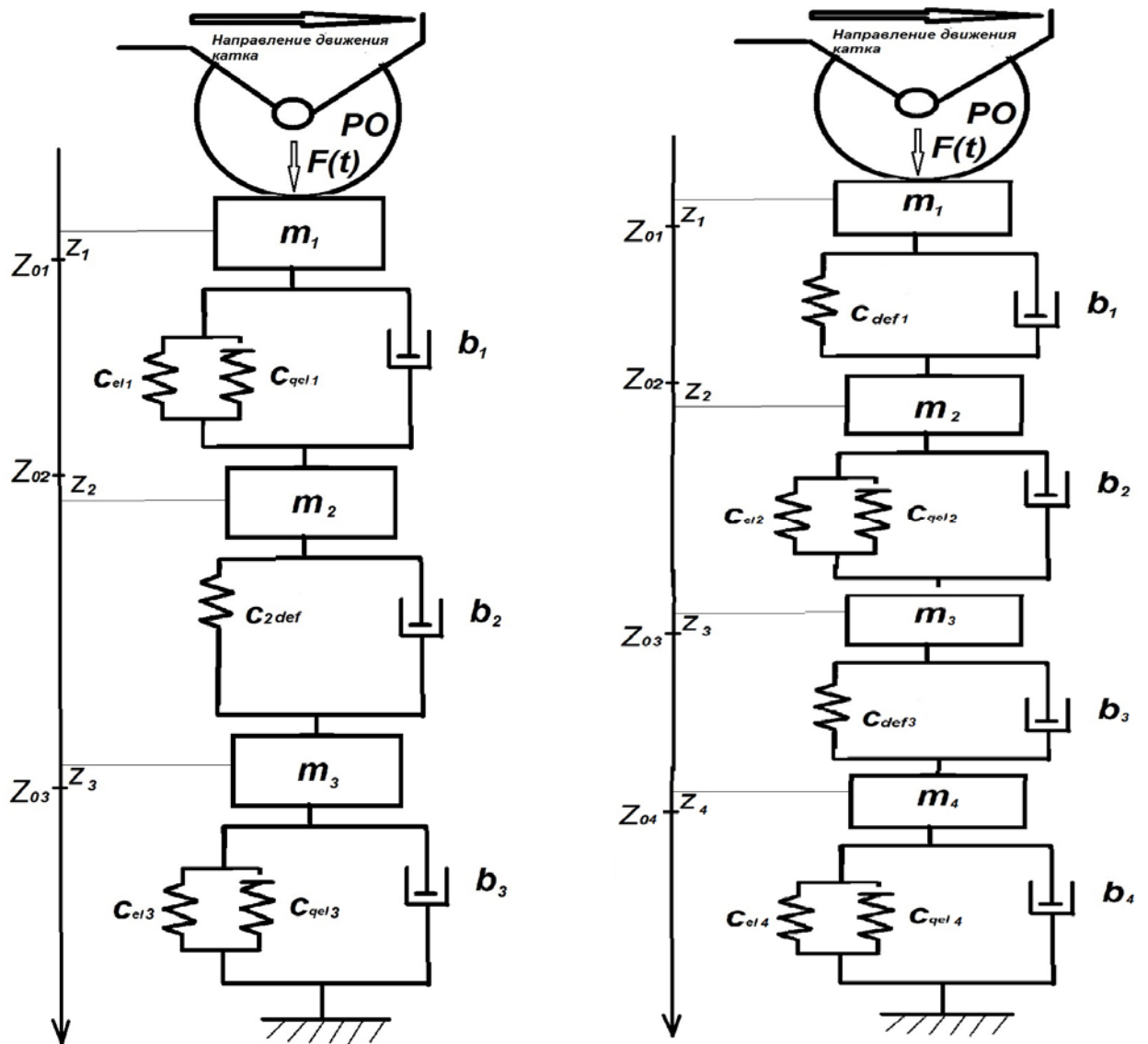
2) Для второй области грунта, предел текучести еще не преодолен и она уплотняется за счет реализации частично неупругой деформации при учете неодинаковых модулей деформации среды при нагружении и разгрузке сопротивления являясь модифицированным телом Кельвина-Фойхта .

3) Наиболее удаленная от поверхности область грунта испытывает только упругие деформации, поскольку напряжения в ней не достигают значений, необходимых для деформирования и работает как тело Кельвина-Фойхта без элемента, отвечающего за неупругое деформирование.

При переходе к сосредоточенным параметрам необходимо рассматривать отдельно этап нагружения, отдельно этап разгрузки. Процессы в грунте при этих этапах существенно отличаются. Учет этого осуществляется введением в модель квазиупругого элемента с неоднородными свойствами по отношению к этапам нагружения и разгрузки.

В самом простом случае линейных элементов величины сосредоточенных параметров – масс, жесткостей, вязкостей являются постоянными [212]. Однако для процесса уплотнения реальных грунтов все эти величины меняют свои значения с деформированием, являясь функцией величины накопленной пластической деформации. Определение этих зависимостей является отдельной задачей.

Выбор такого соотношения характеристик для трех сосредоточенных масс грунта диктуется результатами экспериментальных исследований в рамках которых было установлено, что не весь объем грунта, в котором внешнее воздействие порождает деформации, повышает свою плотность. В нем существуют области, в которых деформации не являются необратимыми. Вопрос определения режима силового воздействия, обеспечивающего требуемую глубину проработки слоя, также выступает в качестве важного аспекта достижения максимальной энергоэффективности при уплотнении грунтов.



а) б)

Рисунок 3.5 – Примеры многомассовых моделей активной области грунтового слоя при взаимодействии с рабочим органом уплотнителя с образованием уплотненного ядра - а) трехмассовая модель, б) четырехмассовая модель

Полное решение задачи о взаимодействии рабочего органа уплотняющей машины и уплотняемого грунта можно получить рассмотрением следующей модели, учитывающей взаимодействие рабочего органа с грунтом и рамой дорожной машины. Традиционно рабочий орган и подвеска машины рассматриваются как массивные упруго-вязкие элементы. При этом сила внешнего динамического воздействия считается приложенной к рабочему органу,

оказывающему воздействию на поверхность грунта, подчиняющегося описанной выше модели.

Такой подход позволяет органически дополнить математическое описание взаимодействия рабочего органа уплотнителя и грунтовой среды, объединив их в законченную систему. Графическое представление модели уплотнителя приведено на Рис. 3.6. Ввод дополнительных колебательных систем, соответствующих уплотнителю, в многомассовую модель не представляет вычислительных сложностей, поскольку характеристики дорожных машин, их рабочих органов и параметров генерируемого силового воздействия, как правило, известны и приведены в технической документации.

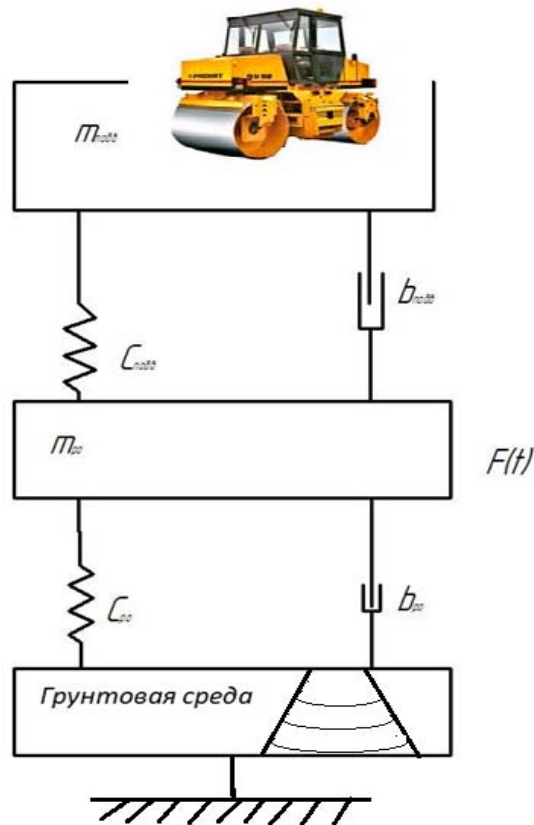


Рисунок 3.6 – Модельное представление РО уплотнителя (в общем случае деформируемого) при описании его взаимодействия с грунтовой средой [109]

Упругие и вязкие свойства рабочего органа при взаимодействии с поверхностью уплотняемого грунта и рамой учитываются жесткостями  $c_{po}$  и  $c_{подв}$

и вязкостями  $b_{po}$  и  $b_{подв}$  соответственно.

Таким образом, решение поставленной задачи сводится к интегрированию системы в общем случае нелинейных дифференциальных уравнений движения рабочего органа, подвески и масс уплотняемого грунта. Даже применение простой линейной модели, не учитывающей изменение характеристик грунта с уплотнением, требует применение численных методов, особенно в случае сложных зависимостей сил внешнего воздействия. При этом основной задачей, стоящей перед исследователем, является вычисление зависимостей жесткости и вязкости грунта от накопленной пластической деформации. Как правило, эти коэффициенты считаются известными и их значения задают, руководствуясь результатами экспериментальных исследований.

Рассматривая работу катка в рамках указанной модели необходимо учитывать конечность массы уплотняемого участка грунта. Это позволяет, в отличие от подхода, считающего грунт пренебрежимо легким по сравнению с массой уплотнителя, учесть резонансные явления в грунтовой среде и использовать их для интенсификации процесса уплотнения.

### 3.4 Расчетные схемы вычислительных алгоритмов математических моделей взаимодействия рабочего органа дорожного катка и активной области слоя уплотняемой среды

#### 3.4.1 Расчетная схема модели с представлением области в виде набора элементарных столбов для описания взаимодействия РО со средой при вибрационном уплотнении

В работах [92, 95, 96, 126] был развит подход к описанию взаимодействия РО уплотнителя с активной областью упруговязкопластичной грунтовой среды при различных режимах работы. Активная область рассматривалась в приближении взаимодействующих столбов. Связь между напряжениями,

деформациями и скоростями среды представлялась в линейном приближении.

$$\sigma_{el} = E_y \frac{\Delta x}{h_0}, \quad (3.33)$$

где  $E_y$  – модуль упругости среды, Па;  $h_0$  – начальная толщина элемента слоя среды, м;  $\Delta x$  – величина смещения среды относительно недеформированного состояния.

В качестве координат смещения среды можно выбирать текущее положение сосредоточенной массы грунтовой среды, однако в нашем случае, более удобной является величина смещения среды относительно недеформированного состояния  $\Delta x = x - x_0$ , где  $x_0$  – координата несмещённой сосредоточенной массы [99].

$$\sigma_{pl} = \Theta(\sigma - \sigma_m) \frac{\Delta x}{h_0}, \quad (3.34)$$

где  $\Theta$  – функция Хевисайда,  $\Theta(x) = (\text{sign}x + 1) / 2$ ;  $\sigma$  – напряжения, возникающие в грунтовой среде от внешних сил, Па;  $\sigma_m$  – напряжения предела текучести среды, Па.

$$\sigma_v = \eta \frac{d\Delta \dot{x}}{dx}, \quad (3.35)$$

где  $\eta$  – вязкость среды, Нс/м<sup>2</sup>.

Реологическое уравнение движения уплотняемой грунтовой упруговязкопластичной среды запишется в виде

$$E_y \frac{\Delta x}{h_0} + \Theta(\sigma - \sigma_m) E_{nl} \frac{\Delta x}{h_0} + \eta \frac{d\Delta \dot{x}}{dx} = (F_o \sin \omega t + F_{cm}) / S, \quad (3.36)$$

Для осуществления процесса виброуплотнения на данную среду должна действовать внешняя сила, которая приводит к созданию НДС среды и накоплению в ней необратимых деформаций. Задача интенсификации процесса уплотнения упруговязкопластичной грунтовой среды требует принятия определённых допущений, которые без существенного изменения точности итоговых результатов позволяют проводить исследования процесса динамического деформирования среды [89].

1. Среда – это элементарный столб, моделируемый точечной массой с упругими и вязкими элементами. Процесс виброуплотнения сводится к одномерным колебаниям данной точки, при этом характер движения рабочего органа, далее РО, известен. Показатели вязкости и жёсткости среды постоянны в течение одного цикла движения РО. Параметры движения РО выбираются из условия максимального снижения вязкого сопротивления деформированию среды.

2. Помимо сил вязкого и упругого сопротивления на среду действуют силы пластического сопротивления деформированию. Процесс виброуплотнения должен сводиться к созданию направленного движения массивной точки [99].

3. Пятно контакта – участок плоскости, на котором действует РО, изменяющейся по гармоническому закону, допускающему ее представление в виде ряда Фурье. Движение среды описывается дифференциальными уравнениями, полученными из второго закона Ньютона (следствие уравнений Эйлера-Лагранжа).

4. Описание движения системы «рабочий орган - деформируемая среда» строится на основании формализма Лагранжа, диссипативная функция основания на котором расположена уплотняемая среда, не учитывается [99].

5. Распределение деформаций и напряжений внутри среды учитывается её представлением в виде системы материальных точек с сосредоточенными массами, связанными между собой упруговязкопластичными связями линейного и нелинейного характера. Процесс виброуплотнения влечет уменьшение вибрационной вязкости системы в целом и создании направленного движения центра масс системы с максимальной скоростью [99].

Рассмотрим элементарный столб среды, определённого объёма и массы, на который действует внешняя периодическая сила  $F_0 \sin(\omega t)$ . Действие периодической вынуждающей силы вибровозбудителя с частотой  $\omega$  на деформируемую среду запишем в виде дифференциального уравнения движения массы среды [96, 121, 142]:

$$\rho V \Delta \ddot{x} + b_2 \Delta \dot{x} + c_2 \Delta x = F_o \sin \omega t + F_{cm}, \quad (3.37)$$

где  $\Delta x$  – деформация среды, м;  $m = \rho V$  – приведенная масса среды, кг;  $\rho$  – плотность деформируемой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объём деформируемого столба среды, м<sup>3</sup>;  $F_{ct} = Mg$  – сила тяжести РО, Н;  $c_2$  – жёсткость деформируемого столба среды, Н/м;  $b_2$  – коэффициент вязкого трения деформируемого объёма, Нс/м [99].

$$b_2 = \frac{\eta S}{h_0} \quad (3.38)$$

где  $\eta$  – вязкость деформируемой среды, Нс/м<sup>2</sup>;  $h_0$  – толщина уплотняемого слоя среды, м;  $S$  – площадь пятна контакта, м<sup>2</sup>.

$$c_2 = \frac{E S}{h_0}, \quad (3.39)$$

где  $E$  – модуль деформации среды, Па;

Поскольку модуль деформации среды характеризуется пластической и упругой деформациями [92,155], то жёсткость столба грунтовой среды также складывается из упругой и пластичной составляющих.

$$c_{2el} = \frac{E_y S}{h_0}, \quad (3.40)$$

где  $E_y$  – модуль упругости грунтовой среды, МПа.

$$c_{2pl} = \frac{E_n S}{h_0}, \quad (3.41)$$

где  $E_n$  – модуль пластичности грунтовой среды, МПа.

Преобразуем уравнение (3.37) с целью изучения поведения деформируемой грунтовой среды при динамическом нагружении внешней периодической силой [99]:

$$\Delta \ddot{x} + \frac{b_2}{m} \Delta \dot{x} + \frac{c_2}{m} \Delta x = \frac{F_0}{m} \sin \omega t + \frac{F_{cm}}{m}.$$

Дальнейшее решение полученного уравнения проводится численно, в силу наличия неупругой составляющей силы сопротивления деформированию.

### 3.4.2 Определение деформируемой уплотняющей машиной активной области грунтового слоя и исследование ее физико-механических характеристик

Определение характеристик области грунта, вовлеченной во взаимодействие с рабочим органом уплотнителя в рамках подхода взаимодействующих столбов, не вызывает трудностей. Однако, реальные форма и размеры активной области слоя существенным образом зависят как от вида пятна контакта РО с поверхностью, так и от режима работы уплотняющей машины. Их определение должно происходить с учетом распределения механических напряжений, обеспечиваемого уплотняющим силовым воздействием в толще грунтового слоя.

Для этого воспользуемся подходом Вестергаарда, описанном в главе 2. Найдем вид и размеры поверхностей постоянного напряжения, создаваемого в слое поверхностной силой, аналогично выражению (2.14). На первом этапе нужно получить выражение для линейно распределенной нагрузки с плотностью  $q$ , интегрируя вклады от точечных элементарных участков прямой, расположенной вдоль оси  $Y$  (по ширине пятна контакта). Каждый из участков вносит в нагрузку вклад  $qdy$ . Результат интегрирования по переменной  $y$  дает

$$\sigma_z = \frac{q\gamma}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{zdy}{(\gamma^2 z^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{q\gamma}{\pi} \frac{z}{(\gamma^2 z^2 + x^2)}. \quad (3.42)$$

Вычисления для поверхностной нагрузки, распределенной с поверхностной плотностью  $\sigma_0$  на полосе шириной  $2b$ , ориентированной вдоль оси  $Y$ , с центром в начале координат, происходят интегрированием вкладов от каждой элементарной прямой, представляющейся полоской ширины  $dt$ , проходящей через точку с координатой  $t$  по оси  $X$  (по длине пятна контакта) обеспечивающей вклад нагрузку  $\sigma_0 dt$  следующим образом (переменная  $t$  изменяется от  $-b$  до  $b$ )



$$\sigma_z = \int_{-b}^{+b} d\sigma_z(t) = \frac{\sigma_0 \gamma}{\pi} \int_{-b}^{+b} \frac{z dt}{(\gamma^2 z^2 + (x-t)^2)} = \frac{\sigma_0}{\pi} \left( \arctan\left(\frac{x+b}{\gamma z}\right) - \arctan\left(\frac{x-b}{\gamma z}\right) \right) \quad (3.43)$$

Аналогично предыдущему случаю для анализа распределения нагрузки в толще грунта удобно перейти к обезразмеренным переменным, приведенным к полуширине полосы, на которой осуществляется приложение нагрузки  $\zeta = z/b$ ,  $\xi = x/b$ . В этом случае распределение напряжений примет вид

$$\sigma_z(\xi, \zeta) = \frac{\sigma_0}{\pi} \left( \arctan\left(\frac{\xi+1}{\gamma \zeta}\right) - \arctan\left(\frac{\xi-1}{\gamma \zeta}\right) \right) \quad (3.44)$$

Семейство линий сечения поверхностей постоянного напряжения вертикальной плоскостью перпендикулярной поверхности грунта с вектором нормали, ориентированным параллельно осевой линии полосы приложения нагрузки, приведен на рис. 3.25. в координатах  $\zeta = z/b$ ,  $\xi = x/b$ .

В отличие от случая Буссинеска, подход Вестергаарда допускает аналитическое представление семейства кривых постоянного напряжения. Они представляют собой эллипсы, проходящие через точки  $(-1,0)$  и  $(1,0)$ . Таким образом, поверхности постоянного напряжения будут являться пересекающимися друг друга эллиптическими цилиндрами [107].

Представим уравнение линии постоянного напряжения в виде

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

И преобразуем его, учитывая, что на линии постоянного напряжения  $\sigma_z = const$ , введя безразмерную константу, параметризующую линию постоянного напряжения  $C = \tan \frac{\pi \sigma_z}{\sigma_0} = const$ ,  $\frac{\sigma_z}{\sigma_0} > \frac{1}{2}$ ,  $C = \tan \pi \left( 1 - \frac{\sigma_z}{\sigma_0} \right) = const$ ,  $\frac{\sigma_z}{\sigma_0} < \frac{1}{2}$  где  $\sigma_0$  -

максимальное значение контактного давления на пятне контакта

$$\frac{2\gamma \zeta}{\gamma^2 \zeta^2 + \xi^2 - 1} = C,$$

что после приведения уравнения эллипса к каноническому виду дает

$$\frac{(\zeta - \frac{1}{\gamma C})^2}{\frac{1}{\gamma^2}(1 + \frac{1}{C^2})} + \frac{\xi^2}{(1 + \frac{1}{C^2})} = 1. \quad (3.45)$$

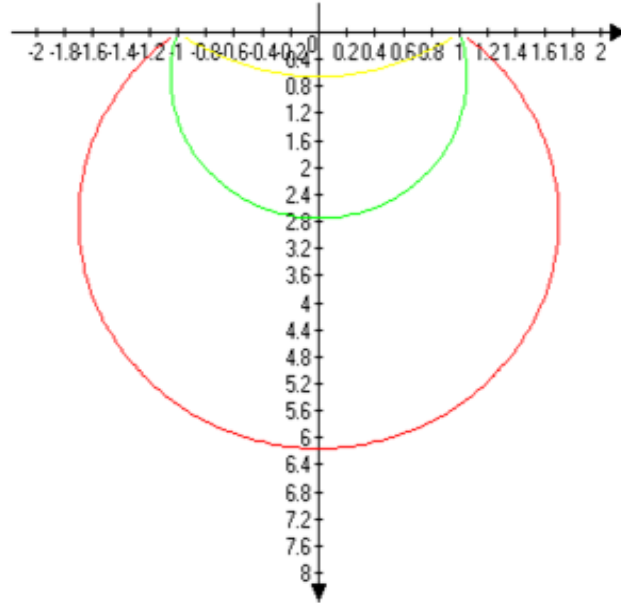


Рисунок 3.7 – Распределение поверхностей постоянного напряжения при работе катка в толще грунтового слоя по Вестергаарду ( $\mu = 1/3$ ,  $\gamma = 1/2$ ) (случай равномерного распределения нагрузки по бесконечной полосе известной ширины) [107]

Среди определяемых выражением (3.45) эллиптических сечений поверхностей постоянного напряжения в толще слоя, изобара, отвечающая половине контактного давления  $\frac{\sigma_z}{\sigma_0} = \frac{1}{2}$ , занимает особое положение. Ей соответствует эллипс с центром в начале координат с уравнением

$$\gamma^2 \zeta^2 + \xi^2 = 1.$$

Его анализ позволяет получить важный результат о распределении напряжении в толще слоя – напряжения падают вдвое по отношению к контактному давлению на глубине равной  $\gamma b$ . В принятом для реальных грунтовых сред приближении  $\gamma = 1/2$ , это соответствует падение напряжения вдвое по отношению к контактному давлению на глубине равной длине пятна контакта.

Для рассмотрения напряженно-деформированного связанных грунтов, подход Вестергаарда к распределению нормальных напряжений, является более обоснованным.

Информация о виде распределения поверхностей постоянного напряжения с учетом кривой «напряжение - деформация», рассмотренной в предыдущем параграфе, позволяет сделать выводы о развития деформации в толще грунта с изменением поверхностного напряжения и описать ее характер.

При этом толщу грунтовую среду можно рассматривать как последовательно деформируемые эллиптические цилиндры, для каждого из которых характер сопротивления воздействию РО известен. При этом не должна нарушаться правая часть неравенства динамическом соотношении, определяющем контактные напряжения при эффективном уплотнении

$$\sigma_{pl}(t) \leq \sigma(t) < \sigma_{destr}(t),$$

где  $\sigma_{pl}$  – предел текучести грунта,  $\sigma(t)$  – текущее значение контактного напряжения,  $\sigma_{destr}$  – предел прочности грунта [107]. Каждый из этих цилиндров определяется величиной нормального напряжения на своей границе.

Для самого близкого к поверхности цилиндра контактное давление может равняться пределу прочности  $\sigma_{destr}$  и для него константа  $C_{destr} = \frac{\pi\sigma_{destr}}{\sigma_0}$ , он

испытывает только пластические деформации при постоянно силе сопротивления деформированию. Следующий цилиндр соответствует пределу пластичности  $\sigma_{pl}$

и для него  $C_{pl} = \frac{\pi\sigma_{pl}}{\sigma_0}$  и его сила сопротивления, возрастает с ростом напряжения,

причем нелинейно. Третья цилиндрическая область находится в состоянии неупругого деформирования со слабым восстановлением  $C = \frac{\pi\sigma_{el}}{\sigma_0}$ , ее нижняя

граница соответствует пределу упругости. Вне этого цилиндра лежит область, испытывающая упругие деформации, недостаточные для уплотнения.

Полученные результаты по определению формы цилиндрической области, ограниченной поверхностями постоянного напряжения в случае распределения

поверхностной нагрузке по плоской полосе известной ширины (задача Фламана) могут быть обобщены на пятно контакта в форме участка боковой поверхности кругового цилиндра. Результаты ее решения могут быть использованы для вычисления жесткости и вязкости активной деформируемой области, а также служить для проверки соответствия используемого теоретического подхода существующим экспериментальным результатам. Поверхности постоянного нормального напряжения (изобары) в деформируемом объеме грунтового слоя могут быть построены с учетом как нагрузки, обусловленной нормальной поверхностной силой, так и нагрузки, обусловленной тяговым усилием, обеспечивающим поступательное движение катка.

В рамках используемого подхода Вестергаарда к распределению нормальных напряжений в деформируемом объеме грунтового слоя для величины нормального напряжения в точке слоя с координатами  $(x, z)$ , обусловленной нагружением по пятну контакта, представляющем участок боковой поверхности кругового цилиндра (Рис. 3.26), имеем выражение

$$\sigma_n(x, z) = \frac{\gamma R}{2\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{(z'(\alpha) + |z'(\alpha)|)(\sigma_0(\cos(\alpha)) + \tau_0(\sin(\alpha)))}{(\gamma z'(\alpha))^2 + (x'(\alpha))^2} \cos(\alpha) d\alpha. \quad (3.46)$$

Приняты обозначения:

$\alpha_1, \alpha_2$  - углы, ограничивающие сектор цилиндрической поверхности пятна контакта;  $R$  - радиус вальца;  $\gamma = \sqrt{\frac{1-\mu}{2-\mu}}$  - коэффициент, определяющий перераспределение нормальных напряжений в толще слоя, для значений коэффициента Пуассона  $\mu$ , для грунтов обычно принимаемый равным 0.5.

При этом учитывается возможность возникновения нормальной составляющей давления на пятне контакта, вызванной как вертикальной уплотняющей силой ( $\sigma_0$  - максимальное значение нормального давления на пятне контакта), так и горизонтальной силой, обеспечивающей поступательное движение катка ( $\tau_0 = 0.5$  - максимальное значение касательной составляющей давления, вызванной тяговым усилием). Положение точки наблюдения относительно элементарного участка цилиндрической поверхности с угловой координатой  $\alpha$  задается координатами

$$\begin{cases} x'(\alpha) = (x - x_0(\alpha))\cos(\alpha) - (z - z_0(\alpha))\sin(\alpha), \\ z'(\alpha) = (x - x_0(\alpha))\sin(\alpha) + (z - z_0(\alpha))\cos(\alpha) \end{cases}$$

где  $x_0(\alpha) = R \sin(\alpha)$ ,  $z_0(\alpha) = R(\cos(\alpha) - \cos(\alpha_2))$  - декартовы координаты элементарного участка нагруженной области контакта. Результаты вычислений по формуле (3.46) приведены на рисунках 3.8 и 3.9 ниже. Необходимо отметить, что интеграл в (3.46) может быть взят только численно, так что аналитическое выражение для поверхностей постоянного нормального напряжения в случае криволинейного пятна контакта может быть получено лишь приближенно.

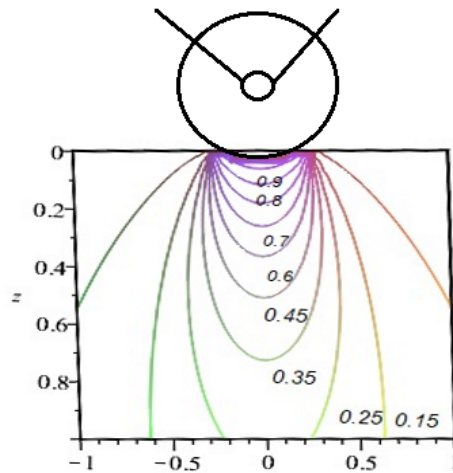


Рисунок 3.8 – Распределение изобар под цилиндрическим вальцом радиуса

$R = 1 м$ , при значениях углов  $\alpha_1 = -\pi / 8$ ,  $\alpha_2 = \pi / 8$ ,  $\sigma_0 = 1$ ,  $\tau_0 = 0$

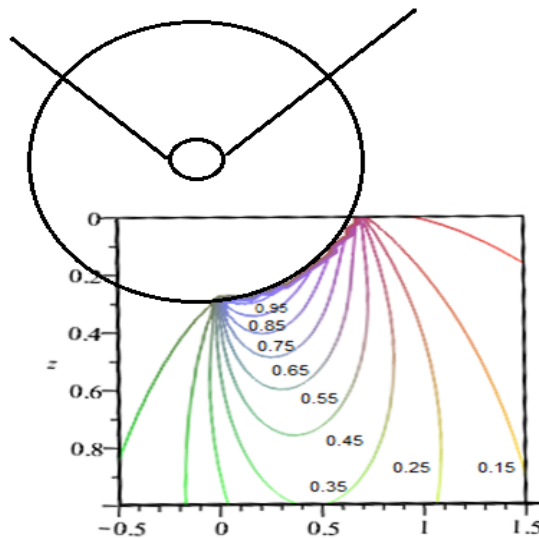


Рисунок 3.9 – Распределение изобар под цилиндрическим вальцом радиуса

$R = 1 м$  при значениях углов  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = \pi / 4$ ,  $\sigma_0 = 1$ ,  $\tau_0 = 0.5$

Кривые на рисунках 3.10 и 3.1 определяют семейства поверхностей уровня нормального напряжения в деформируемом объеме слоя, задаваемых уравнением  $\sigma_n(x, z) / \sigma_0 = const$ . Случаи, рассмотренные выше в качестве примеров, соответствуют одинаковой величине дуги пятна контакта и, как следствие, площади контакта. Различные значения тягового усилия и движение катка обеспечивают различные распределения напряжений, качественные зависимости которых остаются соответствующим рисункам 3.10 и 3.11.

Определение эффективной глубины проработки грунтового слоя катком требует решения задачи о том, как распределено нормальное напряжение обеспечивающее уплотнение на заданной фиксированной глубине. Следует указать, что эта задача является актуальной для механики грунтов и применительно к задачам уплотнения решалась, в частности [157]. Полученные результаты позволяют легко построить зависимости  $f(x) = \sigma_n(x, z = const)$  для статического положения цилиндрического вальца (Рисунок 3.10).

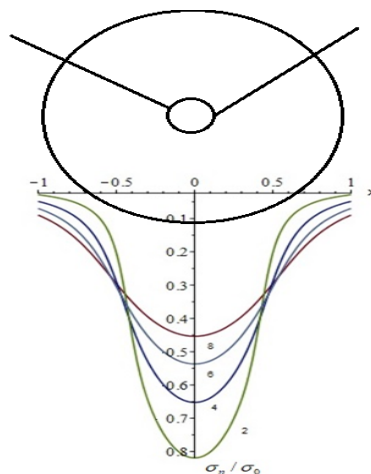


Рисунок 3.10. – Распределение нормального давления под цилиндрическим вальцом радиуса  $R = 1 м$ , при значениях углов  $\alpha_1 = -\pi / 8$ ,  $\alpha_2 = \pi / 8$ ,  $\sigma_0 = 1$ ,  $\tau_0 = 0$  на различной глубине  $z$  при ее значениях соответствующих

$$z / h = 2, 4, 6, 8$$

Аналогичное семейство кривых, учитывающее поступательное движение катка также может быть построено по формуле (3.46), согласно рисунку 3.29.

Существует ряд известных результатов, в основном носящих

экспериментальный характер, относительно распределения напряжений на заданной глубине под цилиндрическим вальцом при работе катка как в состоянии покоя, так и при поступательном движении катка [153].

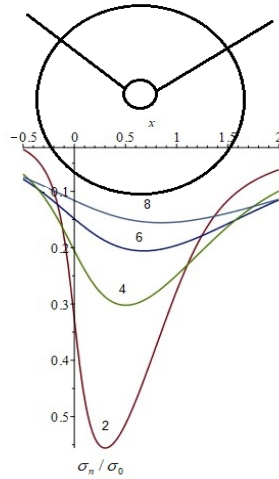


Рисунок 3.11 – Распределение нормального давления под цилиндрическим вальцом радиуса  $R = 1 м$ , при значениях углов  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = \pi / 4$ ,  $\sigma_0 = 1$ ,  $\tau_0 = 0.5$  на различной глубине  $z$  при ее значениях соответствующих  $z / h = 2, 4, 6, 8$

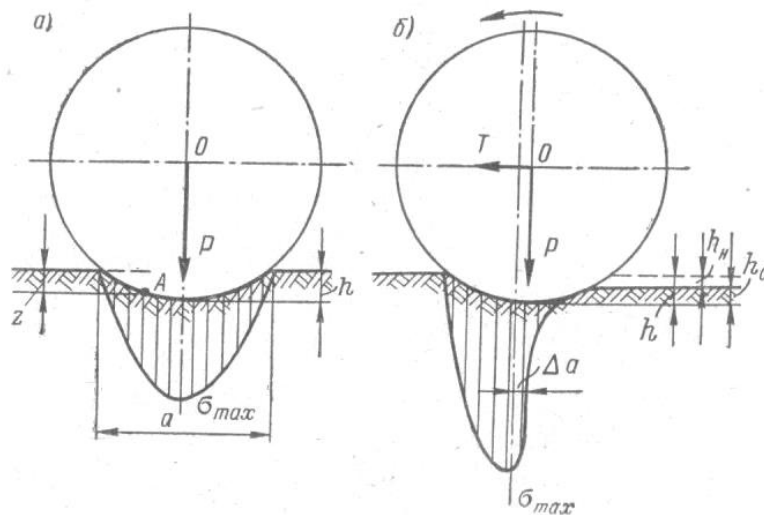


Рисунок 3.12 – Распределение нормального давления под цилиндрическим вальцом при работе катка по Н.Я. Хархуте. а) статическое положение вальца; б) перемещение вальца при уплотнении.

Полученные выше теоретические зависимости находятся в полном соответствии с экспериментальными данными Н.Я. Хархуты (Рис 3.12) и могут

быть использованы в расчетах глубины проработки грунтового слоя для различного размера цилиндрического вальца, вертикальной нагрузки, приходящейся на ось катка и величины тягового усилия. Помимо выявления зависимостей нормального напряжения, обусловленного уплотняющим воздействием от горизонтальной координаты на заданной глубине, предложенный подход может с легкостью быть использован для определения зависимости изменения максимального нормального напряжения как функции заглубления вальца в грунт, по крайней мере, в случае статического положения цилиндрического вальца (Рис. 3.12 а). Семейство зависимостей нормального напряжения в толще грунтового слоя на оси цилиндрического вальца, определяющие глубину эффективной проработки грунтового слоя при работе катка, приведены на рисунке 3.13

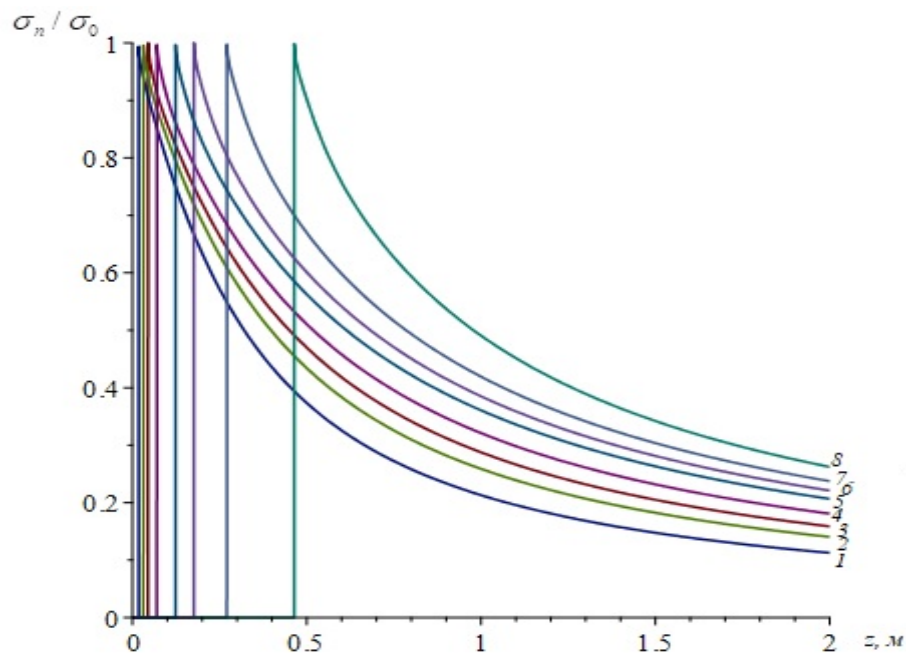


Рисунок 3.13 – Зависимости нормального напряжения в толще грунтового слоя от цилиндрического вальца  $\sigma_n / \sigma_0(z)$ , параметризованные величиной угла погружения вальца в грунт 1 -  $\alpha_2 = \pi / 3$ , 2 -  $\alpha_2 = \pi / 4$ , 3 -  $\alpha_2 = \pi / 5$ , 4 -  $\alpha_2 = \pi / 6$ , 5 -  $\alpha_2 = \pi / 8$ , 6 -  $\alpha_2 = \pi / 10$ , 7 -  $\alpha_2 = \pi / 12$ , 8 -  $\alpha_2 = \pi / 16$ .



### 3.4.3 Расчетная схема модели с представлением области грунта в виде набора неэквивалентных областей для обоснования режимов работы катка.

Непосредственное применение разработанной математической модели взаимодействия рабочего органа грунтовой средой среды, подвергаемой динамическому воздействию, требует вычисления сосредоточенных параметров модели, реализующих деформативные и инерционные характеристики активной области. Определенные таким образом массы, жесткости и вязкости будут зависеть, в первую очередь, как от текущего напряженно-деформированного состояния материал, так и величины значения контактного давления, создаваемого рабочим органом катка на его поверхность и порождающего распределение нормальных напряжений по глубине уплотняемого слоя.

Следует особо отметить, что в случае рассмотрения режимов работы катка, существенных для применения модели сосредоточенных параметров является квазистационарность динамических процессов, условие которой должно оговариваться до начала моделирования. Условием квазистационарности в случае воздействия на слой среды толщиной  $h$  периодической силы с периодом  $t$  может

считаться следующее  $\frac{T}{8} \gg \frac{h}{c}$ , где  $c$  - скорость распространения упругих

продольных волн в среде. Учитывая известные значения для скоростей распространения звука в грунтовых средах, имеющие порядки от нескольких сотен метров в секунду для песков до более полутора тысяч метров в секунду для тяжелых глин, можно считать, что для значений толщин слоев грунта, уплотняемых вибрационными катками, составляющих 20-80 см, частоты работы катков 15-100 Гц будут обеспечивать квазистационарный режим деформирования.

Известные результаты, касающиеся переходу в распределенных системах к сосредоточенным параметрам, относятся широкому классу задач: задачам механики, геологии, электродинамики и т. д. Во всех случаях переход происходит интегрированием по объему подверженной воздействию возмущающего фактора (силы, температуры, источника вещества, напряжения и т.п.) области.

Воспользовавшись этим подходом, можно установить, значения геометрических, механических и деформативных характеристик активной области грунтового слоя при поверхностном силовом воздействии, действуя в рамках модельного подхода описанного выше. В этой связи следует упомянуть работу З.Г.Тер-Мартиряна с соавторами [216] и, основывающийся на этой работе в серии статей С.-Ф. Dobrescu [172,173] подход к оптимизации виброуплотнения грунтовых сред. Авторы рассматривают уплотняемую среду под основанием сооружения или под рабочим органом уплотнителя как совокупность конечного числа нелинейных, в общем случае, осцилляторов, однако, с постоянными коэффициентами масс, вязкостей и жесткостей.

Вычисление массы, положения центра масс, площади границы, жесткости и вязкости проводится интегрированием по элементарным областям в рамках следующих допущений:

- 1) среда является однородной;
- 2) определяющие отношения для всех точек среды известны;
- 3) соответствующие сосредоточенные динамические характеристики определяются относительно координат и скоростей центра масс области.

Масса цилиндрической области вычисляется стандартным образом

$$m_0 = \int_V \rho dV = \rho l \int_S dS, \quad (3.47)$$

здесь интегрирование ведется по площади сечения вертикальной плоскостью цилиндра постоянного нормального напряжения. Аналогично определяется координата центра масс области,

$$z_0 = \frac{\int_V z \rho dV}{\int_V \rho dV} = \frac{\rho l \int_S z dS}{\int_V \rho dV}, \quad (3.48)$$

которая выступает в качестве начального положения при движении сосредоточенной массы под действием поверхностной уплотняющей силы.

Длина границы сечения  $L_0 = \int_{dV} dl$ , необходима для вычисления площади боковой

поверхности цилиндрической области, существенной для определения сил, действующих на последовательно взаимодействующие цилиндрические тела модели. Считаем, что во время работы катка их форма и размер определяется видом соответствующих изобар. Жесткость массивной области, характеризуемой величиной модуля деформации относительно осевого сжатия  $E$ , вычисляется согласно следующего выражения

$$c_{01} = \int_V dc = \int_0^l dy \int_{-b}^b \frac{\sigma dx}{\int_0^{z(\sigma)} \frac{\sigma(x,z)}{E} dz} = El \int_{-b}^b \frac{\sigma_1 dx}{\int_0^{z(\sigma_1)} \sigma(x,z) dz}, \quad (3.49)$$

где  $l$  - длина цилиндрической области, а  $\sigma_1$  - постоянное значение напряжения, определяющего границу области. Соответственно, ее вязкость аналогично (3.49)

$$b_0 = \int db \quad (3.50)$$

Результаты исследований представлены в Таблице 3.1. в безразмерной форме в протабулированном виде, не допускающем простого аналитического представления в виде приближенных формул. Расчеты были проведены в обезразмеренных координатах  $\zeta = z/b$ ,  $\xi = x/b$ , в которых уравнение границы сечения принимает вид  $\frac{\pi\sigma_z}{\sigma_0} = \arctan\left(\frac{\xi+1}{\gamma\zeta}\right) - \arctan\left(\frac{\xi-1}{\gamma\zeta}\right)$ , где  $b$  - полуширина области распределения нагрузки (пятна контакта).

Длина границы приповерхностной цилиндрической области, координата ее центра масс (в безразмерных единицах, приведенных к полуширине пятна контакта), жесткости, вязкости, соответствующие поверхностям постоянного напряжения для различных отношений в безразмерных единицах (величины, имеющие размерность длины приведены к полуширине пятна контакта) приведены в Таблице 3.1.

Значения соответствующих величин в случае, когда напряжение принимает значение между протабулированными, определяются линейной интерполяцией

$$Y(\sigma) = Y(\sigma_i) + \frac{Y(\sigma_j) - Y(\sigma_i)}{(\sigma_j - \sigma_i)} (\sigma - \sigma_i), \quad \sigma_j > \sigma > \sigma_i \quad (3.51)$$

Расчетные формулы для вычисления массы, положения центра масс, площади боковой поверхности, жесткости и вязкости в случае перехода к размерным величинам имеют вид для длины, приведенной к полуширине пятна контакта  $m_0 = \rho b^2 l S_0$ ,  $S_1 = b l L_{01}$ ,  $z_{01} = b z_0$ ,  $c_{01} = E l c_0$

Таблица 3.1 – Площадь сечения приповерхностной области  $S_0$ , ограниченной поверхностью постоянного нормального напряжения.

$\sigma_z/\sigma_0$	$S_0$	$z_0$	$L_0$	$c_0$	$b_0$
0,04	399,8205	15,8383	75,28929	2,017762	1,142836
0,08	101,255	7,815822	36,90849	2,165012	1,127367
0,12	45,85263	5,109581	24,2049	2,275756	1,101498
0,16	26,37896	3,739077	17,9034	2,371972	1,066345
0,2	17,30174	2,906891	14,14731	2,464689	1,023397
0,24	12,32008	2,346233	11,64875	2,562304	0,974226
0,28	9,274494	1,942071	9,853292	2,673009	0,920379
0,32	7,262545	1,636419	8,48234	2,807216	0,863294
0,36	5,852793	1,396751	7,383235	2,979746	0,804314
0,4	4,817751	1,203348	6,4738	3,213102	0,744707
0,44	4,028144	1,043529	5,719222	3,551463	0,685667
0,48	3,406018	0,908757	5,106585	4,11608	0,628265
0,52	2,902037	0,793065	4,601019	5,716693	0,573202
0,56	2,483683	0,692154	4,14393	7,634173	0,520496
0,6	2,128768	0,602841	3,713237	9,279882	0,46985
0,64	1,821683	0,522719	3,324278	11,23644	0,420919
0,68	1,551141	0,449926	2,992406	12,18541	0,373351
0,72	1,30877	0,382992	2,720727	15,11531	0,326793
0,76	1,088204	0,320736	2,504331	16,63483	0,280903
0,8	0,884481	0,262188	2,33566	20,9419	0,235339

0,84	0,693628	0,206534	2,20739	24,59477	0,18976
0,88	0,512377	0,153077	2,113493	32,42907	0,143814
0,92	0,337951	0,101201	2,04946	47,90363	0,097138
0,96	0,167905	0,05035	2,01222	86,02082	0,049341

В том случае, если область, реализующая одно из тел модели при работе катка, располагается между двумя изобарами, то значения соответствующих величин массы, жесткости, вязкости и координаты его центра масс находятся из таблиц, приведенных в приложении. Если напряжения на границах областей принимают значения, промежуточные по отношению к протабулированным, то используется интерполяционная формула

$$Y(\sigma_1, \sigma_2) = Y(\sigma_i, \sigma_j) + \frac{Y(\sigma_{i+1}, \sigma_j) - Y(\sigma_i, \sigma_j)}{(\sigma_{i+1} - \sigma_i)} (\sigma_1 - \sigma_i) + \frac{Y(\sigma_i, \sigma_{j+1}) - Y(\sigma_i, \sigma_j)}{(\sigma_{j+1} - \sigma_j)} (\sigma_2 - \sigma_j), \quad (3.52)$$

$$\sigma_{j+1} > \sigma_2 > \sigma_j, \quad \sigma_{i+1} > \sigma_1 > \sigma_i,$$

Особый интерес представляет задача определения параметров активной области в том случае, когда поверхность пятна контакта не является плоской, что имеет место при работе реальных катков по уплотнению грунтовых сред. Даже численное вычисление параметров представляется крайне затруднительным, поскольку точное выражение для поверхностей постоянного напряжения не имеет аналитического выражения. В работе предлагается учесть тот факт, что форма и размер поверхностей постоянного нормального напряжения для плоского пятна контакта и пятна контакта в виде участка поверхности кругового цилиндра достаточно близки, хотя и отличаются. В случае, когда угол раствора для области цилиндра, соприкасающейся с поверхностью грунтового слоя, стремится к нулю, они совпадают, существенно отличаясь для больших углов раствора, трудно реализуемых при уплотнении вибрационными катками.

По итогам проведения аналитического исследования формы и размера областей постоянного напряжения для пятна контакта в форме участка цилиндрической поверхности были вычислены поправочные коэффициенты,

приближающие величину напряжения в толще слоя выражением для напряжений для плоского пятна контакта [177]. При этом полуширина пятна контакта  $\beta$  также определяется из параметров цилиндра (вальца) и угла раствора приповерхностной области.

$$\sigma_z \approx \frac{\sigma_0}{\pi} \left( \arctan\left(\frac{a_x x}{\gamma a_z (z + \Delta z)}\right) - \arctan\left(\frac{a_x x}{\gamma a_z (z + \Delta z)}\right) \right) \quad (3.53)$$

Таблица 3.2 – Поправочные коэффициенты  $a_z$ ,  $a_x$

$\alpha$ , град	$a_z$	$a_x$
5	0.95	1
10	0.95	1.06
15	0.96	1.13
20	0.96	1.21
25	0.97	1.30
30	0.97	1.39

Таблица 3.3 – Поправочные коэффициенты,  $\Delta z$

$R$ , м	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\alpha$ , град	0,000761	0,003038	0,006815	0,012061	0,018738
5	0,001522	0,006077	0,01363	0,024123	0,037477
10	0,002283	0,009115	0,020445	0,036184	0,056215
15	0,003044	0,012154	0,027259	0,048246	0,074954
20	0,003805	0,015192	0,034074	0,060307	0,093692
25	0,000761	0,003038	0,006815	0,012061	0,018738

Таблица 3.4 – Поправочные коэффициенты,  $\beta$ 

$R, \text{ м}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\alpha, \text{ град}$	0,017431	0,03473	0,051764	0,068404	0,084524
5	0,034862	0,069459	0,103528	0,136808	0,169047
10	0,052293	0,104189	0,155291	0,205212	0,253571
15	0,069725	0,138919	0,207055	0,273616	0,338095
20	0,087156	0,173648	0,258819	0,34202	0,422618
25	0,017431	0,03473	0,051764	0,068404	0,084524

Вычисление поправочных коэффициентов в случае, когда величина угла раствора, определяющая вид приповерхностной цилиндрической области лежит между табулированными, ведется линейной интерполяцией, описанной выше.

Для вычисления величин модуля деформации и динамической вязкости были использованы полиномиальные зависимости, аппроксимирующие известные экспериментальные зависимости, в частности, проф. Д.Д.Баркана, С.В.Вялова, Н.Я.Хархуты. Их уравнения регрессии и графическое представление приведены на рисунках 3.14-3.17.

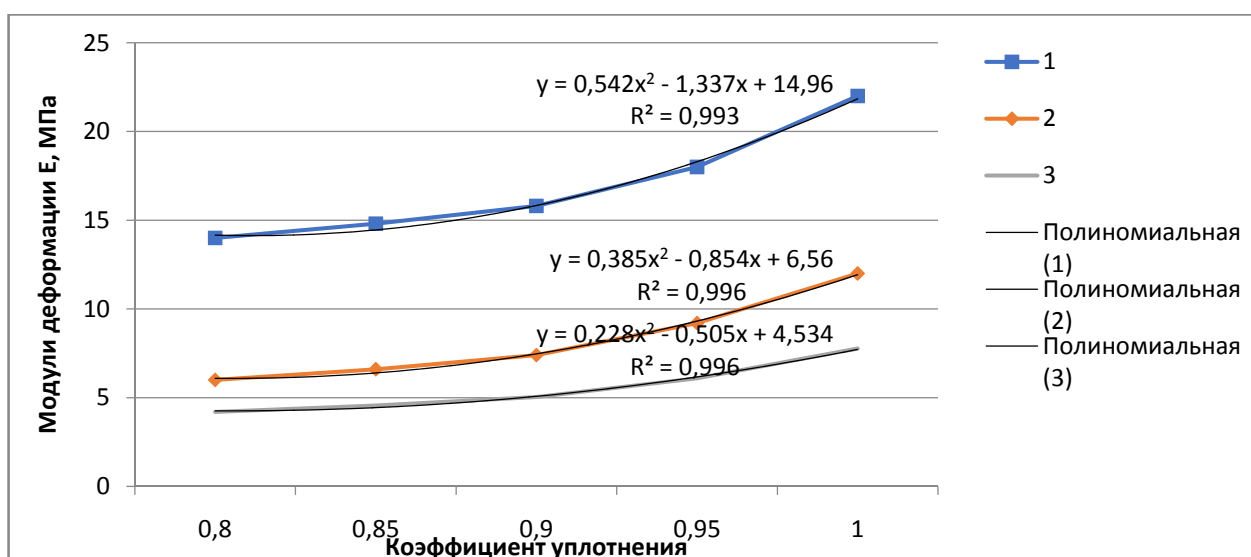


Рисунок 3.14 – Зависимость модулей деформации супеси от плотности: 1-модуль Юнга, 2-модуль пластической деформации, 3-модуль полной деформации

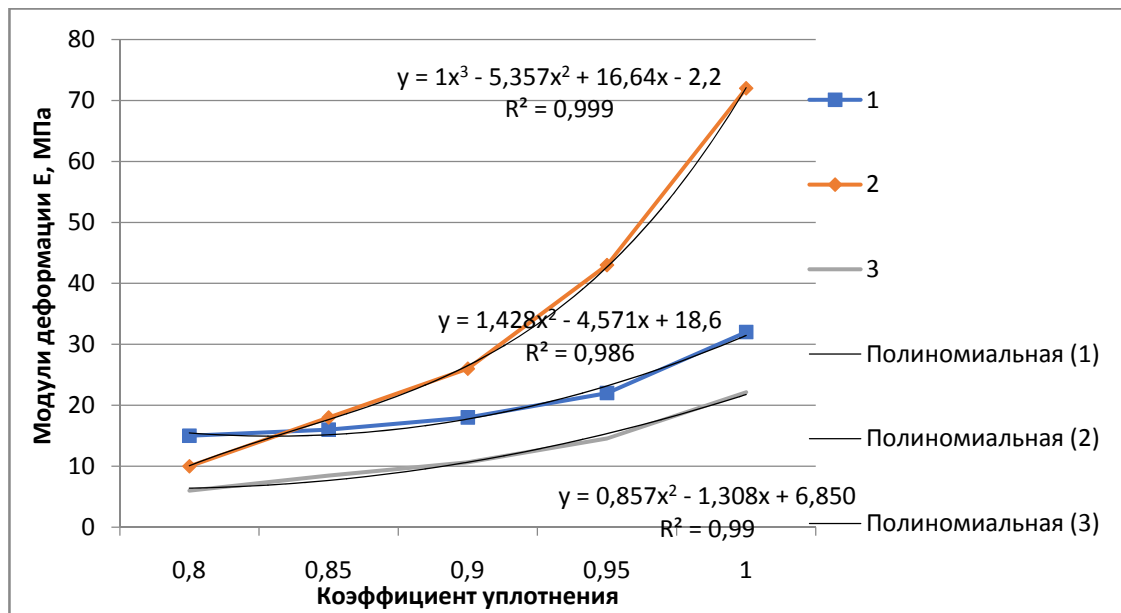


Рисунок 3.15 – Зависимость модулей деформации суглинка от плотности: 1- модуль Юнга, 2-модуль пластической деформации, 3-модуль полной деформации

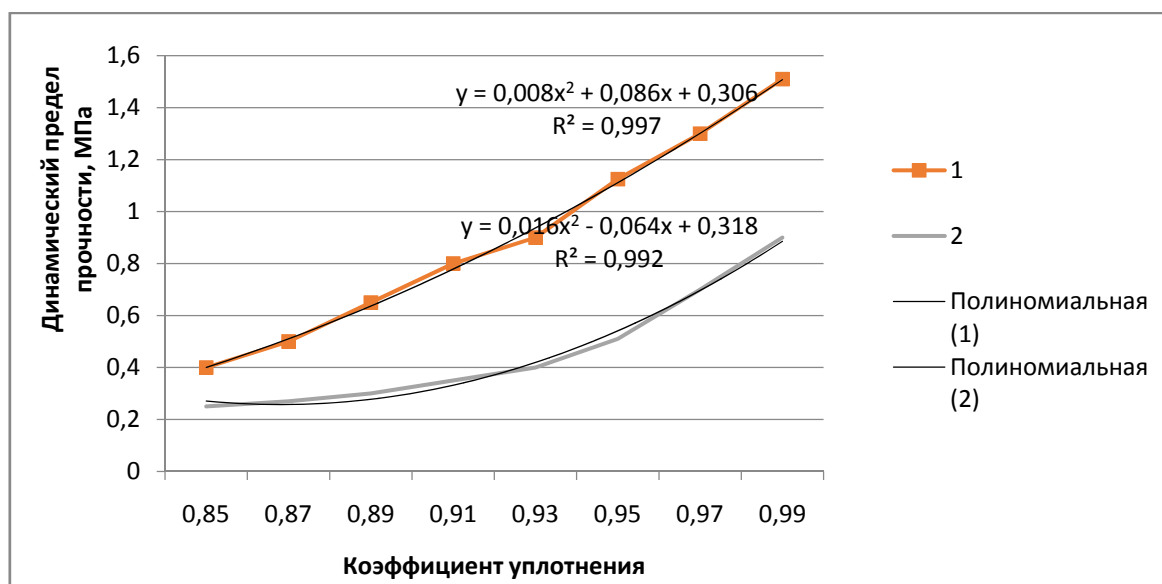


Рисунок 3.16 – Зависимость динамического предела прочности грунтов от плотности: 1- суглинок, 2- супесь

Аппроксимирующие зависимости динамической вязкости грунтов и их графики приведены на рисунке 3.17.



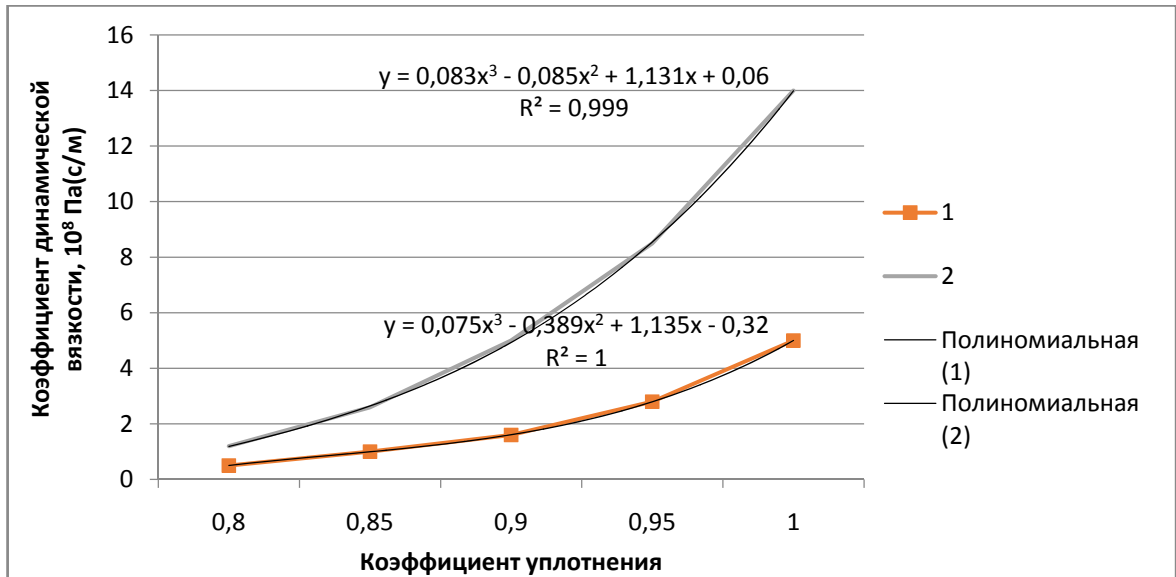


Рисунок 3.17 Зависимость динамической вязкости грунтов от плотности:

1- суглинок, 2- супесь

Стандартными способами определения деформационных динамических свойств грунтов являются испытания. В случае определения модулей Юнга и моделей упругой и пластической деформации относительно сжатия, используются динамические испытания, как правило, для деформации осевого сжатия [76].

Таблица 3.5 — Положение центра масс  $Z_{12}$  цилиндрической области между поверхностями постоянного напряжения соответствующим различным

отношениям  $\sigma_z/\sigma_0$  (в безразмерных единицах, приведенных к полуширине пятна контакта)

0,04	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96
0,04	-	18,56	17,23	16,69	16,42	16,27	16,17	16,10	16,05	16,02	15,99	15,97	15,95	15,93	15,92	15,91	15,90	15,89	15,88	15,87	15,87	15,86	15,85	15,84
0,08	18,56	-	10,06	9,25	8,83	8,57	8,41	8,29	8,21	8,15	8,10	8,06	8,02	7,99	7,97	7,95	7,93	7,91	7,90	7,88	7,87	7,85	7,84	7,83
0,12	17,23	10,06	-	6,97	6,44	6,12	5,91	5,76	5,65	5,57	5,50	5,45	5,40	5,36	5,33	5,30	5,27	5,25	5,23	5,20	5,18	5,17	5,15	5,13
0,16	16,69	9,25	6,97	-	5,33	4,96	4,71	4,54	4,41	4,31	4,22	4,16	4,10	4,06	4,01	3,98	3,94	3,91	3,89	3,86	3,83	3,81	3,79	3,76
0,20	16,42	8,83	6,44	5,33	-	4,29	4,02	3,83	3,68	3,56	3,47	3,40	3,33	3,28	3,23	3,19	3,15	3,11	3,08	3,05	3,02	2,99	2,96	2,93
0,24	16,27	8,57	6,12	4,96	4,29	-	3,58	3,37	3,21	3,08	2,98	2,90	2,82	2,76	2,71	2,66	2,62	2,58	2,54	2,51	2,47	2,44	2,41	2,38
0,28	16,17	8,41	5,91	4,71	4,02	3,58	-	3,05	2,87	2,74	2,63	2,54	2,47	2,40	2,34	2,29	2,24	2,20	2,16	2,12	2,08	2,05	2,01	1,98
0,32	16,10	8,29	5,76	4,54	3,83	3,37	3,05	-	2,63	2,49	2,37	2,28	2,20	2,13	2,07	2,01	1,96	1,91	1,87	1,83	1,79	1,75	1,71	1,67
0,36	16,05	8,21	5,65	4,41	3,68	3,21	2,87	2,63	-	2,30	2,18	2,08	1,99	1,92	1,85	1,79	1,74	1,69	1,64	1,60	1,56	1,52	1,48	1,44
0,40	16,02	8,15	5,57	4,31	3,56	3,08	2,74	2,49	2,30	-	2,02	1,91	1,82	1,75	1,68	1,62	1,56	1,51	1,46	1,41	1,37	1,33	1,29	1,24
0,44	15,99	8,10	5,50	4,22	3,47	2,98	2,63	2,37	2,18	2,02	-	1,78	1,69	1,61	1,54	1,47	1,42	1,36	1,31	1,26	1,22	1,17	1,13	1,09
0,48	15,97	8,06	5,45	4,16	3,40	2,90	2,54	2,28	2,08	1,91	1,78	-	1,57	1,49	1,42	1,35	1,29	1,24	1,18	1,14	1,09	1,04	1,00	0,95
0,52	15,95	8,02	5,40	4,10	3,33	2,82	2,47	2,20	1,99	1,82	1,69	1,57	-	1,39	1,32	1,25	1,19	1,13	1,08	1,03	0,98	0,93	0,88	0,84
0,56	15,93	7,99	5,36	4,06	3,28	2,76	2,40	2,13	1,92	1,75	1,61	1,49	1,39	-	1,23	1,16	1,10	1,04	0,98	0,93	0,88	0,83	0,79	0,74
0,60	15,92	7,97	5,33	4,01	3,23	2,71	2,34	2,07	1,85	1,68	1,54	1,42	1,32	1,23	-	1,08	1,01	0,95	0,90	0,84	0,79	0,75	0,70	0,65
0,64	15,91	7,95	5,30	3,98	3,19	2,66	2,29	2,01	1,79	1,62	1,47	1,35	1,25	1,16	1,08	-	0,94	0,88	0,82	0,77	0,72	0,67	0,62	0,57
0,68	15,90	7,93	5,27	3,94	3,15	2,62	2,24	1,96	1,74	1,56	1,42	1,29	1,19	1,10	1,01	0,94	-	0,81	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
0,72	15,89	7,91	5,25	3,91	3,11	2,58	2,20	1,91	1,69	1,51	1,36	1,24	1,13	1,04	0,95	0,88	0,81	-	0,69	0,63	0,58	0,53	0,48	0,43
0,76	15,88	7,90	5,23	3,89	3,08	2,54	2,16	1,87	1,64	1,46	1,31	1,18	1,08	0,98	0,90	0,82	0,75	0,69	-	0,57	0,52	0,47	0,42	0,37
0,80	15,87	7,88	5,20	3,86	3,05	2,51	2,12	1,83	1,60	1,41	1,26	1,14	1,03	0,93	0,84	0,77	0,70	0,63	0,57	-	0,46	0,41	0,36	0,31
0,84	15,87	7,87	5,18	3,83	3,02	2,47	2,08	1,79	1,56	1,37	1,22	1,09	0,98	0,88	0,79	0,72	0,65	0,58	0,52	0,46	-	0,36	0,31	0,26
0,88	15,86	7,85	5,17	3,81	2,99	2,44	2,05	1,75	1,52	1,33	1,17	1,04	0,93	0,83	0,75	0,67	0,60	0,53	0,47	0,41	0,36	-	0,25	0,20
0,92	15,85	7,84	5,15	3,79	2,96	2,41	2,01	1,71	1,48	1,29	1,13	1,00	0,88	0,79	0,70	0,62	0,55	0,48	0,42	0,36	0,31	0,25	-	0,15
0,96	15,84	7,83	5,13	3,76	2,93	2,38	1,98	1,67	1,44	1,24	1,09	0,95	0,84	0,74	0,65	0,57	0,50	0,43	0,37	0,31	0,26	0,20	-	-

Таблица 3.6 – Площадь  $S_{12}$  цилиндрической области между поверхностями постоянного напряжения, соответствующих различным отношениям  $\sigma_z/\sigma_0$  (в безразмерных единицах, приведенных к полуширине пятна контакта)

0,04	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,08	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,12	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,16	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,20	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,24	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,28	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,32	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,36	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,40	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,44	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,48	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,52	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,56	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,60	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,64	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,68	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,72	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,76	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,80	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,84	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,88	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,92	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09
0,96	0,00	298,57	353,97	373,44	382,52	387,50	390,55	392,56	393,97	91,98	93,99	95,40	96,44	97,23	97,85	98,35	98,77	99,13	99,43	99,70	99,95	100,17	100,37	100,56	100,74	100,92	101,09

$$m_{12} = \rho b^2 I S_{12}$$

Таблица 3.7 — Жесткость  $C_{12}$  цилиндрической области между поверхностями постоянного напряжения соответствующим различным отношениям

$\sigma_z/\sigma_0$  (в безразмерных единицах, приведенных к полуширине пятна контакта)

0,04	-	29,67	17,80	13,51	11,13	9,49	8,23	7,17	6,25	5,42	4,67	3,96	3,12	2,74	2,58	2,46	2,42	2,33	2,30	2,23	2,20	2,15	2,11	2,07
0,08	-	-	44,49	24,81	17,81	13,96	11,39	9,46	7,92	6,64	5,55	4,57	3,48	3,02	2,82	2,68	2,63	2,53	2,49	2,41	2,37	2,32	2,27	2,22
0,12	-	-	-	56,10	29,69	20,35	15,31	12,02	9,63	7,80	6,34	5,09	3,78	3,24	3,02	2,85	2,80	2,68	2,64	2,55	2,51	2,45	2,39	2,34
0,16	-	-	-	-	63,05	31,93	21,06	15,30	11,63	9,06	7,14	5,60	4,05	3,44	3,19	3,01	2,95	2,81	2,77	2,67	2,63	2,56	2,50	2,44
0,20	-	-	-	-	-	64,70	31,63	20,20	14,26	10,58	8,05	6,14	4,33	3,64	3,36	3,16	3,09	2,94	2,89	2,79	2,74	2,67	2,60	2,54
0,24	-	-	-	-	-	-	61,87	29,37	18,29	12,65	9,20	6,79	4,64	3,86	3,54	3,32	3,24	3,09	3,03	2,92	2,86	2,78	2,71	2,64
0,28	-	-	-	-	-	-	-	55,91	25,97	15,90	10,81	7,62	5,02	4,11	3,75	3,51	3,42	3,25	3,18	3,06	3,00	2,91	2,83	2,76
0,32	-	-	-	-	-	-	-	-	48,48	22,22	13,40	8,83	5,52	4,44	4,02	3,74	3,65	3,45	3,38	3,24	3,17	3,07	2,98	2,90
0,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41,03	18,51	10,79	6,22	4,89	4,39	4,06	3,94	3,71	3,63	3,47	3,39	3,28	3,18	3,09
0,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33,72	14,65	7,34	5,55	4,91	4,50	4,36	4,08	3,98	3,80	3,70	3,57	3,44	3,34
0,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,89	9,38	6,64	5,75	5,19	5,01	4,64	4,52	4,28	4,15	3,99	3,84	3,70
0,48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,70	8,93	7,40	6,50	6,22	5,66	5,47	5,12	4,94	4,71	4,50	4,32
0,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,76	14,89	11,64	10,77	9,19	8,71	7,86	7,45	6,94	6,49	6,12
0,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43,05	23,81	20,44	15,42	14,11	12,01	11,07	9,98	8,38	
0,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53,29	38,92	24,04	20,99	16,66	14,90	13,00	11,51	10,40
0,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	144,28	43,79	34,62	24,25	20,69	17,19	14,68	12,92
0,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62,86	45,56	29,14	24,15	19,52	16,34	14,20
0,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	165,47	54,33	39,22	28,31	22,08	18,34
0,76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80,88	51,40	34,15	25,48	20,62
0,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	141,00	59,12	37,21	27,68
0,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	101,81	50,55	34,44
0,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52,05
0,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	108,11
0,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

$C_{12} = Elbc_{12}$

Таблица 3.8 – Вязкость  $b_{12}$  цилиндрической области между поверхностями постоянного напряжения соответствующим различным отношениям  $\sigma_z/\sigma_0$  (в безразмерных единицах, приведенных к полуширине пятна контакта)

$\sigma_z/\sigma_0$	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96
0,04	0,000	0,015	0,041	0,076	0,119	0,169	0,222	0,280	0,339	0,398	0,457	0,515	0,570	0,622	0,673	0,722	0,769	0,816	0,862	0,907	0,953	0,999	1,046	1,093
0,08	0,015	0,000	0,026	0,061	0,104	0,153	0,207	0,264	0,323	0,383	0,442	0,499	0,554	0,607	0,658	0,706	0,754	0,801	0,846	0,892	0,938	0,984	1,030	1,078
0,12	0,041	0,026	0,000	0,035	0,078	0,127	0,181	0,238	0,297	0,357	0,416	0,473	0,528	0,581	0,632	0,681	0,728	0,775	0,821	0,866	0,912	0,958	1,004	1,052
0,16	0,076	0,061	0,035	0,000	0,043	0,092	0,146	0,203	0,262	0,322	0,381	0,438	0,493	0,546	0,596	0,645	0,693	0,740	0,785	0,831	0,877	0,923	0,969	1,017
0,20	0,119	0,104	0,078	0,043	0,000	0,049	0,103	0,160	0,219	0,279	0,338	0,395	0,450	0,503	0,554	0,602	0,650	0,697	0,742	0,788	0,834	0,880	0,926	0,974
0,24	0,169	0,153	0,127	0,092	0,049	0,000	0,054	0,111	0,170	0,230	0,289	0,346	0,401	0,454	0,504	0,553	0,601	0,647	0,693	0,739	0,784	0,830	0,877	0,925
0,28	0,222	0,207	0,181	0,146	0,103	0,054	0,000	0,057	0,116	0,176	0,235	0,292	0,347	0,400	0,451	0,499	0,547	0,594	0,639	0,685	0,731	0,777	0,823	0,871
0,32	0,280	0,264	0,238	0,203	0,160	0,111	0,057	0,000	0,059	0,119	0,178	0,235	0,290	0,343	0,393	0,442	0,490	0,537	0,582	0,628	0,674	0,719	0,766	0,814
0,36	0,339	0,323	0,297	0,262	0,219	0,170	0,116	0,059	0,000	0,060	0,119	0,176	0,231	0,284	0,334	0,383	0,431	0,478	0,523	0,569	0,615	0,661	0,707	0,755
0,40	0,398	0,383	0,357	0,322	0,279	0,230	0,176	0,119	0,060	0,000	0,059	0,116	0,172	0,224	0,275	0,324	0,371	0,418	0,464	0,509	0,555	0,601	0,648	0,695
0,44	0,457	0,442	0,416	0,381	0,338	0,289	0,235	0,178	0,119	0,059	0,000	0,057	0,112	0,165	0,216	0,265	0,312	0,359	0,405	0,450	0,496	0,542	0,589	0,636
0,48	0,515	0,499	0,473	0,438	0,395	0,346	0,292	0,235	0,176	0,116	0,057	0,000	0,055	0,108	0,158	0,207	0,255	0,301	0,347	0,393	0,439	0,484	0,531	0,579
0,52	0,570	0,554	0,528	0,493	0,450	0,401	0,347	0,290	0,231	0,172	0,112	0,055	0,000	0,053	0,103	0,152	0,200	0,246	0,292	0,338	0,383	0,429	0,476	0,524
0,56	0,622	0,607	0,581	0,546	0,503	0,454	0,400	0,343	0,284	0,224	0,165	0,108	0,053	0,000	0,051	0,100	0,147	0,194	0,240	0,285	0,331	0,377	0,423	0,471
0,60	0,673	0,658	0,632	0,596	0,554	0,504	0,451	0,393	0,334	0,275	0,216	0,158	0,103	0,051	0,000	0,049	0,096	0,143	0,189	0,235	0,280	0,326	0,373	0,421
0,64	0,722	0,706	0,681	0,645	0,602	0,553	0,499	0,442	0,383	0,324	0,265	0,207	0,152	0,100	0,049	0,000	0,048	0,094	0,140	0,186	0,231	0,277	0,324	0,372
0,68	0,769	0,754	0,728	0,693	0,650	0,601	0,547	0,490	0,431	0,371	0,312	0,255	0,200	0,147	0,096	0,048	0,000	0,047	0,092	0,138	0,184	0,230	0,276	0,324
0,72	0,816	0,801	0,775	0,740	0,697	0,647	0,594	0,537	0,478	0,418	0,359	0,301	0,246	0,194	0,143	0,094	0,047	0,000	0,046	0,091	0,137	0,183	0,230	0,277
0,76	0,862	0,846	0,821	0,785	0,742	0,693	0,639	0,582	0,523	0,464	0,405	0,347	0,292	0,240	0,189	0,140	0,092	0,046	0,000	0,046	0,091	0,137	0,184	0,232
0,80	0,907	0,892	0,866	0,831	0,788	0,739	0,685	0,628	0,569	0,509	0,450	0,393	0,338	0,285	0,235	0,186	0,138	0,091	0,046	0,000	0,046	0,092	0,138	0,186
0,84	0,953	0,938	0,912	0,877	0,834	0,784	0,731	0,674	0,615	0,555	0,496	0,439	0,383	0,331	0,280	0,231	0,184	0,137	0,091	0,046	0,000	0,046	0,093	0,140
0,88	0,999	0,984	0,958	0,923	0,880	0,830	0,777	0,719	0,661	0,601	0,542	0,484	0,429	0,377	0,326	0,277	0,230	0,183	0,137	0,092	0,046	0,000	0,047	0,094
0,92	1,046	1,030	1,004	0,969	0,926	0,877	0,823	0,766	0,707	0,648	0,589	0,531	0,476	0,423	0,373	0,324	0,276	0,230	0,184	0,138	0,093	0,047	0,000	0,048
0,96	1,093	1,078	1,052	1,017	0,974	0,925	0,871	0,814	0,755	0,695	0,636	0,579	0,524	0,471	0,421	0,372	0,324	0,277	0,232	0,186	0,140	0,094	0,048	0,000

$$B_{12} = \eta b_{12} l b$$

### 3.5. Выводы по главе 3.

Теоретическое обоснование разработки методов и конструирования устройств, обеспечивающих интенсификацию уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве, требует решения задачи о моделировании взаимодействия рабочего органа уплотняющей дорожной машины с уплотняемым слоем материала.

Основой для этого выступает метод сосредоточенных параметров, при котором область грунтового слоя, с которой рабочий орган непосредственно взаимодействует, рассматривается как массивный элемент, обладающий вязкими, упругими и пластическими свойствами. Такое рассмотрение дает возможность выявить как величину остаточного смещения поверхности слоя в результате неупругого деформирования материала его толщи, так и определить энергетические характеристики взаимодействия, включая мощность, затрачиваемую на деформирование, тем самым определяя энергоемкость операции уплотнения.

Сложности, связанные с применением подхода сосредоточенных параметров для описания взаимодействия РО катка и грунта, относятся в основном к процедуре его непосредственной реализации. 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 [104].

Анализ существующих моделей взаимодействия катка и грунтовой среды, определяемое ее свойствами, выявил комбинированные модели, описывающие уплотнение как накопление неупругих деформаций [107]. Работа катка приводит

к возникновению пластических деформаций при таком подходе могут рассматриваться как результат взаимодействия РО и грунта, при котором сила сопротивления зависит от координат (линейно или нелинейно) и деформирования, отвечающему состоянию, моделируемому текучестью. Проведенные исследования позволили описать механические модели, реализующие динамику толщи слоя грунтовой среды при силовом воздействии уплотнителя и прийти к следующим выводам:

1. Для модельного описания взаимодействия в системе «рабочий орган – активная область грунтового слоя» может быть применено семейство многомассовых моделей, построенных в рамках подхода сосредоточенных параметров;
2. Модели отражают свойства грунтового слоя и его деформационные характеристики, задаваемые напряженно деформируемым состоянием точек области слоя, учитывающие интенсивность поглощения энергии уплотнителя;
3. Массивные тела модели представляют собой области грунтового слоя, взаимодействующие друг с другом и рабочим органом уплотнителя;
4. Выбор формы и размеров областей может осуществляться принудительно, на основании экспериментальных данных или с учетом распределения нормальных напряжений в деформируемом слое, порождаемых работой катка;
5. При выборе размера и формы областей модели активной области на основании распределения нормальных напряжений в толще слоя, при динамических режимах работы катка, модель изменяется с перераспределением реологических и массовых характеристик между неэквивалентными с точки зрения деформативных и реологических свойств элементарных областей слоя.

Это подход наилучшим образом подходит для исследования влияния особенностей передачи энергии при взаимодействии рабочего органа и грунта для определения ее долей, идущих на пластическое деформирование среды, расходуемых на возбуждение колебаний материала слоя, затрачиваемых на диссипацию вследствие влияния сил вязкого трения в среде.

#### ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ СРЕД

Исследование процесса работы катков по уплотнению грунтов и выявление особенностей, обуславливающих повышение эффективности поглощения материалом энергии, приводящей к неупругому деформированию слоя без его разрушения, является основой для последующего выбора энергоэффективных режимов работ уплотняющих дорожных машин.

Теоретическое описание процессов, проходящих в грунтовых средах при работе катка, возможно в рамках приведенных выше модельных представлений при том условии, что результаты экспериментальных исследований, проводимых в рамках применимости используемых моделей не находятся с ними в противоречии.

Особенности исследований, позволяющих выявить энергоэффективность процессов при работе катка в системе «рабочий органа уплотнителя - грунтовая среда» обусловлены необходимостью исследования процессов, проходящих в реальных грунтовых средах при их деформировании.

Экспериментальное изучение различных аспектов взаимодействия РО катков и грунтовых сред при уплотнении давно выступает в качестве естественного пути выявления закономерностей работы катков, позволяющих определить как режимные параметры, так и особенности слоя среды при наиболее интенсивном накоплении пластических деформаций. Широкий спектр режимов нагружения, разнообразие характеристик материалов дают возможность получить обширные экспериментальные результаты и проверить правильность предсказаний предложенной теории. При этом возможен подход, рассматривающий как интегральные характеристики уплотняемого грунтового слоя – толщину и плотность, так и моментальные – значение величины деформации в заданный момент времени. Также возможно изучение



распределения плотностей и напряжений по глубине слоя, как, например в [223], что открывает перед исследователями значительные перспективы более подробного исследования процессов вызываемых катками в уплотняемых средах.

В этой связи нельзя не упомянуть вклад, внесенный в исследование проблемы такими учеными как Э.А. Абраменков [2], В.И.Баловнев [13], О.Т. Батраков [22], В.Ю. Гладков [46], Б.И. Филиппов [145], А.М. Гельфандбейм [44], Н.Я. Хархута [155], В.Б.Пермяков [117], Г.В. Кустарев [80] и др.

#### 4.1. Теоретическое обоснование исследования взаимодействия РО катка с грунтовой средой при импульсном воздействии

Импульсное воздействие при работе дорожных машин при уплотнении грунтовых сред реализуется трамбованием и выступает в качестве одного из эффективных способов достижения необходимых параметров прочности уплотняемого грунта. Одновременно трамбование является простым и удобным методом исследования свойств грунта. Основной величиной, принятой для определения состояния грунта в процессе деформирования, выступает коэффициент уплотнения, однако ниже основное внимание необходимо уделять абсолютной величине деформации, приобретаемой грунтовым слоем в результате одного цикла ударного воздействия груза, падающего на штамп известной формы, имитирующий РО катка.

Единичное ударное воздействие при трамбовании грунта является важным инструментом для изучения его свойств во многом потому, что параметры внешнего воздействия легко определяются и могут варьироваться в широком диапазоне в зависимости от требований эксперимента. Реологические характеристики грунта определяют его отклик на импульсную нагрузку и позволяют сделать непосредственный вывод о возникающих при этом силах сопротивления и деформациях, что достаточно непросто сделать для других режимов нагружения. Более того, физико-механические характеристики грунта,

выявленные при испытании единичным трамбующим импульсом, определяют его поведение и под воздействием нагружения с произвольной зависимостью от времени, реализующегося как при работе статических катков, так и для вибрационных.

Для описания взаимодействия твердого массивного трамбующего плоского штампа с поверхностью грунтового слоя используется подход сосредоточенных параметров, при котором вовлеченным во взаимодействие считается ограниченный объем грунта. Выбор вида поверхности, ограничивающей активную зону, диктуется условиями конкретной задачи и степенью приближения модельного описания к реальной ситуации. Следует, однако, отметить, что многократные исследования, в том числе и полевые, направленные на выявление размера и формы объема грунта, который подвергается непосредственному влиянию уплотняющего рабочего органа, дают хотя и схожие в целом, но различающиеся в деталях результаты, реализация которых позволяет существенно оптимизировать процесс уплотнения [1,2,8,13,24,25,40,46,68,77,155]. Этот факт объясняется существенным различием характеристик даже одного типа грунта в зависимости от партии и способа проведения предваряющих уплотнение работ.

Рассмотрим моделирование процесса деформирования грунтовой среды жестким штампом в линейном приближении. Грунтовая среда предполагается обладающей упругими, вязкими и пластическими свойствами, учет которых проводится зависимостью модуля деформации грунта от характера внешнего воздействия, включающего при нагружении как упругую, так и неупругую составляющую, исключаящуюся при разгрузке.

В ходе испытаний на упруговязкий участок грунта массой  $m$ , вертикально сбрасывается груз, свободно падающий до соударения с жестким штампом массой  $M$ , покоящимся на поверхности грунта (масса штампа известна). Скорость груза в момент соударения с со штампом равна  $V$ . Зависимости жесткости  $C$  и вязкости  $b$  эффективного объема грунта считаются в общем случае нелинейными и зависят от перемещения его центра масс при поверхностном

нагружении. Считаем силу сопротивления грунта деформированию зависящей от перемещения его поверхности относительно положения для недеформированного состояния и его первой и второй производных.

Явления, происходящие в грунте во время работы катка при трамбовании, практически полностью определяются протеканием переходного процесса для массивного упруго-вязкого элемента, моделирующего грунт. Переходные процессы в системе «штамп-грунт», с необходимостью происходящие при взаимодействии с РО катка, ведут к различным сценариям деформирования [141].

Движение тел системы при имеющем место неупругом ударе с частичным восстановлением можно условно разделить на 3 этапа:

1) Непосредственно этап соударения, когда движущийся штамп и покоящийся грунт начинают взаимодействовать. При этом штамп замедляется, а взаимодействующий с ним объем грунта ускоряется до достижения скорости совместного движения. Этот этап практически полностью описывается переходными процессами в системе.

2) Этап движения тел системы, как единого целого до полной остановки под действием сил сопротивления, возникающих в эффективном объеме грунтового слоя.

3) Этап восстановления грунта, при котором деформация частично восстанавливается за счет наличия упругой составляющей в модуле полной деформации. На этом этапе возможен подскок штампа в верхней точке. В случае подскока характер движения системы существенно меняется таким образом, что движение грунта и штампа становятся независимыми.

На первом этапе происходит перераспределение кинетической энергии между движущимся штампом и взаимодействующей с ним массой грунта, сопровождающееся его деформацией, в результате чего движение штампа и грунта становится согласованным. Отметим, что тяжелый упруго-вязкий элемент, представляющий грунт до столкновения со штампом деформирован под собственной тяжестью неравномерно, так что верхние слои деформированы

сильнее, чем нижние (в реальных ситуациях этим можно пренебречь в силу недостаточной толщины слоя). Переходные процессы, происходящие в подобных системах, хорошо описаны, например в [109] и [150], однако для рассматриваемого случая обладают определенными особенностями.

Переходной процесс в линейном колебательном звене, движение которого определяется уравнением

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = U(t), \quad (4.1)$$

В нашем случае функция  $U(t)$  представляет собой ступенчатую функцию Хевисайда, описывающую включение внешнего воздействия (падение груза на штамп):

$$U(t) = Mg\theta(t).$$

Начальное состояние упруго-вязкого элемента в момент соударения  $t=0$  будем характеризовать перемещением  $x_0 = mg/2c$ . Передаточная функция звена после проведения преобразования Лапласа и обезразмеривания коэффициентов определится как

$$W(p) = \frac{Mg}{mp^2 + bp + c} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}, \quad (4.2)$$

$$\text{где } K = \frac{Mg}{c}, \quad T^2 = \frac{m}{c}, \quad \xi = \frac{b}{2\sqrt{mc}}.$$

Характеристическое уравнение звена принимает вид

$$T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1 = 0 \quad (4.3)$$

и переходная характеристика, стандартно определяемая через корни характеристического уравнения звена, выглядит как

$$h(t) = K \left( 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (4.4)$$

$$\text{где } T_{1,2} = -\frac{1}{p_{1,2}} = \frac{T}{\sqrt{\xi^2 - 1} \mp \xi}$$

для аperiодического звена ( $\xi \geq 1$ ) и

$$h(t) = K \left( 1 - \frac{e^{-\frac{\xi}{T}t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \left( \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t + \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) \right) \quad (4.5)$$

для колебательного звена ( $0 \leq \xi < 1$ ).

Координата поверхности контакта рабочего органа катка (штампа) и эффективного объема грунта связана с координатой центра масс последнего функциональным соотношением  $x = f(X)$ . В качестве примера можно привести простейший случай выбора эффективного объема грунта в виде параллелепипеда (цилиндра). В этом случае  $x = X/2$ , однако, в других случаях зависимость имеет значительно более сложный вид, обсужденный выше для ряда простых, но важных с практической точки зрения случаев. Далее будем считать зависимость  $f(X)$  известной и определяемой выбранным при моделировании формой объема грунта. Экспериментальное исследование удобнее проводить для смещения поверхности грунта, в силу чего будем искать решение задачи для координаты  $X$ .

Связь между скоростями штампа (поверхности грунта) и центра масс грунта при согласованном движении дается соотношением

$$\dot{x} = f'(X)\dot{X}, \quad (4.6)$$

причем в момент соударения выполняются условия  $\dot{x}(0) = 0, \dot{X}(0) = V$ , и замедление штампа, сопровождающееся ускорением массы грунта, продолжается до выполнения условия (4.6).

Обмен кинетической энергией происходит до того момента, когда грунт и штамп не начинают двигаться как единое целое (согласованно). Однако скорость, которую должен приобрести грунт по закону сохранения импульса для неупругого удара, соответствующая скорости штампа не всегда может быть достигнута из-за высокой жесткости и вязкости грунта. Скорость поверхности при этом есть

$$\dot{X}_0 = \frac{MV}{M + mf'(X_0)}, \quad (4.7)$$

Соответственно, скорость центра масс грунта, соответствующая совместному движению

$$\dot{x}_0 = \frac{MV}{f'(X_0)(M + mf'(X_0))}. \quad (4.8)$$

Условие, при котором скорость совместного движения не достигается, можно получить из анализа переходных характеристик. Найдем максимальную скорость, которую приобретает грунт в ходе переходного процесса. Если она окажется больше, чем предполагается для согласованного движения. Скорость центра масс грунта при переходном процессе

$$v(t) = K \left( \frac{e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2} \right) = K p_1 p_2 \left( \frac{e^{p_1 t} - e^{p_2 t}}{p_1 - p_2} \right) = \frac{K}{T \sqrt{\xi^2 - 1}} e^{-\frac{\xi}{T} t} \sinh \left( \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{T} t \right) \quad (4.9)$$

для апериодического звена и

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{e^{-\frac{\xi}{T} t}}{T \sqrt{1 - \xi^2}} \left( \sqrt{1 - \xi^2} \cos \left( \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T} t + \arctan \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right) - \xi \sin \left( \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T} t + \arctan \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right) \right) = \\ &= K \frac{e^{-\frac{\xi}{T} t}}{T \sqrt{1 - \xi^2}} \sin \left( \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T} t \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

для периодического.

Максимальное значение скорости как для периодического, так и для апериодического случая можно достаточно просто определить. Такой класс задач в приложении к динамике ударного нагружения механических систем был рассмотрен В.Н.Тарасовым в [142].

Динамическую задачу будем рассматривать в рамках Лагранжева формализма классической механики, учитывающего возможность вязкого трения в системе. Функцию Лагранжа системы запишем в виде

$$L(x, X, \dot{x}, \dot{X}, t) = m \frac{\dot{x}^2}{2} + M \frac{\dot{X}^2}{2} - c(X) \frac{X^2}{2} - mgx - MgX, \quad (4.11)$$

При этом диссипативная функция системы  $L(x, X, \dot{x}, \dot{X}, t) = \frac{b(x)}{2} \dot{x}^2$  определяется через смещение центра масс уплотняемого объема грунта.

В рамках сделанных приближений уравнения движения системы имеют вид:

$$\begin{cases} M\ddot{X} = Mg - cX, \\ m\ddot{x} + b\dot{x} = mg. \end{cases} \quad (4.12)$$

Решение системы (4.12) удобно искать в системе координат, связанной с центром масс штампа и грунта.

Другим допущением будет независимость жесткости и вязкости грунта от координат. Это условие можно считать выполненным для малых деформаций. В общем случае это неверно, поскольку уплотнение вызывает изменение свойств грунта, влияя на жесткость и вязкость, одновременно повышая прочность. Однако для одного удара штампа это приближение может считаться справедливым.

Следует отметить, что входящая в уравнения движения жесткость вычисляется из зависимости упругой силы сопротивления деформированию от смещения поверхности, а не центра масс грунта. Тем не менее, связь между ними позволяет выявить, пусть даже и качественно, характер движения объема уплотняемого грунта при поверхностном деформировании.

Определим деформацию, которую приобретает грунт до этого момента из закона сохранения энергии. Будем считать, что при выполнении условия (4.6) скорость поверхности грунта равной  $\dot{X}_0$ , а смещение его границы равное  $X_0$ . Изменение кинетической энергии штампа пойдет на ускорение массы грунта и преодоление сил упругого и вязкого сопротивления, кроме этого, учтем изменение потенциальной энергии штампа в поле силы тяжести:

$$\frac{MV^2}{2} - \frac{M\dot{X}_0^2}{2} = \frac{m(f'(X_0)\dot{X}_0)^2}{2} + \frac{cX_0^2}{2} + \frac{bf'(X_0)\dot{X}_0X_0}{2} - X_0g(M + mf(X_0)). \quad (4.13)$$

Для определения начального смещения  $X_0$  найдем скорость  $\dot{X}_0$ , соответствующую совместному движению штампа и грунта из закона сохранения импульса

$$\dot{X}_0 = \frac{MV}{M + mf'(X_0)} \quad (4.14)$$

Найдя из решения уравнения (3) скорость  $\dot{X}_0$  и смещение  $X_0$ , решим задачу о совместном движении штампа и грунта в системе координат, связанной с центром

масс, имеющим координату

$$\bar{x} = \frac{MX + mx}{M + m} = \frac{MX + mf(X)}{M + m} \quad (4.15)$$

и подчиняющемся уравнению движения (по теореме о движении центра масс)

$$\ddot{\bar{x}} = \frac{\sum_i F_i^{ex}}{M + m}, \quad (4.16)$$

завися только от внешних сил, приложенных к телам системы.

Скорость движения центра масс системы «штамп-грунт» с учетом связи  $X = f(x)$  можно найти из следующего соотношения

$$\dot{\bar{x}} = \frac{(M + mf'(X))\dot{X}}{M + m}, \quad \dot{x} = f'(X)\dot{X} \quad (4.17)$$

откуда следует выражение для скорости поверхности грунта и его центра масс

$$\dot{X} = \frac{M + m}{M + mf'(X)} \dot{\bar{x}}, \quad \dot{x} = \frac{(M + m)f'(X)}{M + mf'(X)} \dot{\bar{x}}. \quad (4.18)$$

Учитывая связь, уравнение движения системы, следующее из (1):

$$(m + M)\ddot{\bar{x}} + b\dot{\bar{x}} + cX = (m + M)g,$$

сводится к уравнению, описывающему движение центра масс:

$$(m + M)\ddot{\bar{x}} + b \frac{(M + m)f'(X)}{M + mf'(X)} \dot{\bar{x}} + c \frac{M + m}{Mf(x) + m} \bar{x} = (m + M)g, \quad (4.19)$$

и после приведения к стандартной форме для осциллятора с диссипацией записывается как

$$\ddot{\bar{x}} + 2k(\bar{x})\dot{\bar{x}} + \omega_0^2(\bar{x})\bar{x} = g \quad (4.20)$$

с введенными обозначениями для параметров определяющих вязкие и упругие свойства модели грунта

$$k(\bar{x}) = \frac{1}{2} \frac{\bar{b}}{M + mf'(X)} \quad \omega_0^2(\bar{x}) = \frac{\bar{c}}{M + mf(X)} \quad (4.21)$$

Начальные условия определяются состоянием системы в момент соударения штампа с поверхностью грунта при начальных условиях

$$\bar{x}(0) = \frac{MX_0 + mf(X_0)}{M + m}; \quad \dot{\bar{x}}(0) = \frac{(M + mf'(X_0))\dot{X}_0}{M + m}. \quad (4.22)$$



Точное решение полученного уравнения возможно в редких случаях простейших зависимостей координаты центра масс эффективного объема грунта от положения его поверхности. В более сложных ситуациях, близких к реальным, требуется привлечение численных методов.

Реальный характер кривой, описывающей зависимость деформаций грунта от режима работы катка, также должен учитываться при построении модели. При нагружении грунт испытывает как пластическую, так и упругую деформацию, а при разгрузке восстанавливается только за счет сил упругости. Такое поведение грунта можно описать, введя в модель в качестве дополнительного условия силу неупругого сопротивления деформации.

Тем самым при восстановлении деформации после того, как скорость центра масс системы стала равной нулю (при этом  $\dot{X} = 0, \dot{x} = 0$ ) уравнение, которому подчиняется движение центра масс системы, меняется

$$(m+M)\ddot{\bar{x}} + b \frac{(M+m)f'(X)}{M+mf'(X)} \dot{\bar{x}} + c_1 \frac{M+m}{Mf(x)+m} \bar{x} = (m+M)g, \bar{x}(t_0) = \bar{x}_{\max}, \quad (4.23)$$

при этом жесткость, определяющая упругую составляющую силы сопротивления, вычисляется согласно подходу, предложенному для линейной по деформации силе сопротивления грунта сжатию.

Дальнейшее описание движения системы происходит при решении указанного уравнения. Следует отметить, что в силу значительной вязкости, объем грунта, моделируемый упруговязким элементом, является существенно аperiodическим звеном. Но в отличие от звена с неизменными упругими свойствами релаксационные процессы в нем приводят к восстановлению не до состояния, определенного статическим нагружением суммарной массой груза и штампа, а до состояния с остаточной деформацией.

Решение уравнения (4.23) позволяет при проведении эксперимента сопоставить реальные показатели деформирования активной области слоя грунтовой среды показателям, вычисленным теоретически. Это дает возможность проверить адекватность моделирования движения активной области при взаимодействии со штампом и вычисления деформационных характеристик слоя.

## 4.2 Методика проведения экспериментальных исследований взаимодействия РО катка и грунтовой среды

Этап планирования экспериментальных исследований сложного процесса работы катка как деформирования грунтовой среды штампом различной формы должен обеспечиваться правильным выбором факторов, влияющих его протекание. Следует отметить, что эксперименты ниже имели целью выявление адекватности модельного описания взаимодействия РО и упруговязкопластичной грунтовой среды при работе катка и его дальнейшего использования для выявления энергоэффективных режимов уплотнения грунтовых сред катками. Это накладывает ограничения на возможность выбора факторов, влияющих на результат эксперимента.

Традиционно используемыми методами экспериментального исследования являются активный и пассивный, причем использование каждого из них диктуется требованиями и задачами проводимого исследования.

### 4.2.1. Планирование и проведение эксперимента для определения характера взаимодействия РО, представляемого штампами различной формы, с грунтовой средой

**Выбор критерия.** Критерий (Y): необратимое смещение штампа при падении на него 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 устанавливается 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 таблице 4.1. Для оценки числа экспериментов  $N$ , требуемых для охвата всех пар вариаций рассматриваемых  $k$  факторов можно использовать известное соотношение [79]

$$N = 2^k$$

Таблица 4.1 – Интервалы изменения факторов в двухфакторном эксперименте (плоский штамп)

Факторы	Уровни	
	Min(-1)	Max(+1)
X1	85 Н	165 Н
X2	0.25 м	0.85 м
X3	0.2 м	0.34 м

Таблица 4.2 – Интервалы изменения факторов в двухфакторном эксперименте (штамп в виде участка цилиндрической поверхности)

Факторы	Уровни	
	Min(-1)	Max(+1)
X1	145 Н	225 Н
X2	0.25 м	0.85 м
X3	0.2 м	0.38 м

Помимо экспериментов с предельными значениями величин фактора X2, была проведена серия экспериментов с его промежуточными значениями. Данные приведены в таблицах 4.3-4.8.

#### 4.2.2 Экспериментальные исследования деформирования грунтов штампами, имитирующими РО катков

Целью данного этапа проводимого экспериментального исследования являлось выяснение адекватности модели вязкоупругопластичной грунтовой среды, используемой для описания взаимодействия рабочего органа уплотнителя

с уплотняемым грунтом с последующим уточнением оценок параметров модели, допускающих варьирование с учетом эволюции модели в зависимости от изменения напряженно деформированного состояния.

Объектом исследования выступала активная область деформируемого грунта, непосредственно подвергаемый внешнему динамическому воздействию.

В ходе исследования поверхность грунта подвергается ударному воздействию падающего груза известной массы на штамп, представляющий собой горизонтальную металлическую пластину известной формы, покоящуюся на поверхности грунта. Высота падения и масса груза являются варьируемыми параметрами эксперимента. Деформация грунта, измеренная на его поверхностях относительно исходного положения, и ее эволюция в процессе взаимодействия с грунтом может выступать в качестве измеряемой величины. Величина деформации и характер ее восстановления с течением времени зависит от упругих и вязких свойств грунта, описываемых модулем Юнга, модулем полной деформации и вязкостью, а также размером и формой объема грунта, вовлекаемого во взаимодействие со штампом. При этом скорости груза выбирались такими, что характер процессов, происходящих с активной областью слоя, может считаться квазистационарным. Подобный метод исследования широко используется как отечественными, так и зарубежными исследованиями и не теряет актуальности в настоящее время [4], [174].

В качестве испытываемых сред выбирались суглинистый и супесчаный грунты естественного залегания, наиболее часто используемые для организации земляных насыпей оснований дорог в Российской Федерации. Эти же материалы актуальны для дорожного строительства в Омском регионе. Были использованы суглинистый и супесчаный грунты оптимальной влажности при исходных плотностях  $1450 \text{ кг/м}^3$  для супеси и  $1600 \text{ кг/м}^3$  для суглинка, соответствующих коэффициенту уплотнения 0.85 (приблизительно).

Ход эксперимента:

1. Выбираются параметры экспериментальной установки и проведения

эксперимента:

- высота сброса штампа

- масса груза

2. Определяются параметры деформируемого слоя:

- тип грунта

- глубина слоя

- текущая плотность

3. Оцениваются, исходя из проверяемой модели, диапазон предполагаемых результатов эксперимента по справочным значениям характеристик грунта, результаты представляются в виде таблицы.

4. Проводится эксперимент по сбросу штампа необходимое число раз (установленное при планировании эксперимента), данные заносятся в таблицу;

5. Вычисляются статистические погрешности измерения смещения поверхности грунта

6. Результаты эксперимента, с учетом погрешности, сравниваются с модельными на основании чего делаются выводы об адекватности использованных модельных допущений.

Экспериментальная установка, сконструированная и изготовленная для проведения исследований (Рис. 4.1) состояла из:



Рисунок 4.1 – Общий вид экспериментальной установки

1. Стойки, заглубленных в грунт для обеспечения устойчивости;
2. Устройства закрепления датчиков на неподвижном основании с возможностью регулирования высоты;
3. Ограничители, определяющие глубину погружения стоек в грунт;
4. Сборная рама, обеспечивающая жесткость конструкции и служащей основанием для устройства сброса груза (с возможностью перемещения по опорам);
5. Измерительный прибор Megatron RC35-750S.
6. Измерительный инструмент для определения высоты падения груза и толщины грунтового слоя;
7. Штамп-подложки, связанного с датчиками перемещений.

Измерение деформации грунта проводится датчиками смещения, фиксирующими изменение положения подложки при ударе штампа. В качестве прибора, измеряющего смещения использовался резистивный прибор «Мегатрон» (диапазон измерения длины 0...750 мм, напряжение питания 5.1 В).

Потенциометрический датчик линейных перемещений Megatron RC35-750S для измерения перемещения поверхности грунтового слоя представлен на рисунке 4.2.

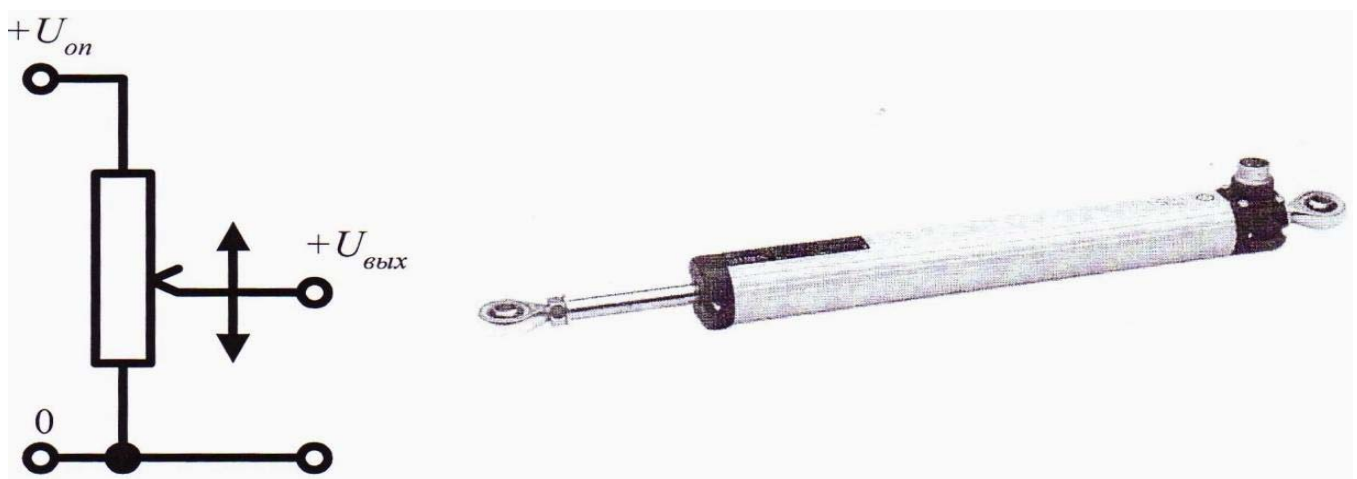


Рисунок 4.2 – Потенциометрический датчик Megatron RC35-750S для измерения линейных перемещений

Измеряемая длина перемещений - от 0 до 750 мм с точностью  $\delta < 0,01$  мм. Во время эксперимента использован источник опорного напряжения  $U_{он} = 5,1$  В, на выходе датчика измерено напряжение  $U_{вых} = 0..U_{он}$ , зависящее от перемещения штока датчика относительно корпуса [79]. Перемещение  $x$  штока (в метрах) определяется из выражения

$$x = \frac{U_{вых}}{U_{вых}} \cdot 0.75 \quad (4.24)$$

С помощью программного обеспечения бортового измерительного комплекса (БИК) осуществляются управление модулями АЦП, автоматизированный сбор, хранение и визуализация измеренных данных деформации при динамическом воздействии. Программно задавался следующий режим работы модулей: задействованы 2 канала АЦП LC-111DP, общая частота опроса датчиков 1000 Гц [86, 127].

В качестве параметров модели выступают модуль Юнга и модуль деформации, углы внутреннего трения и вязкость, которая остается неизменной, поскольку для конфигурации эксперимента этап разгрузки отсутствует.



Рисунок 4.3 – Рабочее место оператора установки с готовым к работе БИК



Рисунок 4.4 Подготовка экспериментальной установки к работе

В рамках работы было проведено следующие эксперименты в соответствии с изложенным выше подходом:

1. Исследование взаимодействия плоского жесткого штампа с грунтом при ударном нагружении для выявления адекватности построенной модели физико-механических характеристик грунта и пределов возможности ее применения.
2. Исследование взаимодействия жесткого штампа в форме участка цилиндрической поверхности с грунтом при ударном нагружении.

Использование двух видов штампа различных конфигураций (плоского и цилиндрической формы) обусловлено тем, что плоский штамп в виде круга является классическим инструментом для изучения ударного нагружения различных сред, что позволило сопоставить полученные результаты с известными. Штамп в виде участка поверхности кругового цилиндра позволил выявить закономерности деформирования активной области грунтового слоя с переменными характеристиками, зависящими от деформации. Кроме этого, случай взаимодействия с грунтовой средой штампа криволинейного профиля недостаточно хорошо исследовано для решения задач о выявлении эффективности передачи энергии поверхностного воздействия в толщу грунта при работе катка.

В ходе проведения исследований измерялась величина перемещения поверхности грунтовой поверхности в процессе взаимодействия со штампом. Исследования позволили подтвердить значения механических характеристик



грунта как упруговязкопластичной среды, эффективно проявляющиеся в переходных и релаксационных процессах и выявить их зависимости от параметров внешнего воздействия. Выводы, сделанные в результате исследований, могут лечь в основу рекомендаций по совершенствованию конструкции рабочих органов катков и выбору режимных параметров их работы в зависимости от типа грунта и характеристик грунта, меняющегося при уплотнении.

Характер проведенных экспериментальных исследований соответствовал требованиям, выдвинутых при формулировании его целей и задач. Основной целью являлась проверка адекватности модели неупругого квазистационарного деформирования РО катка активного объема грунтовой среды на основе измерения параметров ударного взаимодействия. При этом была возможна реализация различных механизмов пластического деформирования с учетом распределения нормальных напряжений по глубине слоя при плоском пятне контакта и поверхности пятна контакта, обладающей кривизной, согласно моделям, разработанным в Главе 3.



а) Плоский штамп круглой формы



б) Штамп в форме участка цилиндрической поверхности

Рисунок 4.5 – Штампы, использованные при проведении эксперимента

Результаты экспериментального исследования характеристик грунтовой среды ударным деформированием позволяют выявить степень соответствия предложенных моделей для вычисления жесткости и вязкости и использовать их для дальнейшего описания взаимодействия грунтовой среды с рабочими органами уплотняющей дорожной машины.



а) Установка при проведении эксперимента с плоским штампом      б) Установка со штампом в форме участка цилиндрической поверхности

Рисунок 4.6 – Экспериментальная установка для различных условий проведения опыта

**Результаты испытаний штампом в форме участка цилиндрической поверхности**

Случай штампа в виде участка цилиндрической поверхности

Параметры проведения эксперимента -

Высота сброса груза  $0.25 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $0.45 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $0.65 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $0.85 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$

Масса сбрасываемого груза 8 кг, 16 кг

Масса цилиндрического штампа 6.5 кг

Доверительная вероятность  $p=0.9$

Коэффициент Стьюдента  $t_{p,n}=2,13$

Радиус кривизны цилиндрического штампа  $0.3\pm 0.02$  м

Угол раствора штампа  $45\pm 3^\circ$

Модуль деформации грунтовой среды был принят  $E_d=9\text{МПа}$ , жесткость среды, согласно расчетам для участка цилиндрической поверхности Главы 3 составила  $c_d=1,95\text{МН/м}$ . Результаты испытаний приведены в Приложении 1.

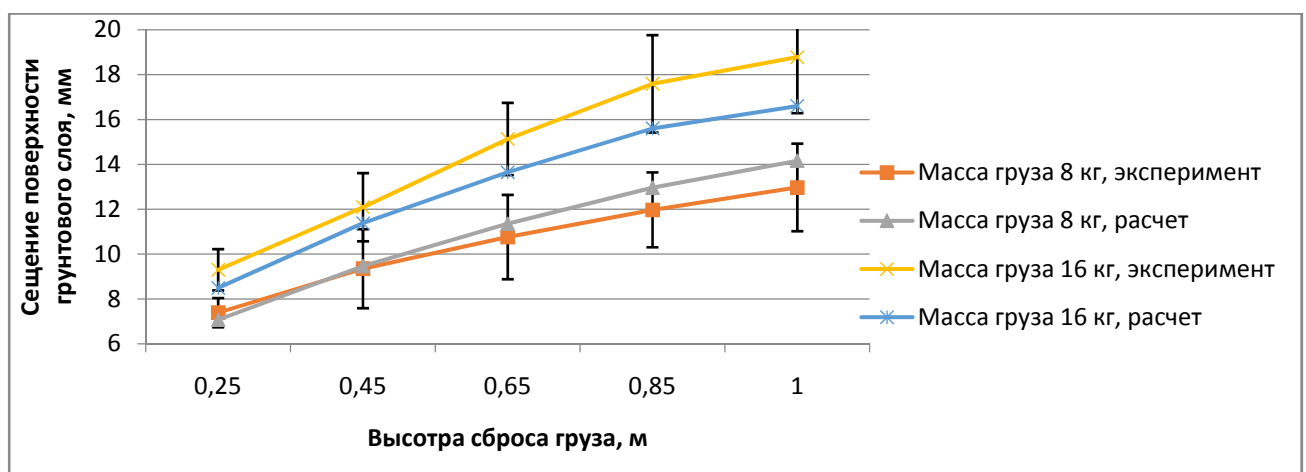


Рисунок 4.7 – Зависимость деформации слоя от высоты сброса груза (суглинистый грунт 38 см.) Случай штампа в виде участка цилиндрической поверхности.

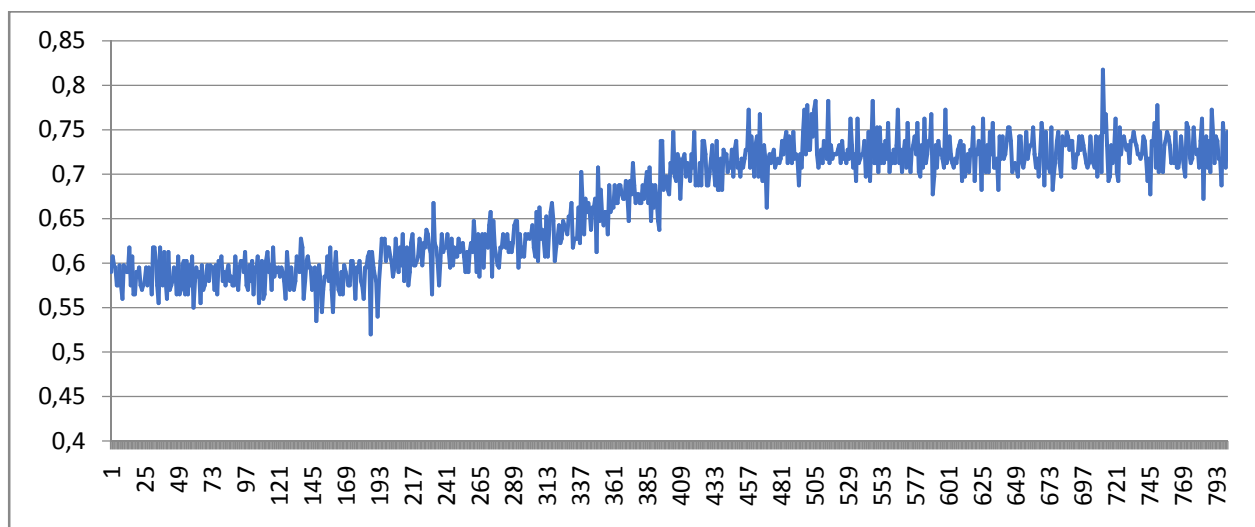


Рисунок 4.8 – Вид графических показаний БИК для штампа в виде участка цилиндрической поверхности.

## Результаты испытаний плоским штампом

Случай плоского штампа

Высота сброса груза Высота сброса груза 0,25 м  $\pm 0,01$  м, 0,45 м  $\pm 0,01$  м, 0,65 м  $\pm 0,01$  м, 0,85 м  $\pm 0,01$  м, 1,00 м  $\pm 0,01$  м

Масса сбрасываемого груза 8 кг, 16 кг

Диаметр плоского штампа 21 см

Масса плоского штампа 0,785 кг

Глубина грунтового слоя  $h=0,34 \pm 0,01$  м

Плотность грунта  $\rho=1720$  кг/м<sup>3</sup>

Доверительная вероятность  $p=0,9$

Коэффициент Стьюдента  $t_{p,n}=2,13$

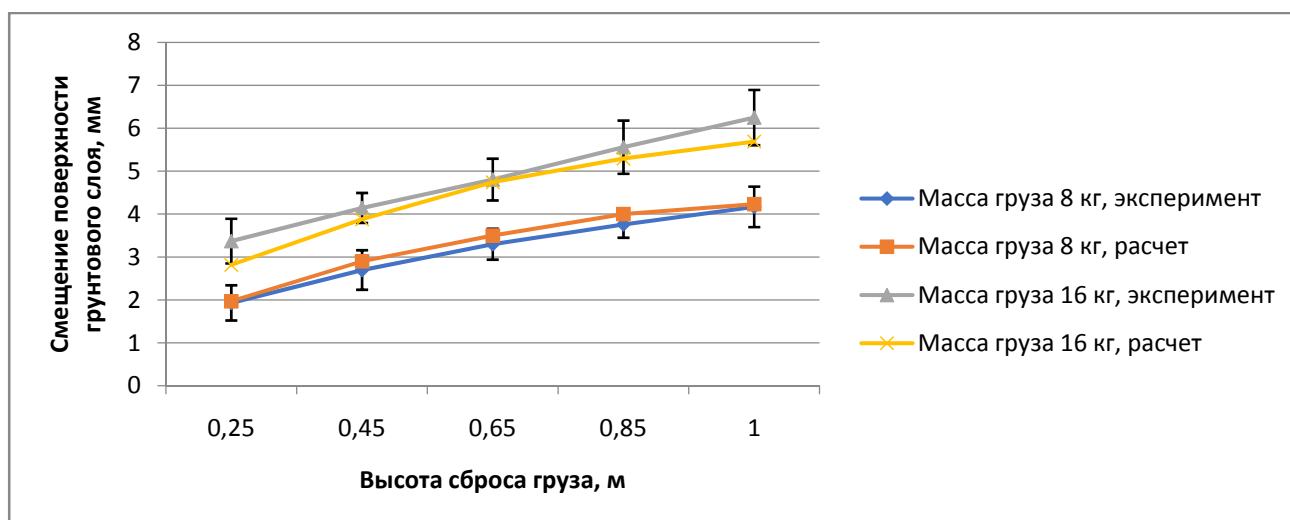


Рисунок 4.9. – Зависимость деформации слоя от высоты сброса груза (суглинистый грунт 34 см.) Случай плоского штампа.

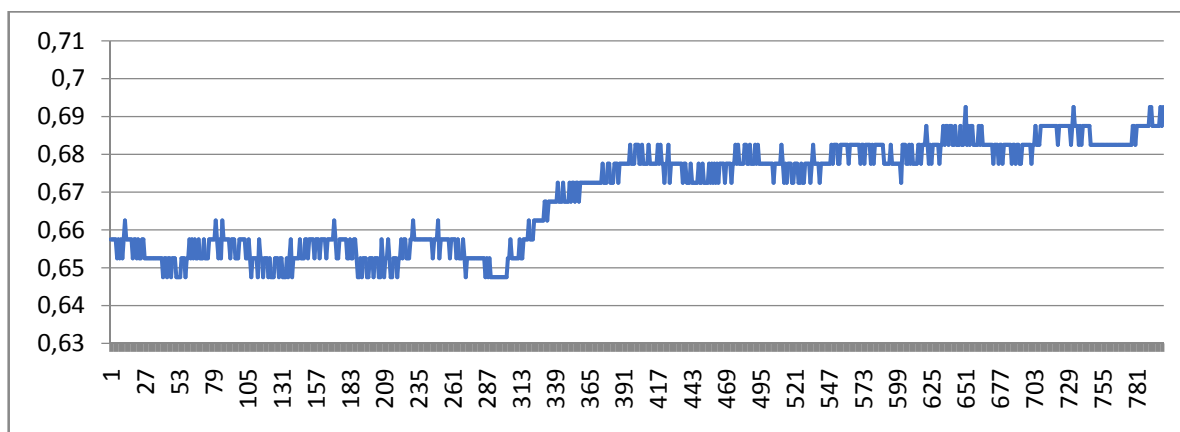
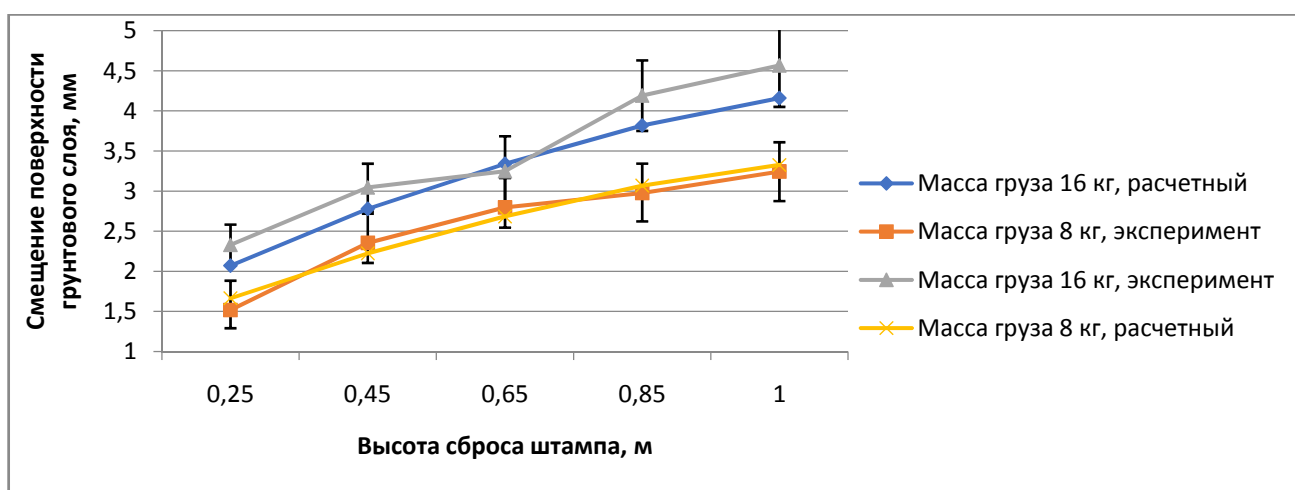


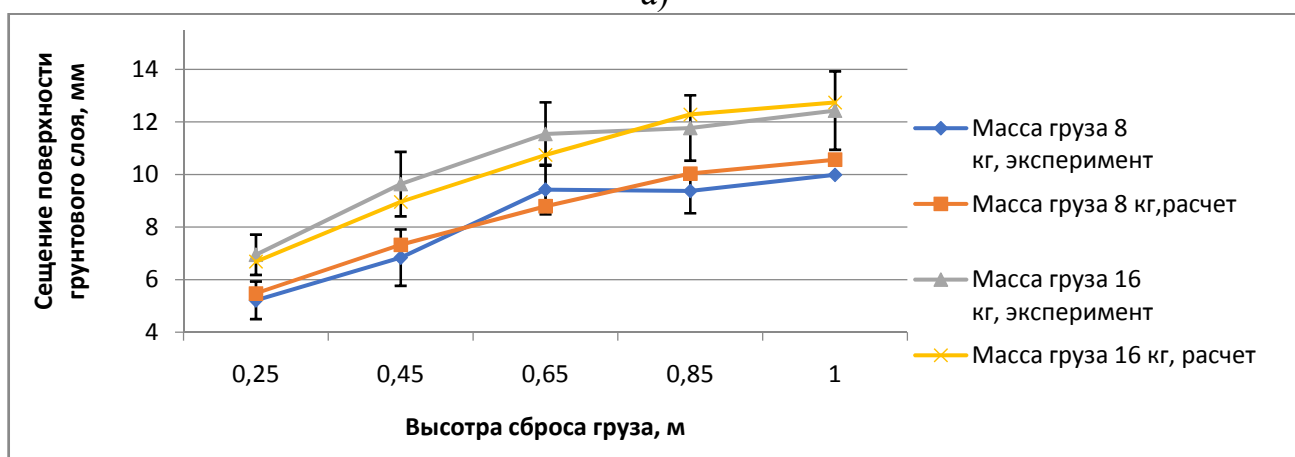
Рисунок 4.10 – Вид графических показаний БИК для плоского штампа.

Обработка результатов измерений проводилась согласно стандартной методике обработки результатов прямых измерений физических величин [80]. Вычисленная погрешность измерений составляла 8-12%, тем самым подтвердив адекватность результатов.

Аналогичные результаты были получены для ударного деформирования плоским штампом и штампом в виде участка цилиндрической поверхности. На рис. 4.11 представлены экспериментальные зависимости смещения поверхности для деформирования слоя супесчаного грунта толщиной 35 см. Исходный коэффициент уплотнения, измеренный методом режущих колец, составлял  $0.83 \pm 0.03$ . Модуль деформирования супесчаного грунта выбирался равным  $E_d = 16.5 \text{ МПа}$



а)



б)

Рисунок 4.11 – Зависимость деформации слоя от высоты сброса груза (супесчаный грунт 35 см) а) случай плоского штампа. б) случай штампа в виде участка цилиндрической поверхности.

Результаты проведенных экспериментов выявили соответствие модельного описания взаимодействия слоя упруговязкопластичной грунтовой среды и жесткого штампа при ударном нагружении. Полученные зависимости могут служить основой для оценки при проектировании РО дорожных машин, и определения комплекса эксплуатационных параметров, определяющих энергоэффективный режим работы катка.

4.3 Планирование, проведение и результаты эксперимента по подтверждению адекватности модели взаимодействия РО вибрационного катка со слоем грунтовой среды.

Планирование многофакторного активного эксперимента по выявлению особенностей подбора параметров при выборе энергоэффективного режима работы катка сводилось к выбору критерия и факторов, варьируемых в эксперименте. В качестве факторов были выбраны толщина уплотняемого слоя грунта – X1, скорость поступательного движения катка – X2 и частота приложения периодической силы вибрационного катка X3 (таблица 4.3;таблица 4.4).

Таблица 4.3 – Интервалы изменения факторов в двухфакторном эксперименте (супесчаный грунт)

Факторы	Уровни	
	Min(-1)	Max(+1)
X1	0.45 м	0.65 м
X2	2 км/ч	6.5 км/ч
X3	42 Гц	42 Гц

Таблица 4.4 – Интервалы изменения факторов в трехфакторном эксперименте (суглинистый грунт)

Факторы	Уровни	
	Min(-1)	Max(+1)
X1	0.25 м	0.35 м
X2	1 км/ч	3 км/ч
X3	40 Гц	60 Гц

Существующие методики выбора скоростных режимов катков при уплотнении грунтовых сред [137, 149] базируются на экспериментальных результатах, уделяя основное внимание изменению плотности грунта при работе. Вопросы влияния на интенсивность уплотнения эффективности преобразования энергии уплотняющего воздействия в работу по неупругому деформированию материала слоя рассматриваются косвенным образом. При этом изменение механических свойств грунта рассматривается с точки зрения упрочнения при уплотнении и основную роль при этом играет модуль упругой деформации. Изменение с повышением плотности интегральных характеристик активной области среды, влияющих на рассеяние энергии в грунтовом слое, нормативными документами в явном виде не учитывается. Экспериментальные исследования процесса уплотнения грунтовой среды в реальных условиях решают следующие задач:

1. Изучение динамики центра масс активной области грунтовой среды при вибрационном уплотнении и сопоставление результатов с вычисленными значениями, полученными в рамках компьютерного моделирования. В ходе эксперимента предполагается установить применимость разработанной модели взаимодействия РО дорожной машины с грунтом для случая периодических режимов работы катков.

2. Выявление особенностей накопления грунтовым слоем пластических деформаций при работе вибрационных гладковальцовых катков для уплотнения грунтовых сред. Это служит для обоснования методики выбора скоростных

режимов работы гладковальцового вибрационного катка, обеспечивающих энергоэффективное уплотнение на всех этапах работы катка.

СНиПом [137, 138] установлены следующие рекомендованные нормы укатки для достижения требуемой плотности наиболее часто используемых в дорожном строительстве грунтов установлены:

для песков и супесей – 6-10 проходов;

для суглинков – 10-16 проходов.

Исследования были проведены во время работ по уплотнению основания пешеходной части ул. Ленина в г. Омске, выполняемых предприятием «ИдеалСтрой».

В рамках исследования рассматривалась работа катка Stavostroj STA VHS 102K полной массой 10276 кг по уплотнению песчаного грунта. Для измерения смещения использовался комплексный восьмиканальный анализатор спектра ZETLAB 017-U8 (Изготовитель ООО «ОТМС», г. Зеленоград) рис. 4.8. Измерения проводились при частоте колебаний вибровозбудителя катка 42 Гц и поступательной скорости движения 2-6 км/ч. Полученные данные позволили определить величину смещения частиц среды грунтовой насыпи на известной глубине при виброуплотнении и величину смещения РО катка.

Таблица 4.5 – Технические характеристики вибрационного катка Stavostroj STA VHS 102K

Эксплуатационная масса, кг	10276
Вынуждающая сила, кН	2x50
Ширина рабочая, мм	1 800,00
Диаметр барабана, мм	1 200,00
Частота вибрации, мин <sup>-1</sup> , (Гц)	2 520,00 (42)

Вид собранного измерительного комплекса совместно с ЭВМ с установленным программным обеспечением в полевых условиях представлен на рис. 4.13.



Дублирующее многократное измерение проводилось зондом-линейкой (точность  $\pm 1$  мм) после каждого прохода катка.

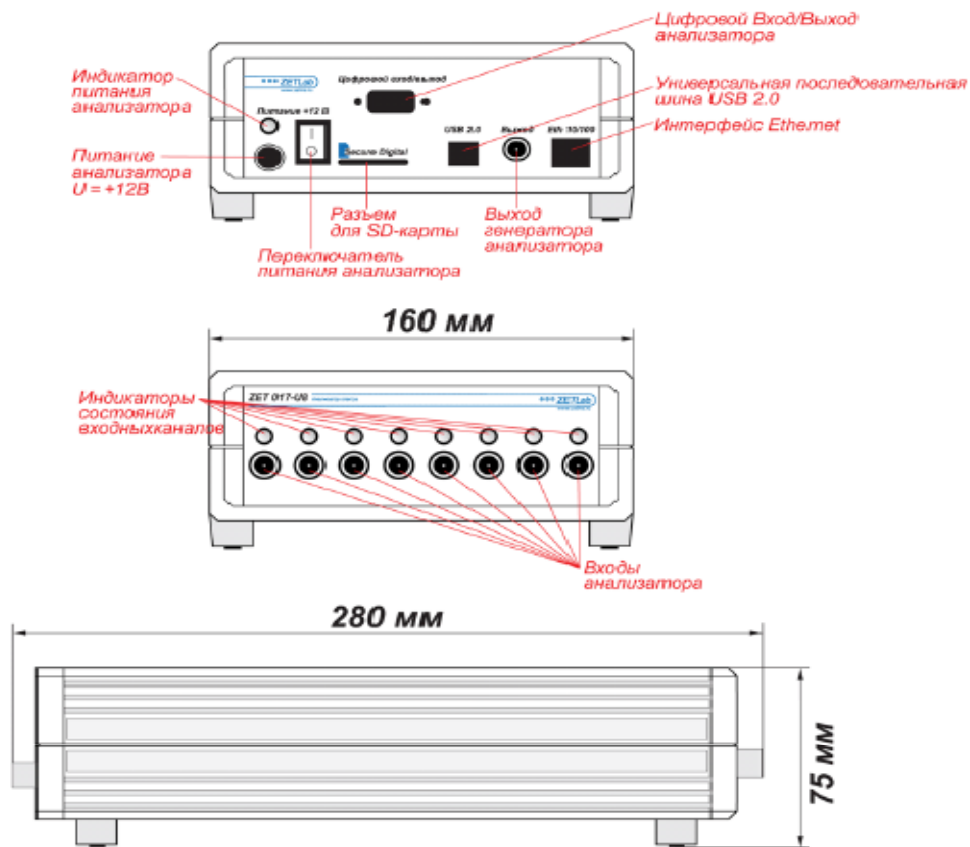


Рисунок 4.12 – Комплекс ZETLAB 017-U8 (измерительная станция).

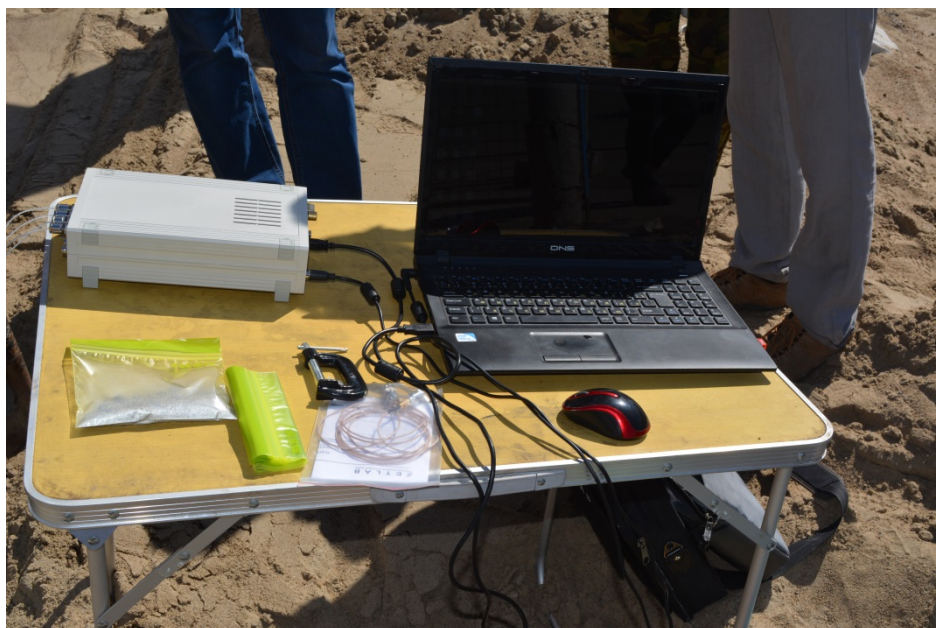


Рисунок 4.13 – Рабочее место оператора измерительного комплекса ZETLAB 017-U8

Измерения проводились двумя наборами датчиков – системой из 4 датчиков, помещенных в толщу грунтового слоя (рис.4.14) и контрольным датчиком на оси вибрационного вальца катка Stavostroj STA VHS 102K (рис.4.15)



Рисунок 4.14 – Установка датчиков измерительного комплекса ZETLAB 017-U8 в грунтовом слое.



Рисунок 4.15 – Установка датчика измерительного комплекса ZETLAB 017-U8 на оси катка

Вид и спецификации используемого для экспериментальных исследований катка приведены на рис. 4.16



Рисунок 4.16 – Каток Stavostroj STA VHS 102K, использовавшийся в ходе эксперимента

Измерение комплексом ZETLAB 017-U8 проводилось в режиме виброметра, с отображением сигнала в окне многоканального осциллографа, позволяющего измерять пиковую величину сигнала, значения перемещения, скорости и ускорения на пьезодатчике.

Пределы допускаемой относительной погрешности измерения механических величин совпадают с таковыми для входного переменного напряжения при измерении синусоидальных сигналов в частотном диапазоне от 3 Гц до 20 кГц и составляют 0.5%.

**План экспериментального исследования энергоэффективных скоростных режимов работы вибрационных катков при уплотнении грунтовых сред.**

Теоретические исследования в рамках модельного описания взаимодействия активной области грунтовой среды с рабочим органом уплотнителя с учетом

реального распределения напряжений в слое грунтовой среды предсказывали зависимость величины накопленной в слое грунтовой среды пластической деформации от скоростного режима поступательного движения катка. При этом выбор скоростного режима обеспечивал как наиболее интенсивное накопление необратимой деформации в слое, так и позволял корректировать скорость поступательного движения катка для дальнейших проходов, выбирая из режимов работы наиболее производительный. Процесс непосредственного проведения эксперимента приведен на рис. 4.17



Рисунок 4.17 – Процесс проведения экспериментального исследования

Ход эксперимента:

- 1) Производилась установка датчиков измерительного комплекса согласно приведенной выше схемы
- 2) Слой предварительно уплотнялся одним проходом катка до исходного состояния ( $k_y = 0.86 \pm 0.01$ ). При этом плотность грунта определялась методом режущего кольца по ГОСТ 5180-84.
- 3) При фиксированной скорости движения катка производился один проход по области грунтового слоя с установленной системой датчиков. Длина прохода (захватки) составляла  $1.5 \pm 0.25$  м
- 4) Измерения накопленной грунтовой средой пластической деформации проводились двумя способами:

- путем непосредственного измерения толщины грунтового слоя металлической линейкой в 4-6 точках захватки до и после прохода (оценочный способ);
- по показаниям датчиков измерительного комплекса ZETLAB 017-U8.

5) Результаты измерений обрабатывались и оценивалась погрешность измерения согласно стандартных методик обработки и анализа результатов измерения физических величин [113,114].

Программное обеспечение измерительного комплекса ZETLAB 017-U8 позволяло отследить в реальном времени смещение датчиков, расположенных в толще грунтового слоя на глубине, соответствующей центру масс активной зоны (Рис. 4.14). Учет различных свойств материала слоя использовался для вычисления накопленной грунтом пластической деформации за один проход катка. Графические зависимости с учетом погрешностей приведены ниже.

Накопленная слоем грунта пластическая деформация в соответствии с показаниями измерительного комплекса ZETLAB 017-U8 вычисляется суммированием по измеренным амплитудным значениям периодического смещения за время нахождения рабочего органа катка на пятне контакта

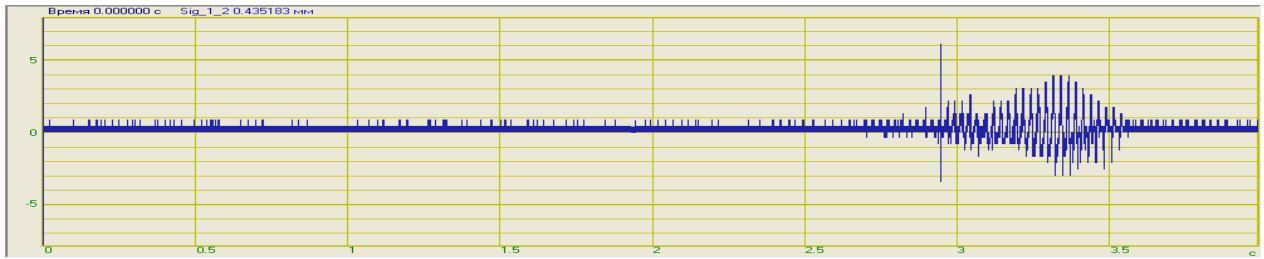
$$(\delta z_i)_{plastic} = z_i^+ - |z_i^-| + (z_{i+1}^+ - z_i^+) - |(z_{i+1}^- - z_i^-)|, i = 1..N - 1, \quad (4.25)$$

$$z_{plastic} = \sum_{i=1}^{N-1} \delta z_i, \quad (4.26)$$

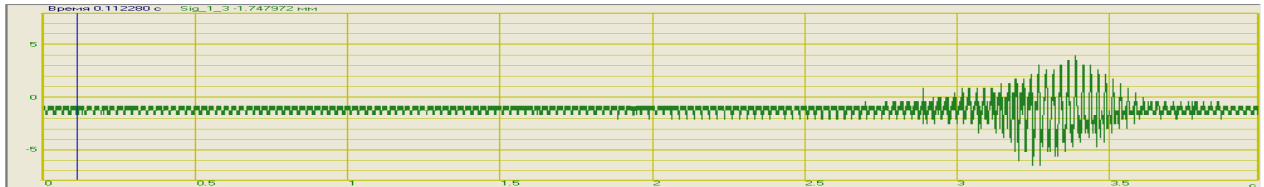
где  $z_i^+$  и  $z_i^-$  - амплитудные значения деформации для положительного и отрицательного направления на  $i$ -ом периоде,  $N$ -число колебаний за время нахождения вальца на пятне контакта.

### Результаты испытаний

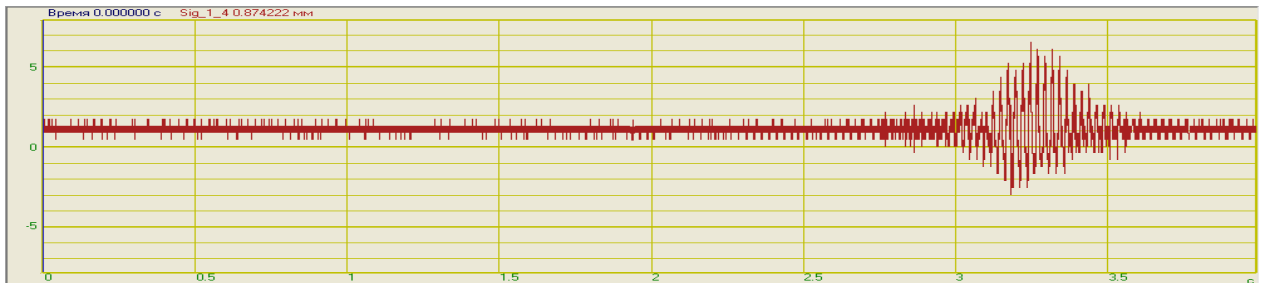
Датчики, измеряющие нормальные смещения в грунте во время работы катка, располагались на оси вальца вибрационного катка (1 шт.) и в слое, на различной глубине от его поверхности слоя (4 шт., закрепленные на общем основании). Измерительный комплекс позволял фиксировать зависимость от времени и



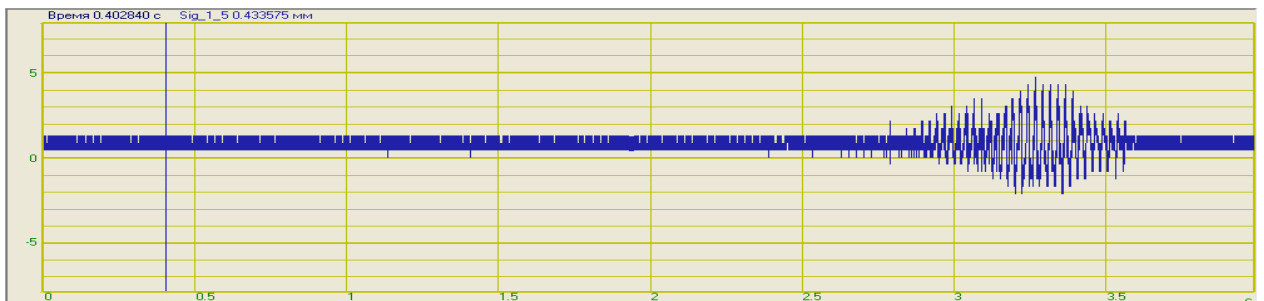
а)



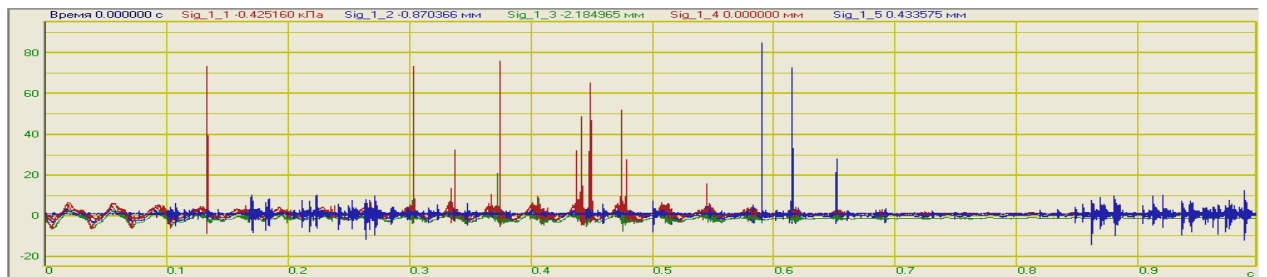
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.18. Показания измерительного комплекса ZETLAB 017-U8, представляющие активной области среды а), б), в), г) – режим виброуплотнения, д) переход к вибротрамбованию.

амплитудную величину вибрационных смещений, учитывая их возможные различия в зависимости от направления, а также значения соответствующих виброускорений. Уплотнение велось катком Stavostroj STA VHS 102K для слоя супесчаного грунта толщиной 650 мм и 450 мм с размещением датчиков в глубине слоя на расстоянии:

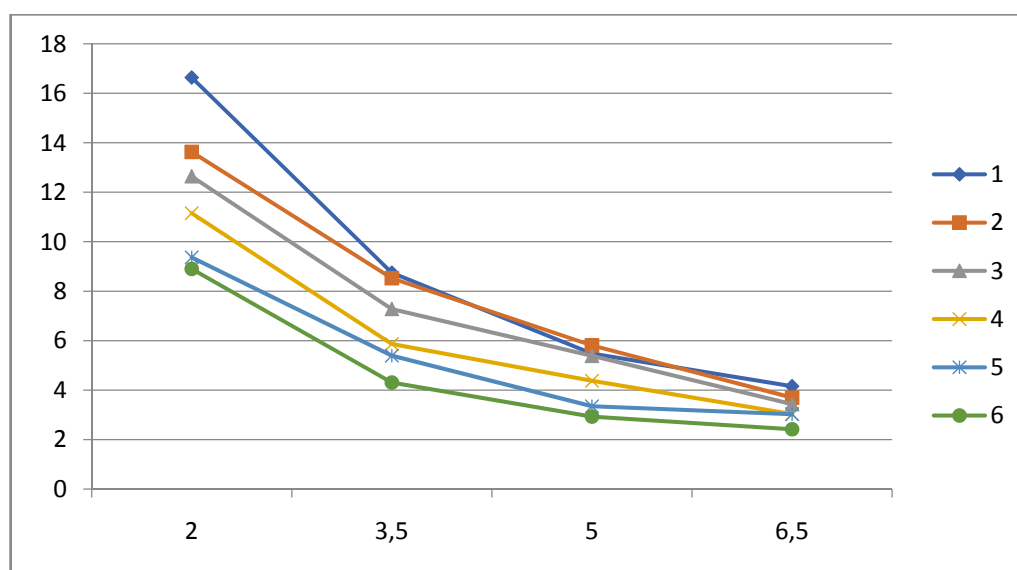
- 150, 300 и 450 мм для слоя толщиной 650 мм;
- 100, 200 и 300 мм для слоя толщиной 450 мм.

Полученные результаты приведены в таблицах для различных состояний грунтового слоя по ходу процесса уплотнения. Исследования проводились при влажности грунта, составляющей 0.9 оптимальной.

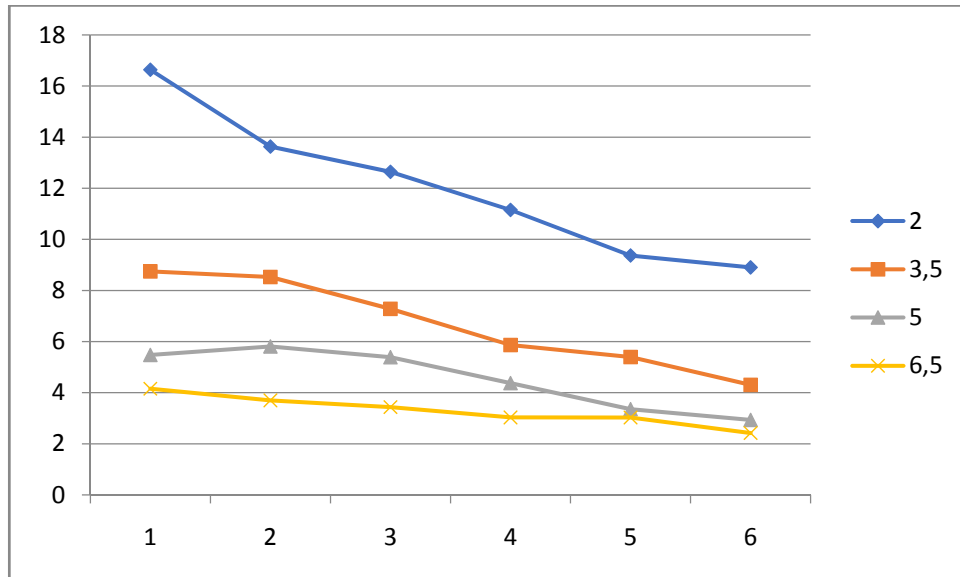
Изменяемыми факторами при проведении эксперимента выступали

- 1) Поступательная скорость движения катка
- 2) Толщина слоя грунтовой среды

Величина исходного коэффициента уплотнения 0.8, начальная плотность  $1360 \text{ кг/м}^3$ . Результаты испытаний приведены в таблице Приложения 2. На рисунках 4.19-4.20 приведено графическое представление результатов эксперимента. Относительные погрешности, вычисленные по средним значениям величин, приведенным в таблицах приложения составили с учетом приборной погрешности 9.5-10%. Вычисление погрешностей проводилось при  $t_s=0,95$ .



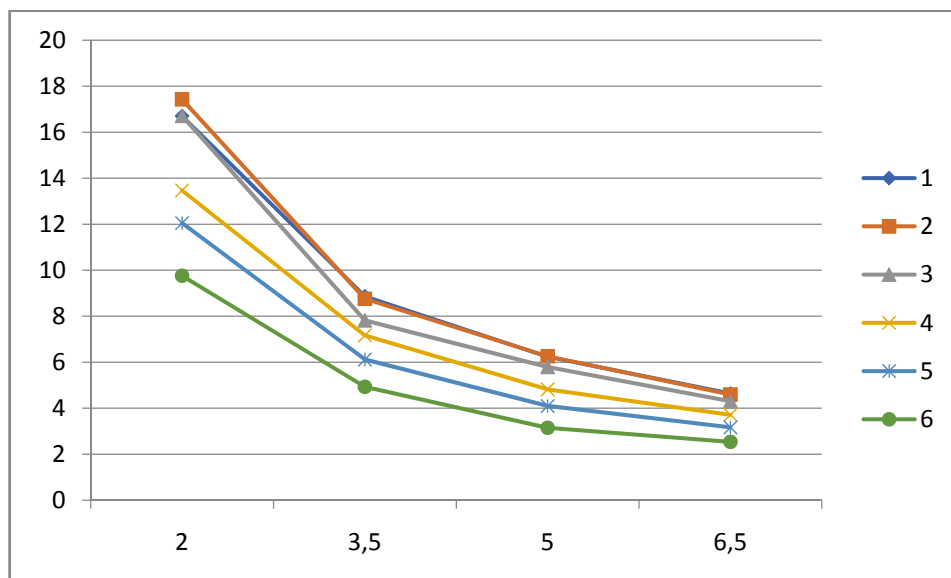
a)



б)

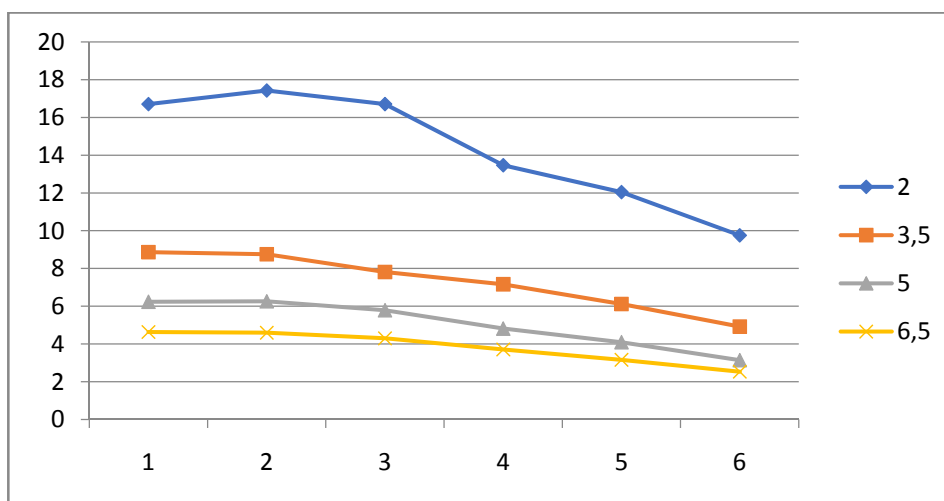
Рисунок 4.19. – Накопленная слоем грунта толщиной 65 см пластическая деформация при работе катка Stavostroj STA VHS 102K в зависимости от скорости движения катка а) и номера прохода б)

Уравнение регрессии для зависимости накопленной деформации от скорости есть  $z = a(k)v^{1-bk}$ , где коэффициент  $b$  характеризуют состояние грунта, а функция  $a(k)$  убывает с ростом коэффициента уплотнения. Это уравнение подтверждает известные зависимости деформируемости грунтов с ростом коэффициента уплотнения [147]. При этом корреляция составляла  $R > 99$ .



а)





б)

Рисунок 4.20. – Накопленная слоем грунта толщиной 45 см пластическая деформация при работе катка Stavostroj STA VHS 102K в зависимости от скорости движения катка а) и номера прохода б)

Результаты проведенных экспериментальных исследований выявляют зависимость величины накапливаемой грунтовым слоем пластической деформации от скорости, которая для заданной частоты периодического воздействия имеет максимум, определяемый исходной толщиной грунтового слоя, частоты приложения динамического воздействия и практически не зависящей от исходной плотности грунтовой среды. На рис. 4.21 показано сравнение результатов расчетов и экспериментальных данных.

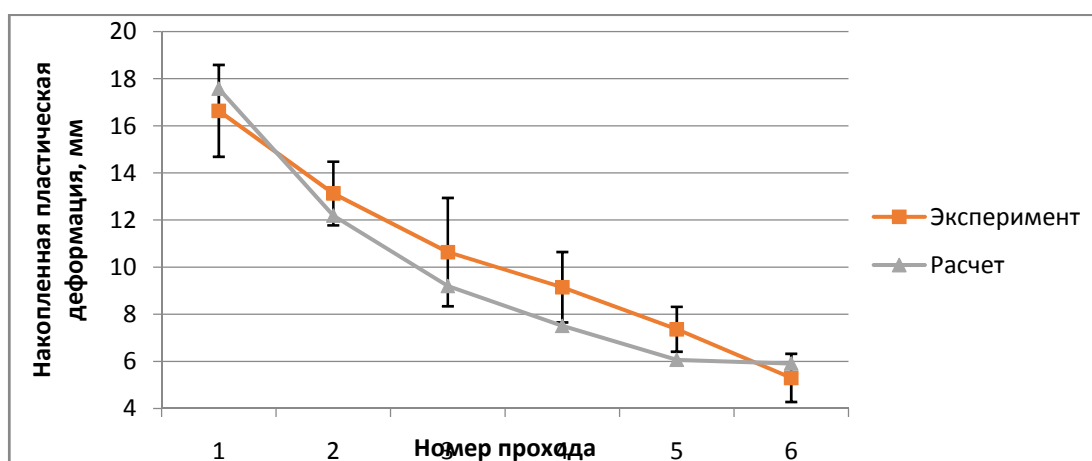


Рисунок 4.21 – Накопленная слоем грунта толщиной 65 см пластическая деформация при уплотнении катком Stavostroj STA VHS 102K на скорости 2 км/ч (сравнение экспериментальных и расчетных данных)

Аналогичная серия экспериментов по выявлению особенностей уплотнения суглинистых грунтов была проведена на базе кафедры «ЭСМиК» «СибАДИ» с использованием вибрационного катка ДУ-107 (Рис. 4.22 -4.24). Эксперименты проводились при доверительной вероятности 0.95.



Рисунок – 4.22 Вибрационный каток ДУ-107

Таблица 4.6 – Технические характеристики вибрационного катка ДУ-107

Эксплуатационная масса, кг	1500
Вынуждающая сила, кН	6.2
Ширина рабочая, мм	700
Диаметр барабана, мм	550,00
Частота вибрации, мин <sup>-1</sup> , (Гц)	3600 (60)

Датчики, измеряющие нормальные смещения в грунте при работе катка, располагались на оси вальца вибрационного катка (1 шт) и в слое, на различной глубине от его поверхности слоя (4 шт., закрепленные на общем основании). Измерительный комплекс позволял фиксировать форму и величину вибрационных смещений, учитывая их возможные различия в зависимости от направления, а также значения соответствующих виброускорений. Уплотнение

велось катком ДУ-107 для слоя супесчаного грунта толщиной 250 мм и 350 мм с размещением датчиков в глубине слоя на расстоянии:

- 50, 150, 200 мм для слоя толщиной 250 мм;
- 100, 200 и 300 мм для слоя толщиной 350 мм.



Рис. 4.23 – Вибрационный каток ДУ-107 над областью среды с датчиками

Полученные результаты приведены в таблицах для различных состояний грунтового слоя по ходу процесса уплотнения. Исследования проводились при влажности грунта, составляющей 0.9 оптимальной.



Рисунок 4.24 – Вибрационный каток ДУ-107 перед экспериментальным проходом

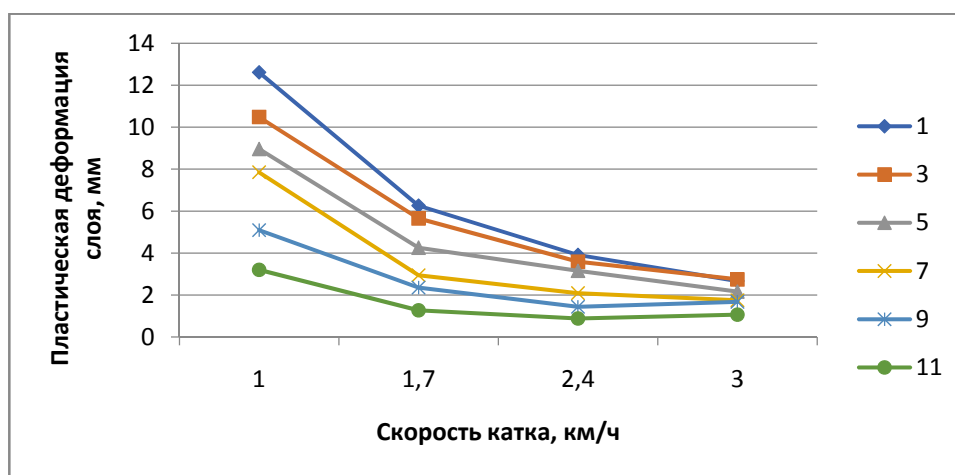
Изменяемыми факторами при проведении эксперимента выступали

- 1) Поступательная скорость движения катка
- 2) Толщина слоя грунтовой среды

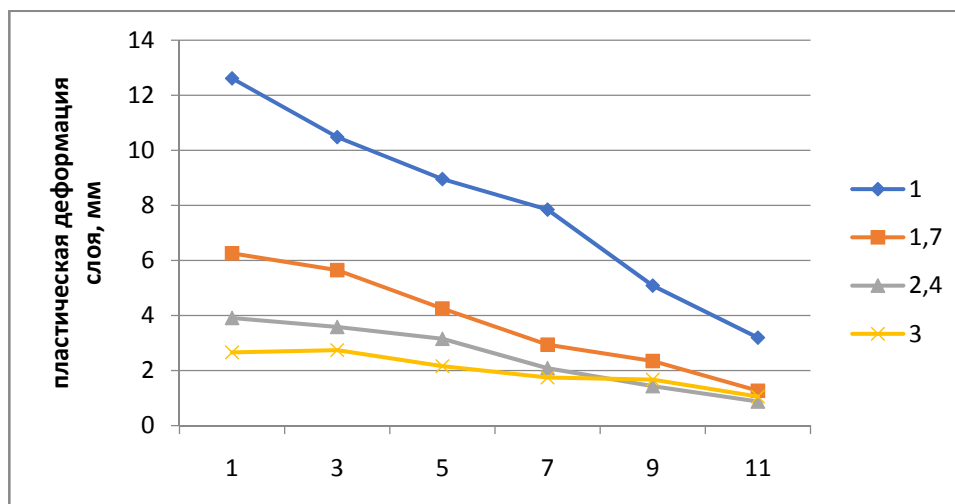
## 3) Величина частоты силы динамического воздействия

Величина исходного коэффициента уплотнения была определена как  $0.8 \pm 0.02$ , начальная плотность  $1450 \text{ кг/м}^3$ , влажность составляла 0.92 от оптимальной.

Результаты измерений при запланированных вариациях факторов приведены в таблицах приложения 2. Графическое представление результатов показано на рисунках 4.25 и 4.26. Рис. 4.27 представляет сравнение полученной теоретически и определенной экспериментально закономерности накопления уплотняемым слоем суглинистого грунта необратимых деформаций.

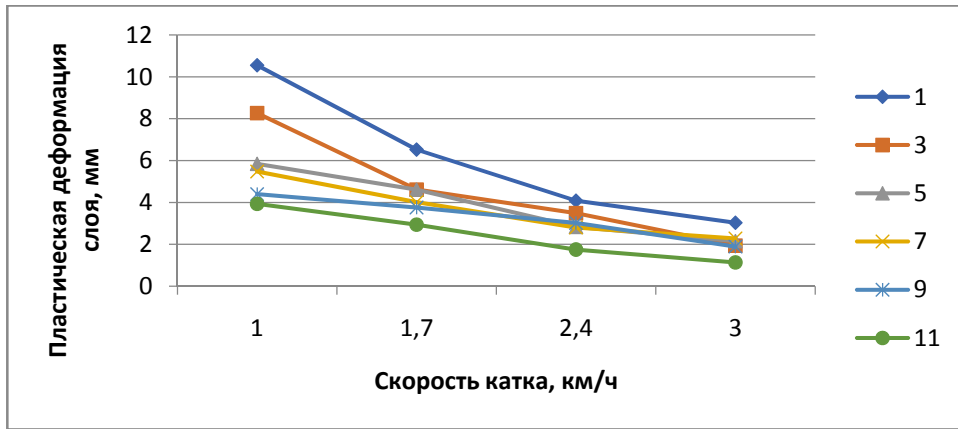


а)

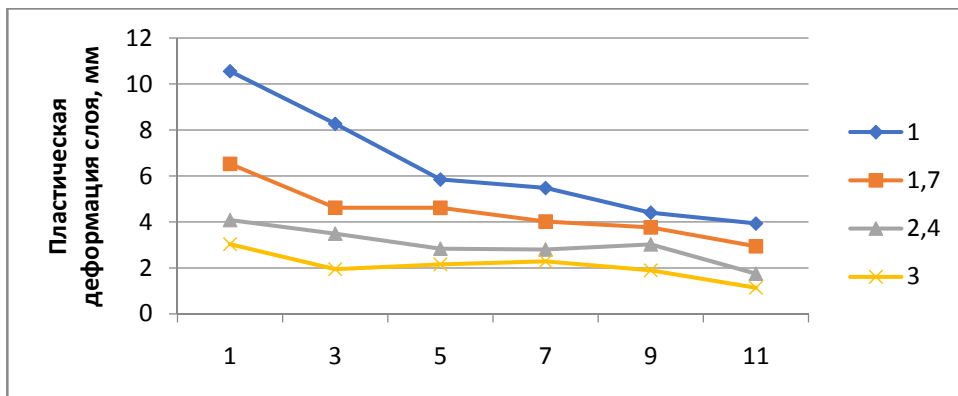


б)

Рисунок 4.25. – Накопленная слоем грунта толщиной 35 см пластическая деформация при работе катка ДУ-107 в зависимости от скорости движения катка а) и номера прохода б)



а)



б)

Рисунок 4.26 – Накопленная слоем грунта толщиной 25 см пластическая деформация при работе катка ДУ-107 в зависимости от скорости движения катка а) и номера прохода б)

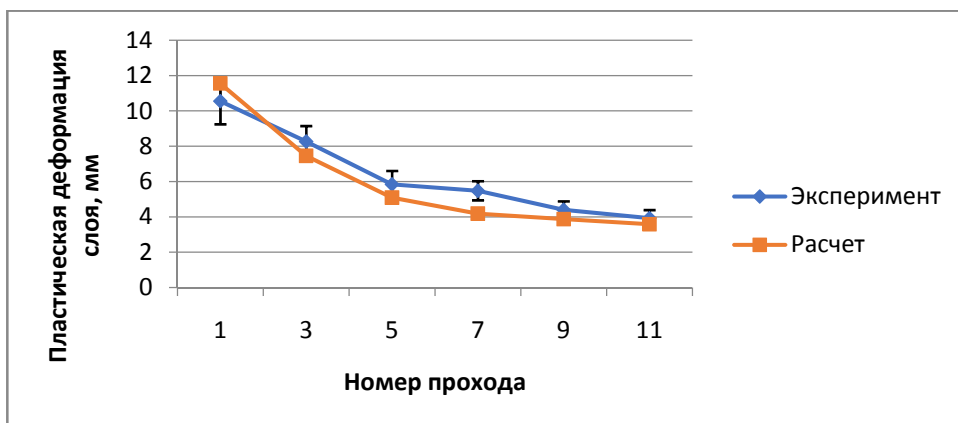


Рисунок 4.27. – Накопленная слоем грунта толщиной 35 см пластическая деформация при работе катка ДУ-107 на скорости 1 км/ч (сравнение экспериментальных и расчетных данных)

#### 4.4 Выводы по Главе 4.

1. Исследования ударного деформирования плоским штампом в форме круга и штампом в виде участка цилиндрической поверхности позволили выявить адекватность предложенной математической модели описания взаимодействия жесткого рабочего органа дорожной машины с активной областью грунтового слоя и для вычисления жесткости и вязкости активной зоны, оцениваемые по интенсивности развития поверхностной деформации грунтового слоя. Расхождение экспериментальных результатов с предсказанными теоретически не превышало 12%.

2. Полученные экспериментальные данные обосновывают применимость предложенного способа моделирования взаимодействия РО уплотнителя с слоем уплотняемой грунтовой среды в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров с учетом распределения напряжений в толще слоя.

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

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

5. Теоретически выявлена и подтверждена новая закономерность, связывающая интенсивность деформирования песчаных и супесчаных грунтов с энергопоглощением и деформативными свойствами материала слоя, изменяющимися с уплотнением, и позволяющая обосновывать энергоэффективные режимы использования гладковальцовых катков для уплотнения слоев грунтовых сред.

6. Подтверждена адекватность теоретического подхода к моделированию

взаимодействия рабочих органов вибрационных гладковальцовых катков с активной областью уплотняемой среды для песчаных и супесчаных 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  $k_y=0.8-0-0,86$  на скоростях  $v=2-2,5$  км/ч; среднеуплотненном грунте – коэффициент уплотнения  $k_y=0.86-0-0,92$  на скоростях  $v=3-4,5$  км/ч; сильноуплотненном грунте – коэффициент уплотнения  $k_y=0.92-0-0,98$  на скоростях  $v=4.5-6$  км/ч.

7. Подтверждена адекватность теоретического подхода к моделированию взаимодействия рабочих органов вибрационных гладковальцовых катков с активной областью уплотняемой среды для суглинистых грунтов. Выявлены особенности деформирования, существенные для выбора энергоэффективного скоростного режима уплотнения. Подтверждены результаты теоретических исследований, определившие оптимальный характер накопления деформаций слабоуплотненном грунте – коэффициент уплотнения  $k_y=0.8-0-0,86$  на скоростях  $v=3-4$  км/ч; среднеуплотненном грунте – коэффициент уплотнения  $k_y=0.86-0-0,92$  на скоростях  $v=2-3$  км/ч; сильноуплотненном грунте – коэффициент уплотнения  $k_y=0.92-0-0,98$  на скоростях  $v=1-2$  км/ч для частот воздействия 30-60 Гц.

8. Результаты экспериментального исследования процесса накопления пластических деформаций находятся в соответствии с теоретически полученными данными при максимальном расхождении, не превышающем 12%.

9. Основным результатом проведенных исследований явилось подтверждение возможности использования построенной модели взаимодействия рабочего органа уплотнителя с грунтовым слоем для описания процесса уплотнения как на статических, так и динамических режимах поверхностного силового воздействия.

## ГЛАВА 5 ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ

5.1 Обоснование механического импеданса активной области грунтового слоя, как критерия эффективного протекания процесса уплотнения при работе катка

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что активная область грунтового слоя, вступающая в непосредственное взаимодействие с РО уплотнителя обладает существенными резонансными свойствами, накладывающими условия на частоты периодического силового воздействия при вибрационном уплотнении. Они реализуются как при гармоническом виде вынуждающей силы в случае непрерывного контакта РО с поверхностью, так и в режиме вибротрамбования.

В качестве упрощенного описания для уплотняемого объема грунта при работе катка возможно рассмотрение призмы с двумя параллельными гранями, изучаемой, например, в работах [39,130,131,132] как эффективное приближение активной области грунтового слоя. Такой подход является эффективным и в рамках модельных представлений, использованных в настоящей работе. Активная область призматической или близкой к ней формы естественно возникает для режимов работы катков, реализующих равномерное уплотнение слоя [166], что обеспечивается избыточными контактными давлениями, и активную область среды, «обрезается» проекцией жесткого основания слоя.

1. Учитывая тот факт, что при этом форма и размер активной области практически неизменны, можно предложить в качестве критерия оценки энергоэффективности характеристику поглощения энергии уплотнителя активной областью грунтового слоя. Такой характеристикой при вибрационном уплотнении выступает импеданс – полное механическое сопротивление активной области деформирующему силовому воздействию, реализованному силой гармонического вида

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) = F_0 \sin(2\pi ft).$$

2. Кроме этой силы необходимо учитывать долю веса катка массой  $M$ ,



приходящуюся на рабочий орган (валец), статически нагружающую уплотняемый грунт массы  $m$  и обеспечивающую постоянство контакта рабочего органа с его поверхностью, а также вес самого грунта [107]. Окончательный вид уравнения движения, как результата моделирования, описанного в главе 3, есть

$$m\Delta\ddot{z} + b(\Delta z)\Delta\dot{z} + c(\Delta z)\Delta z + \frac{\partial c(\Delta z)}{\partial \Delta z} \frac{(\Delta z)^2}{2} + \frac{\partial b(\Delta z)}{\partial \Delta \dot{z}} \frac{(\Delta \dot{z})^2}{2} = F(t) + Mg + mg, \quad (5.1)$$

явный вид зависимостей  $b(\Delta z)$  и  $c(\Delta z)$  здесь не существенен, важно то, что они достаточно медленно меняются со смещением грунта и изменением его скорости, так что для качественного анализа процесса смещения и накопления деформаций производными  $\frac{\partial c(\Delta z)}{\partial \Delta z}$  и  $\frac{\partial b(\Delta z)}{\partial \Delta \dot{z}}$  можно пренебречь, считая вязкость и жесткость константами. При более детальном анализе зависимости деформации от времени такое приближение не будет правомерным. Окончательный вид уравнения движения грунта в линейном приближении [107]:

$$m\Delta\ddot{z} + b(\Delta z)\Delta\dot{z} + c(\Delta z)\Delta z = F(t) + Mg + mg. \quad (5.2)$$

3. Его решение представляет собой экспоненциально затухающие собственные колебания грунта, происходящие с собственной частотой системы  $\omega_{\text{собст}} = \sqrt{(b/2m)^2 - c/m}$  и вынужденные колебания с частотой вынуждающей силы  $\omega$ . Грунт после того, как предварительное смещение под воздействием статической нагрузки достигнуто начинает совершать вынужденные колебания вида:

$$\Delta z(t) = \frac{F_0 \sin(\omega t + \phi)}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + k^2 \omega^2}}, \quad \phi = \arctan\left(\frac{k\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right),$$

где  $\phi$  – фазовый сдвиг,  $\omega_0^2 = c/m$  – собственная частота системы при отсутствии вязкого трения,  $k = b/m$  [13].

4. Амплитуда вынужденных колебаний, таким образом, есть

$$\Delta z_{\text{max}} = \frac{F_0}{m\sqrt{((\omega_0(y, \Delta z))^2 - \omega^2)^2 + k(y, \Delta z)^2 \omega^2}}. \quad (5.3)$$

Здесь учтена зависимость собственной частоты (жесткости) и коэффициента

$k$  от необратимой деформации и характеристик пятна контакта РО с поверхностью слоя, параметризованной его длиной  $y$ . Величина в знаменателе

$$Z = m\sqrt{((\omega_0(y, \Delta z))^2 - \omega^2)^2 + k(y, \Delta z)^2 \omega^2} \quad (5.4)$$

представляет собой механический импеданс соответствующей колебательной системы. Импеданс определяет, насколько хорошо происходит поглощение системой энергии колебаний [110].

5. 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

$$\Delta z_{res} = \alpha \Delta z_{max} = \frac{\alpha F_0}{m\sqrt{((\omega_0(y, \Delta z))^2 - \omega^2)^2 + k(y, \Delta z)^2 \omega^2}}, \quad (5.5)$$

такую же деформацию грунт будет приобретать на каждом последующем цикле в предположении того, что его жесткость и вязкость зависит только от остаточной деформации, приобретенной за предшествующее время работы катка. Для случая реального грунта и значительных величин накопленной пластической деформации это не совсем верно, поскольку наблюдается насыщение деформации, выходящей на постоянное значение, не зависящее от времени воздействия, так что дальнейшее эффективная работа катка возможна только при изменении режимных параметров. Однако, для проводимой ниже качественной оценки можно рассматривать процесс уплотнения на временах, когда режим вынужденных колебаний уже установился, а насыщение еще не достигнуто [105].

Неупругая часть деформации при работе катка по уплотнению грунта, определяемая коэффициентом  $\alpha$ , учитывается наличием в модуле деформации неупругой составляющей. Соответственно, неупругая деформация будет тем выше, чем дольше времени будет происходить пластическое деформирование объема грунта. Величина коэффициента  $\alpha$  может быть найдена из условия того, какую долю половины периода нагружения грунтовая среда будет подвергаться

частично или полностью неупругому деформированию [107].

Таким образом, полная остаточная деформация, накопленная на  $i$ -м цикле воздействия представляет собой сумму

$$\Delta z_{res}^{(i)} = \sum_{k=1}^i \Delta z_{res,k} \quad (5.6)$$

Задача интенсификации работы катков по уплотнению грунтов сводится к максимизации этой величины при минимальном полном времени общего динамического воздействия с помощью принудительного или автоматического изменения параметров воздействия – амплитуды и частоты периодической силы и длины пятна контакта [110].

Далее будем предполагать зависимости величин в выражениях (5.2), (5.3) от смещения  $\Delta z$  слабыми, так что производными по смещению можно пренебречь. Такое предположение с точки зрения моделирования эквивалентно тому, что на каждом цикле виброуплотнения жесткость и вязкость грунта меняются настолько слабо, что могут считаться постоянными [105].

Нахождение экстремума амплитуды (5.3) как функции многих переменных, в рассматриваемом случае зависящего от длины пятна контакта рабочего органа и частоты вынуждающей силы, требует выполнения двух условий [105]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta z_{\max}}{\partial \omega} &= 0 \\ \frac{\partial \Delta z_{\max}}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

Первое из них дает выражение резонансной частоты, стандартной для теории колебаний, при постоянной величине пятна контакта (постоянном объеме уплотняемого грунта)

$$\omega_{res} = \sqrt{\omega_0^2 - k^2/2}.$$

Второе условие отвечает за влияние длины пятна контакта на амплитуду, однако его рассмотрение невозможно без учета явной зависимости жесткости и вязкости уплотняемого объема грунта от величины пятна контакта и текущего состояния уплотняемой среды.

Это позволяет дать обоснование рекомендациям выбора режимных параметров работы катков по энергоэффективному уплотнения грунтов с точки зрения особенностей поглощения грунтовой средой механической энергии уплотнителя. Предполагается, что рабочий орган катка обладает возможностью регулирования как амплитуды, так и частоты силового воздействия.

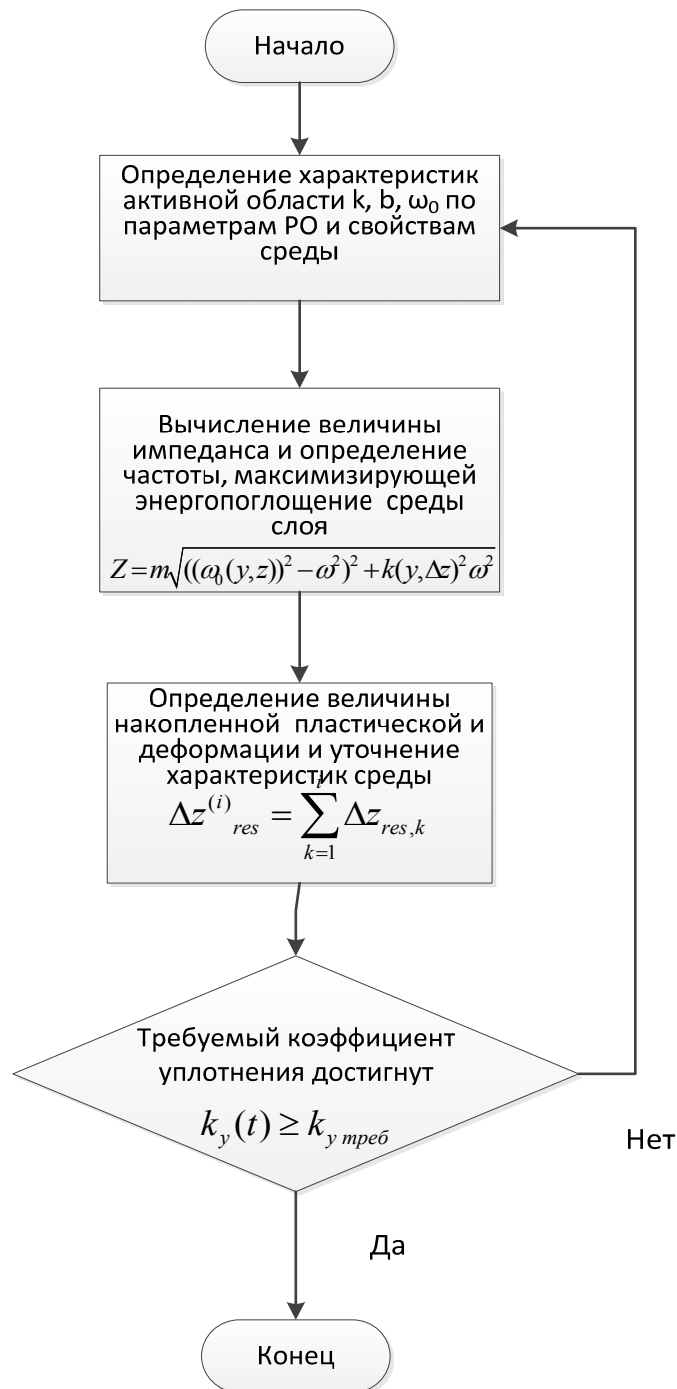
Смысл минимума импеданса при работе вибрационного катка состоит в том, что при этом амплитуда вынужденных колебаний грунта максимальна, соответственно максимальна необратимая деформация. Практическое использование этого подхода при вибрационном нагружении грунтового слоя может быть реализовано следующим образом [105]:

1. Зависимость длины пятна контакта  $u$  рабочего органа катка от его характеристик при взаимодействии с жесткой поверхностью известна.
2. По известным характеристикам объема грунта и пятна контакта вычисляется его вязкость и жесткость в рамках модели с сосредоточенными параметрами, а также собственная частота  $\omega_0(y)$ .
3. Подбирается частотный параметр работы катка  $\omega$ , минимизирующий импеданс, соответственно увеличивающая смещение поверхности грунта и итоговую остаточную деформацию.
4. Для меняющихся в ходе работы катка характеристик грунта и скорости уплотнения повторяем пункты 2–4 с возможным изменением модуля вынуждающей силы, обеспечивающим максимизацию накопления пластической деформации [110].

Графики на рисунках 5.2, 5.3 представляют амплитудно-частотные характеристики обратного импеданса (амплитуды вынужденных колебаний) активной области супесчаного и суглинистого грунтов при вибрационном уплотнении катками различной массы.

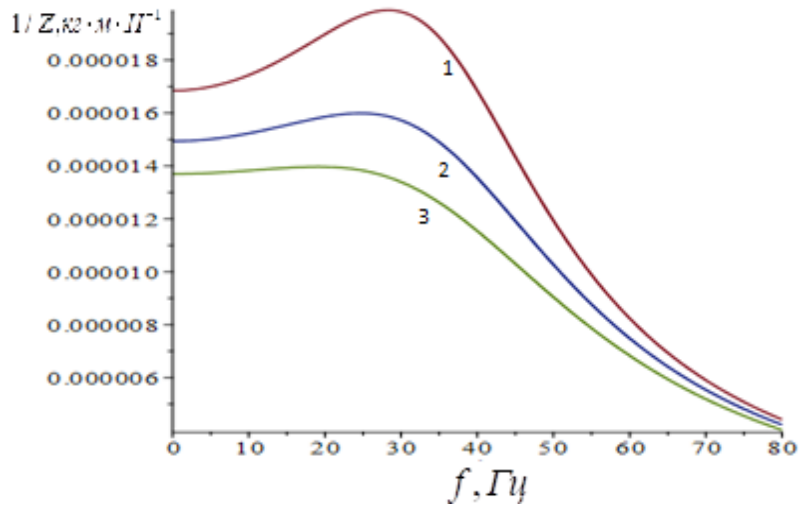
Анализ полученных аналитических зависимостей представляет особый интерес с точки зрения выбора оптимальных частотного параметра при уплотнении грунтов вибрационными катками.

Амплитудно-частотные характеристики обратного импеданса и зависимости от частот значений их максимумов демонстрируют для супесчаных и суглинистых грунтов поведение, обусловленное характером эволюции физико-механических свойств соответствующих грунтовых сред в процессе уплотнения.

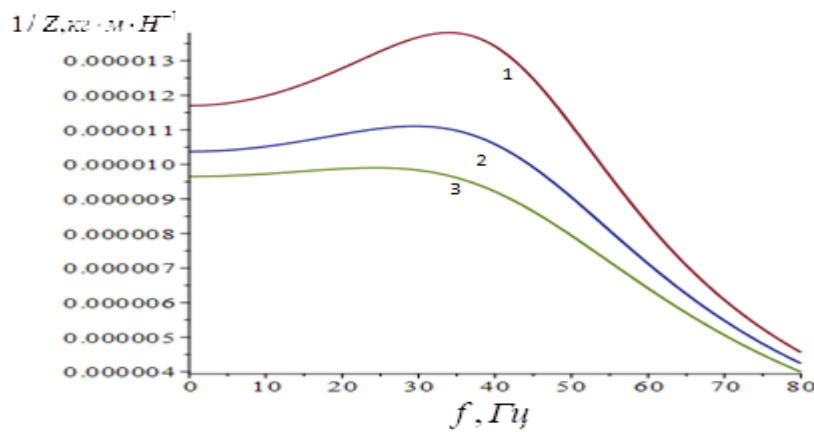


5.

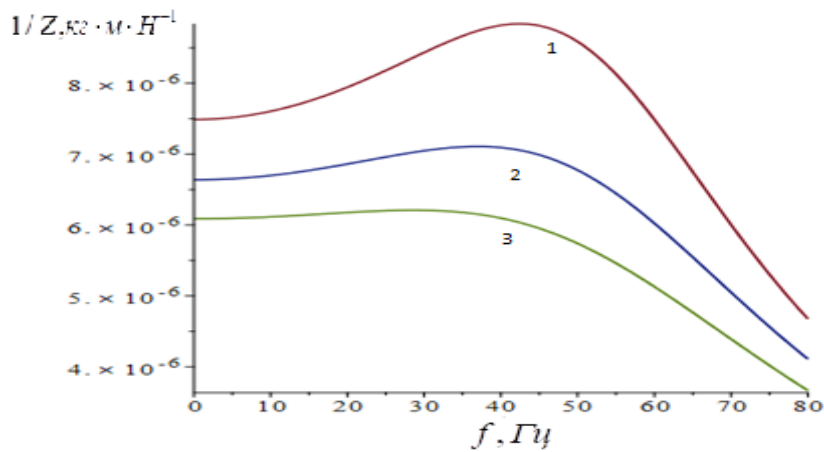
Рисунок 5.1 – Алгоритм подбора параметров энергоэффективного режима работы катка по величине механического импеданса активной области [110]



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

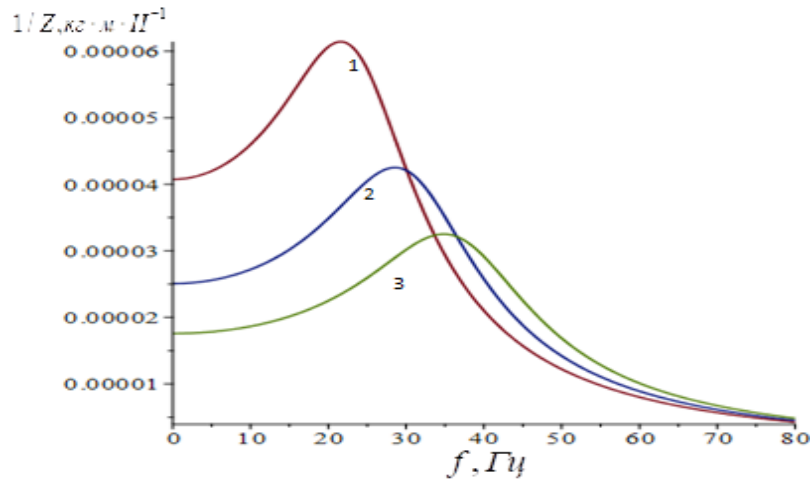


б) 1- начальный; 2-промежуточный; 3-конечный

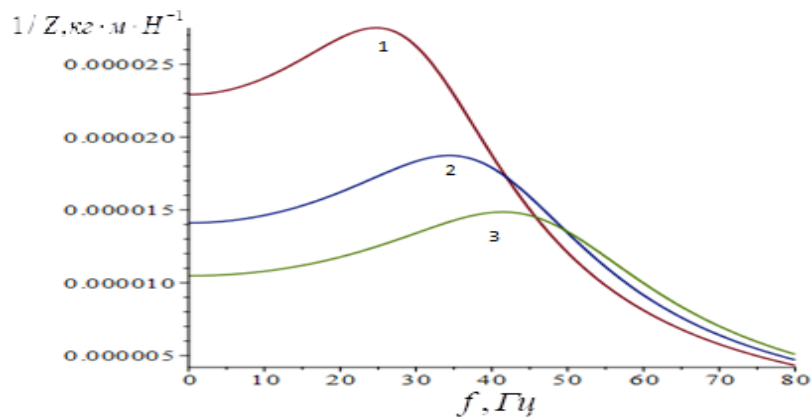


в) 1- начальный; 2-промежуточный; 3-конечный

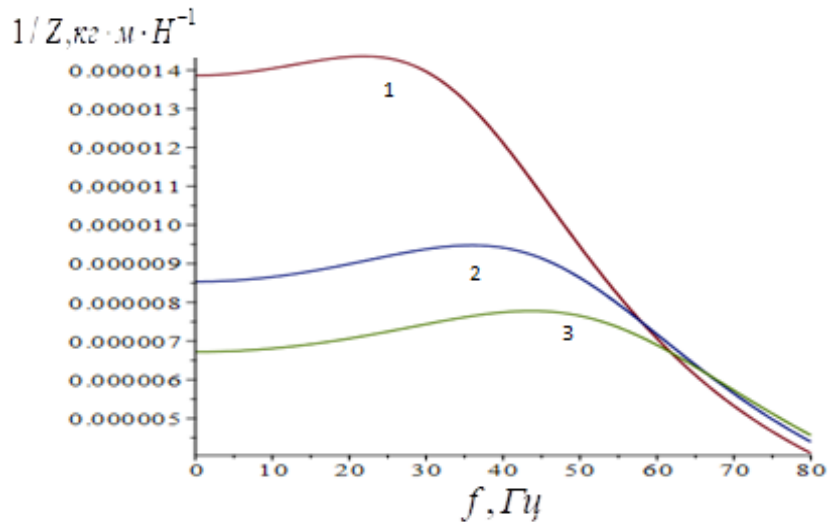
Рисунок 5.2. – Амплитудно-частотная характеристика обратного импеданса  $1/Z, \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{Н}^{-1}$  активной области слоя суглинистого грунта при работе а) тяжелого, б) среднего, в) легкого катка на различных этапах уплотнения



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



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



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

Рисунок 5.3. – Амплитудно-частотная характеристика обратного импеданса

$1/Z, \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{Н}^{-1}$  активной области слоя супесчаного грунта при работе а) тяжелого, б) среднего, в) легкого катка на различных этапах уплотнения

Зависимость импеданса от частоты проявляется не только за счет абсолютных величин жесткости и вязкости активной области и их значений в заданный момент времени для текущего состояния грунтовой среды, но и величины пятна контакта и толщины слоя, что учитывалось в вычислениях для катков различных типов.

### 5.1.1 Обоснование активной области уплотняемого слоя грунтовой среды в случае плоского пятна контакта с РО на энергоэффективных режимах работы катков

Для описания процессов, происходящих при виброуплотнении грунта с известными реологическими свойствами, важную роль играют исследования параметров рабочего органа и их влияние на эффективность работы катков, а также возможностей управления этими параметрами позволяет ее повысить. Движение рабочего органа и его влияние на работу катка может быть учтено изменением параметров пятна контакта и режимных параметров, определяющих характеристики взаимодействия РО и грунтового слоя. Следует отметить, что изучение формы и размера активной области вызывает неослабевающий интерес исследователей.

В частности, ряд работ [129-131] определяют форму активной области грунтового слоя, как симметричную призму из однородного материала, вид которой приведен на рис. 5.1.

Будем рассматривать взаимодействие рабочего органа уплотняющей машины с призмой как с тяжелой пружиной на жестком основании по плоскому пятну контакта прямоугольной формы.

Для определения жесткости пружины разделим призму на последовательные бесконечно тонкие слои толщиной  $dz$  с площадью  $(2z \sin \alpha + B)(2z \sin \beta + d)$ . Обратная жесткость относительно приложения нормальной нагрузки для элементарного слоя, расположенного на глубине может быть определена как



$$d\left(\frac{1}{c}\right) = \frac{(1-\gamma)dz}{E(2z \sin \alpha + B)(2z \sin \beta + d)}, \quad (5.8)$$

где  $E$  модуль упругости грунтовой среды,  $\gamma$  – коэффициент Пуассона. После интегрирования по переменной  $z$  можно получить полную обратную жесткость в виде

$$\frac{1}{c} = \int_0^h \frac{(1-\gamma)dz}{E(2z \sin \alpha + B)(2z \sin \beta + d)}, \quad (5.9)$$

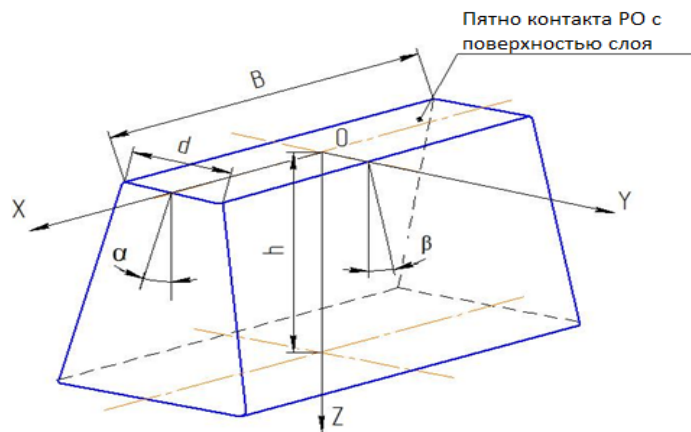


Рисунок 5.4 Призматическая форма эффективного объема (активной области) грунта

и, окончательно, жесткость, области, определяемой глубиной и углами раствора призмы записывается в виде

$$c = \frac{E(B \sin \beta - d \sin \alpha)}{(1-\gamma)} \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{2h \sin \beta + d}{2h \sin \alpha + B}\right)} - \frac{1}{\ln\left(\frac{d}{B}\right)} \right). \quad (5.10)$$

В случае прямоугольной призмы с длиной основания  $B$ , шириной основания  $d$  и высотой  $h$  жесткость при осевом нормальном деформировании может быть найдена как

$$c_o = \frac{EBd}{h(1-\gamma)}. \quad (5.11)$$

Величины углов  $\alpha$  и  $\beta$  для качественного исследования процесса деформирования

могут выбираться, исходя из теоретических соображений (в частности, их можно считать равными углу внутреннего трения среды). Однако, реальная ситуация требует рассматривать величины этих углов, исходя из результатов экспериментальных исследований. Графическая зависимость может быть представлена в виде поверхности на рис. 2.2, отображающей график обезразмеренной функции  $F(\alpha, \beta) = c/c_0$ , где значения величин, определяющих величину пятна контакта приняты

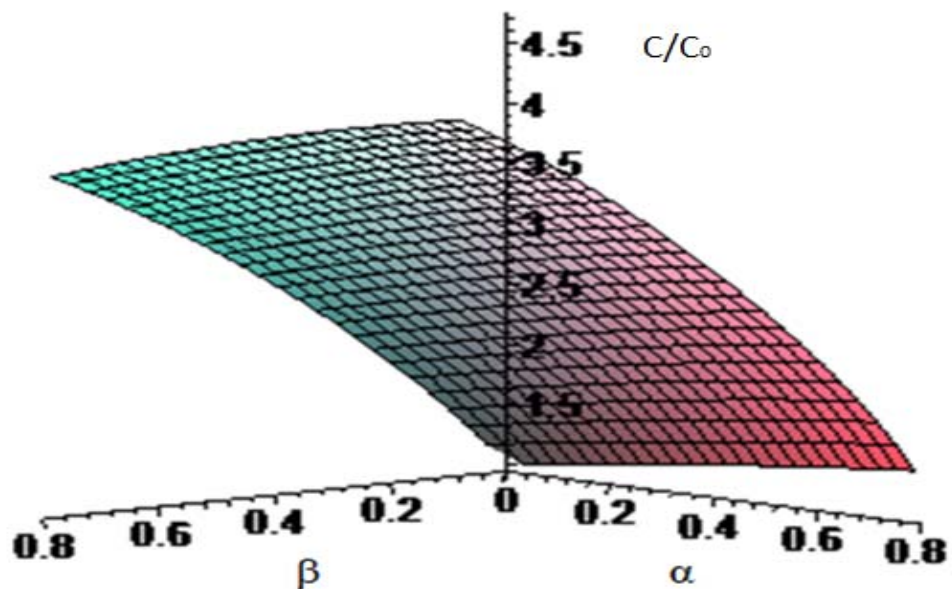


Рисунок 5.5 – Обезразмеренная жесткость призматического эффективного объема грунтового слоя. Величины углов  $\alpha=0$ ;  $\beta=0$  соответствуют прямоугольной призме,

$$V = 1\text{ м}; d = 0.1\text{ м}..$$

Следует отметить, что более точное определение формы эффективного объема грунта, с которым взаимодействует РО при работе катка возможно только при проведении экспериментальных исследований. Однако в рамках предлагаемого подхода сосредоточенных параметров, определение жесткости эффективного объема призмы грунта соответствует результатам экспериментальных исследований [129-131].

Иллюстрацией того, как уточнение формы активной области может повлиять на характеристики взаимодействия РО катка с грунтовой среды, может

служить упрощенная ситуация призмы с парой параллельных граней.

В качестве активной области грунта в этом случае рассмотрим призму высоты  $h$ , с верхним основанием длины  $B$  и ширины  $d$ , где  $h$  – толщина слоя грунта,  $B$  и  $d$  – длина и ширина пятна контакта рабочего органа соответственно (рисунок 1). Площадь пятна контакта  $S = Bd$ , а масса грунта  $m = \rho V = \rho B(d + h \tan \alpha)h$ , а угол  $\beta = 0$  [105]. Выбор в качестве модельной указанной формы грунта позволяет в том числе учесть распределение напряжений в грунте в процессе динамического воздействия. [7].

В случае предложенной формы уплотняемого объема несложные выкладки приводят к результату для жесткости  $c(d)$ :

$$\frac{1}{c} = \int_0^h \frac{dz}{ES(z)} = \int_0^h \frac{dz}{EB(d + 2z \tan \varphi)} = \frac{1}{2EB \tan \alpha} \ln \left( \frac{d + 2h \tan \varphi}{d} \right). \quad (5.12)$$

Так что окончательно жесткость уплотняемого объема грунта есть

$$c = \frac{2EB \tan \alpha}{\ln \left( \frac{d + 2h \tan \alpha}{d} \right)}, \quad (5.13)$$

и, соответственно, частота собственных колебаний активной зоны грунтового слоя при виброуплотнении имеет вид:

$$\omega_0^2 = \frac{c}{m} = \frac{2 \left( \frac{E}{\rho} \right) \tan \alpha}{h(d + h \tan \varphi) \ln \left( \frac{d + 2h \tan \alpha}{d} \right)}, \quad (5.14)$$

где известное соотношение  $E/\rho = v_{ac}^2$  – скорость распространения акустических волн в грунте. Как нетрудно проверить, при стремлении  $\tan \alpha$  к нулю (случай прямоугольной призмы) в результате предельного перехода получается хорошо известное выражение для жесткости однородного упругого параллелепипеда ширины  $d$ , длины  $B$  и высоты  $h$ . Полученный результат может быть использован в качестве исходного для расчета жесткости областей грунта под пятном контакта с грунтом РО произвольной формы, в том числе и неплоским на любом этапе работы катка, если зависимость жесткости от плотности (величины накопленной

пластической деформации) известна.

Вязкое сопротивление грунта при работе катка в модели с сосредоточенными параметрами, учитываемое коэффициентом  $k$ , с деформацией изменяется незначительно. Сила вязкого сопротивления при движении уплотняемого объема грунта есть

$$F_{visc} = \eta \frac{dv}{dy} S, \quad (5.15)$$

где  $S = 2Bh/\cos \alpha$  – площадь боковой поверхности выбранного объема грунта,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости грунта, а  $dv/dy$  – градиент скорости в направлении, перпендикулярном скорости смещения боковой поверхности грунта, также определяемый углом внутреннего трения. В работы катка, например при виброуплотнении, амплитуда рабочего органа, а следовательно, и верхней границы грунта составляет порядка 1 мм. Эта величина пренебрежимо мала по сравнению с толщиной слоя грунта  $h \approx 0,2 - 0,3$  м, соответственно, при этом незначительно меняется и площадь боковой поверхности, кроме этого, последнее явление связано с тем, что при уплотнении меняется и угол внутреннего трения [4]. Это приводит к выводу о том, что вязкость упруго вязкого элемента в модели с сосредоточенными параметрами практически остается постоянной, а при разбиении объема грунта на слои по толщине является аддитивной величиной [105].

Исследование поведения объема уплотняемого грунта при работе катка требует точной оценки соотношения смещения поверхности грунта и смещения сосредоточенной массы. В случае рассматриваемой призмы грунта его центр масс находится на высоте

$$\bar{x} = \frac{h \left( \frac{d}{2} + \frac{h \tan \alpha}{3} \right)}{(d + h \tan \alpha)} \quad (5.16)$$

относительно основания грунта. Нетрудно показать, что на величину  $\bar{x}$  выполняется условие

$$\frac{h}{3} \leq \bar{x} \leq \frac{h}{2}, \quad (5.17)$$

что приводит к выводу о том, что скорость смещения центра масс ниже скорости смещения верхней границы объема уплотняемого грунта, что не может не учитываться при определении величины коэффициента уплотнения для заданной величины высоты грунта и длины пятна контакта [105].

Более близкой к реальности и позволяющей устранить недостатки цилиндрической модели является форма усеченного конуса, с углом раствора, определяемым характеристиками грунта, сечение которой по диаметру пятна контакта приведено на рис. 5.3.

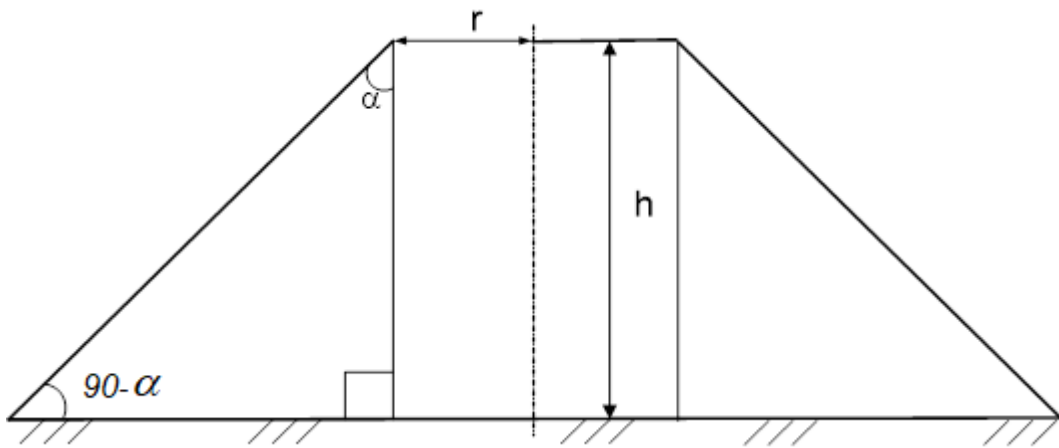


Рисунок 5.6. – Сечение эффективного объема грунта, выбранного в форме усеченного конуса

В случае взаимодействия РО катка с объемом грунта заданной формы, несложные выкладки приводят к результату для жесткости  $c$

$$\frac{1}{c} = \int_0^h \frac{dz}{ES(z)} = \int_0^h \frac{dz}{E\pi(r+z \tan \alpha)^2} = \frac{1}{E\pi \tan \alpha} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r+h \tan \alpha} \right) = \frac{1}{E\pi r} \left( \frac{h}{r+h \tan \alpha} \right).$$

Таким образом, окончательное выражение для жесткости рассматриваемого объема грунта есть

$$c = E\pi r \frac{r+h \tan \alpha}{h}, \quad (5.18)$$

она далее будет считаться постоянной, причем предельный переход  $\tan \varphi = 0$  дает

известное выражение для жесткости однородного упругого цилиндра.

Вязкость объема грунта, взаимодействующего с РО катка, будем вычислять в рамках следующих предположений:

- 1) Скорость слоев грунта убывает от максимальной на поверхности до нуля у твердого основания и эту зависимость для квазистационарных процессов можно считать линейной;
- 2) Расстояние, на котором касательная компонента скорости убывает до нуля, определяется углом внутреннего трения, характерным для определенного типа и состояния грунта.

Для вычисления вязкости разобьем грунт на слои толщиной  $dz$  с площадью боковой поверхности

$$dS = 2\pi(r + z \tan \alpha) dz, \quad (5.19)$$

имеющих скорость, линейно убывающую в толще грунта от скорости поверхности вальца  $V$  до нуля у основания по закону

$$v(z) = \frac{h-z}{h} V. \quad (5.20)$$

В этом приближении можно оценить вязкость эффективного объема грунта интегрированием. Касательная составляющая силы сопротивления, обусловленная вязкими свойствами грунта для каждого элементарного слоя есть

$$dF(z) = 2\pi(r + z \tan \alpha) \eta \left(\frac{V}{h}\right) \frac{dz}{\tan \varphi}, \quad (5.21)$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости грунта, а  $\alpha$  - угол, характеризующий вязкие свойства грунта, который определяет, на каком расстоянии от элементарного слоя касательная составляющая скорости затухает до нуля.

Вязкость эффективного объема грунта в этом случае определится из соотношения

$$F_{\text{вязк}} = bV = \int_0^h dF(z) = \frac{2\pi}{\tan \varphi} \left(r + \frac{h}{2} \tan \alpha\right) \eta V \quad (5.22)$$

как

$$b = \frac{2\pi}{\tan \alpha} \left(r + \frac{h}{2} \tan \varphi\right) \eta. \quad (5.23)$$

Значения жесткости и вязкости эффективного объема грунта для одного цикла работы катка могут с высокой степенью достоверности считаться постоянными.

Решение практических задач при описании взаимодействия РО катка с материалом при работе по уплотнению грунтов в рамках предлагаемого подхода сводится к определению зависимости характера движения центра масс уплотняемого объема грунта от смещения его поверхности.

Известное выражение для центра масс усеченного конуса, определяющего деформируемый объем грунта, есть

$$\bar{z}_0(h_0, R) = \frac{h_0}{4} \frac{3R^2 + 2R(R + h_0 \tan \alpha) + (R + h_0 \tan \alpha)^2}{R^2 + R(R + h_0 \tan \alpha) + (R + h_0 \tan \alpha)^2}. \quad (5.24)$$

Найдем смещение центра масс  $\bar{x}$  при изменении высоты усеченного конуса  $h_0$  на малую по сравнению с ней величину  $X$ , с точностью до членов второго порядка малости:

$$\bar{z} = \frac{d\bar{x}_0}{dh_0} X = \frac{1}{4} \frac{R^4 + 24R^3 h_0 \tan \varphi + 15R^2 h_0^2 \tan^2 \varphi + 6R h_0^3 \tan^3 \varphi + h_0^4 \tan^4 \varphi}{(R^2 + R(R + h_0 \tan \varphi) + (R + h_0 \tan \varphi)^2)^2} Z.$$

Различные значения параметра  $R$ , определяющего форму пятна контакта, могут существенно изменить положение центра масс объема грунтового слоя. В частности, при фиксированном угле  $\alpha$  и толщине недеформированного грунтового слоя  $h_0$ ,  $\bar{x}_0$  может изменяться от  $\bar{x}_0 = h/2$  при  $R \rightarrow \infty$ , что эквивалентно вырождению конуса в прямой цилиндр при  $\alpha \rightarrow 0$  до  $\bar{x}_0 = h/4$  при  $R \rightarrow 0$ , что соответствует переходу к случаю неусеченного конуса или возрастанию угла  $\alpha \rightarrow \pi/2$ .

Проведенные расчеты могут выступать основой для рекомендаций по выбору начального приближения при подборе частотного режима работы катка, обеспечивающего энергоэффективное уплотнение, согласно динамического критерия (максимума обратного импеданса).

## 5.2 Обоснование комплекса режимных параметров работы катков для энергоэффективного уплотнения грунтовых сред.

Построенная в рамках работы эволюционная модель взаимодействия РО вибрационного катка со слоем упруговязкопластичной среды и численный алгоритм ее решения позволяют осуществить анализ работы реальных катков для уплотнения различных грунтовых сред. Анализ осуществляется на основе результатов численного эксперимента, моделирующего поведение грунтовой среды при уплотнении РО вибрационных катков.

Выявление закономерностей накопления пластических деформаций слоем грунтовой среды при работе катка и сопутствующей передаче среде энергии машины осуществляется с применением средств и методов, обоснованных результатами теоретических и экспериментальных исследований, проведенных ранее. Ход исследования должен давать возможность отслеживать величины, характеризующие эксплуатационные возможности катка на различных режимах работы, определяемых набором входных параметров задачи.

Таблица 5.1 – Величины, характеризующие процесс уплотнения

Обозначение	Наименование параметра
$\Delta z_{pl}$ , мм	накопленная грунтовым слоем пластическая деформация за проход катка
$h$ , м	достигнутая за проход катка толщина грунтового слоя
$k$	достигнутый за проход катка коэффициент уплотнения
$\dot{\Delta z}_{pl}$ , мм	скорость накопления грунтовым слоем пластической деформации за проход катка
$\Delta W_{pl}$ , Вт	Средняя за проход мощность, затрачиваемая на пластическое деформирование слоя

Выбор набора входных параметров определяется таким образом, чтобы они эффективно отражали физико-механические свойства грунтовой среды и характеристики уплотняющей машины.



Таблица 5.2 – Входные параметры численного эксперимента

Обозначение	Наименование параметра
$v$ , м/с	скорость поступательного движения катка
$h_0$ , м	толщина грунтового слоя (принимается для слоя, уплотненного до номинальной плотности)
$P$ , Н	статическая составляющая нагрузки на валец катка
$F_0$ , Н	амплитуда периодической гармонической силы
$f$ , Гц ( $\omega, c^{-1}$ )	частота приложения периодической гармонической силы
$k_0$	исходный коэффициент уплотнения
$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	номинальная плотность грунтовой среды
$b$ , м	длина пятна контакта вальца с материалом слоя
$L$ , м	ширина пятна контакта вальца с материалом слоя
$E_{el}$ , МПа	модуль упругой деформации грунтовой среды
$E_{pl}$ , МПа	модуль пластической деформации грунтовой среды
$\eta_{нагр}$ , МПа·с	коэффициент динамической вязкости грунтовой среды для этапа нагружения
$\eta_{разгр}$ , МПа·с	коэффициент динамической вязкости грунтовой среды для этапа разгрузки
$\sigma_{el}$	предел упругости грунтовой среды
$\sigma_{fl}$	предел текучести грунтовой среды
$\sigma_{destr}$	предел прочности грунтовой среды

Варьирование входных параметров позволяло выявить особенности скоростных и частотных характеристик энергоэффективных режимов работы вибрационных катков. Зависимость периодической силы со стороны катка от времени выбиралась в виде гармонической функции

$$F(t) = F_0 \sin \omega t + P .$$

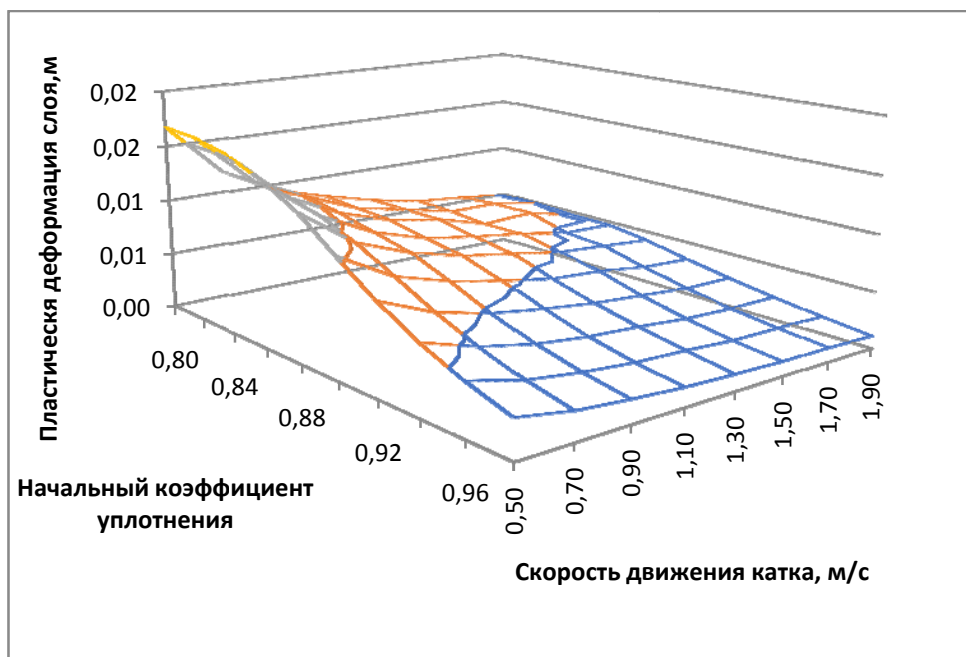
В рамках работы были проведены вычисления для спектра управляющих

параметров, характерных для массогабаритных характеристик и эксплуатационных режимов работы вибрационных катков, используемых в дорожном строительстве.

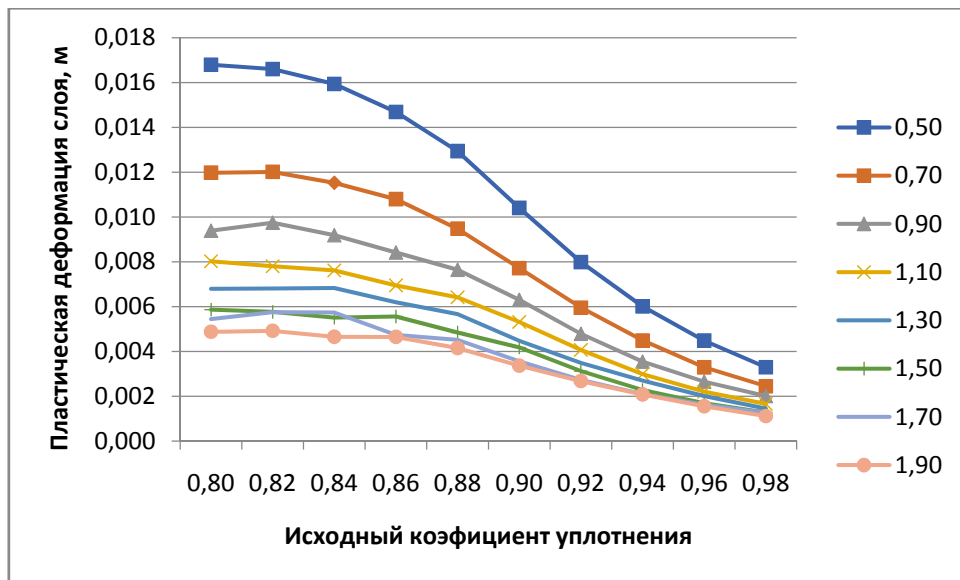
Результаты расчетов, в дальнейшем используются для решения оптимизационной задачи по выбору энергоэффективных режимов работы катка. Ниже приведены впервые полученные зависимости пластической деформации слоя, достигнутого коэффициента уплотнения, работы по пластическому деформированию слоя с учетом мощности, затрачиваемой на это за один проход при работе катка.

### **Каток Stavostroj STA-102 (слой супесчаного грунта толщиной 0,52 м)**

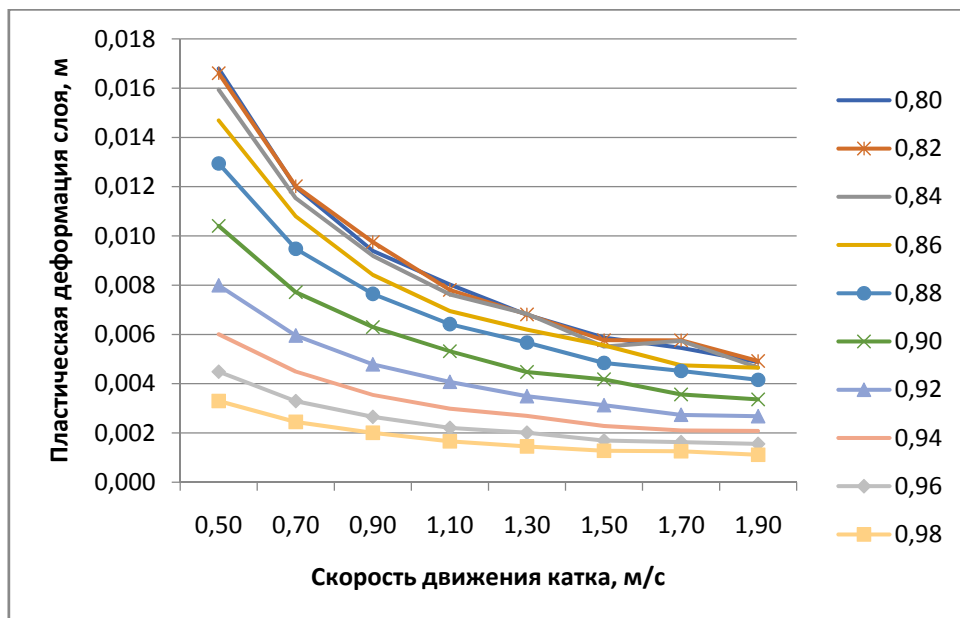
Результат расчетов может быть наглядно представлен в виде поверхности на рисунке 5.6 а). Эта поверхность реализуется в виде семейств двумерных графиков на рисунках 5.6 б), в). Графики семейств параметризованы постоянными значениями коэффициента уплотнения (Рис. 5.6 б) и скорости поступательного движения катка (Рис. 5.3 в). В рамках расчетной модели рассматривался каток Stavostroj STA-102 (масса 10 т, длина пятна контакта -1.8 м, амплитуда вынуждающей силы 50 кН).



а)



б)

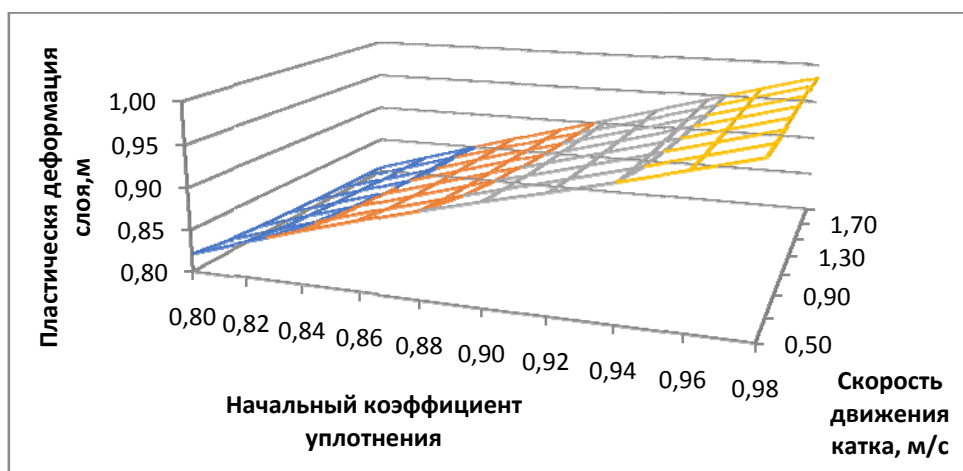


в)

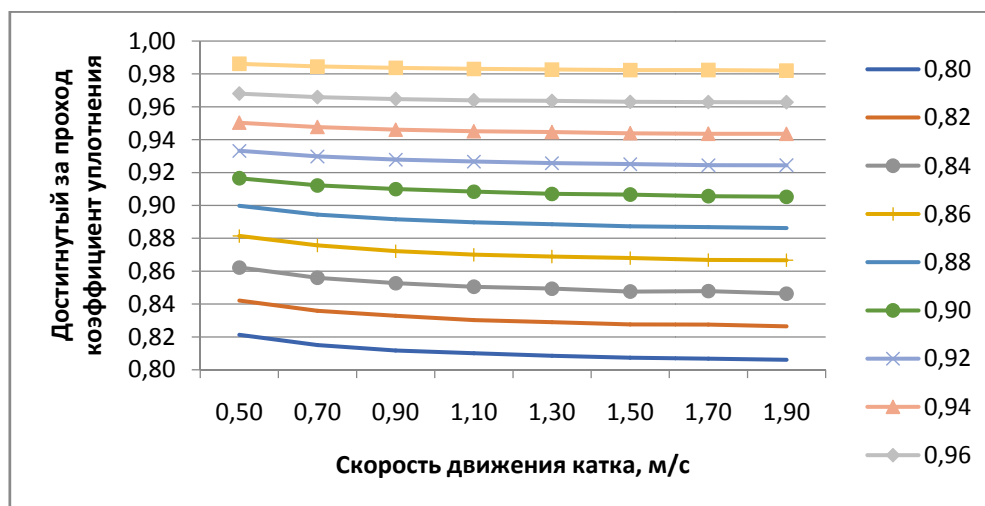
Рисунок 5.7 – Накопленная слоем пластическая деформация при работе катка за один проход в виде поверхности а) в зависимости от скорости движения катка б) и начального состояния материала слоя в)

Анализ зависимостей накопления пластической деформации слоем при работе катка показывает, что с возрастанием скорости катка величина деформации уменьшается (Рис. 5.7 б). Это уменьшение, однако, не является пропорциональным скорости. Начиная со скоростей 1.1-1.3 м/с (3.9-4.7 км/ч) деформация достаточно слабо зависит от скорости движения катка для всех начальных состояний уплотняемой среды, параметризуемой исходным

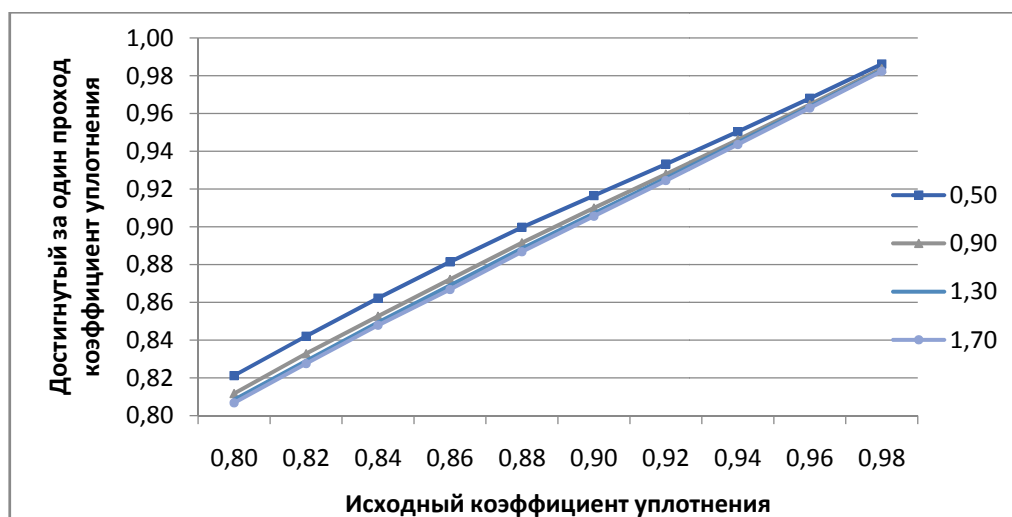
коэффициентом уплотнения. При этом зависимости накопленной деформации от исходного коэффициента уплотнения (Рис. 5.6 в) демонстрируют схожее поведение для всех скоростных режимов работы катка с пологими участками в начале и конце характеристики и быстрым убыванием в области средних значений коэффициента уплотнения ( $k_0 \approx 0.9$ ). Объяснением этому может служить соотношение зависимостей модулей деформации, упругости и коэффициента динамической вязкости для суглинистого грунта от накопленной пластической деформации (коэффициента уплотнения).



а)



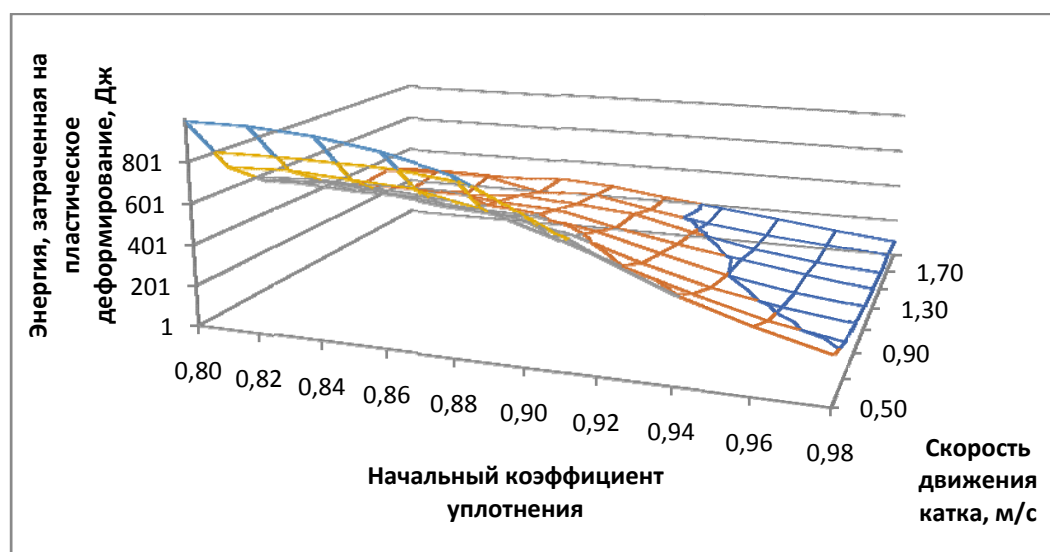
б)



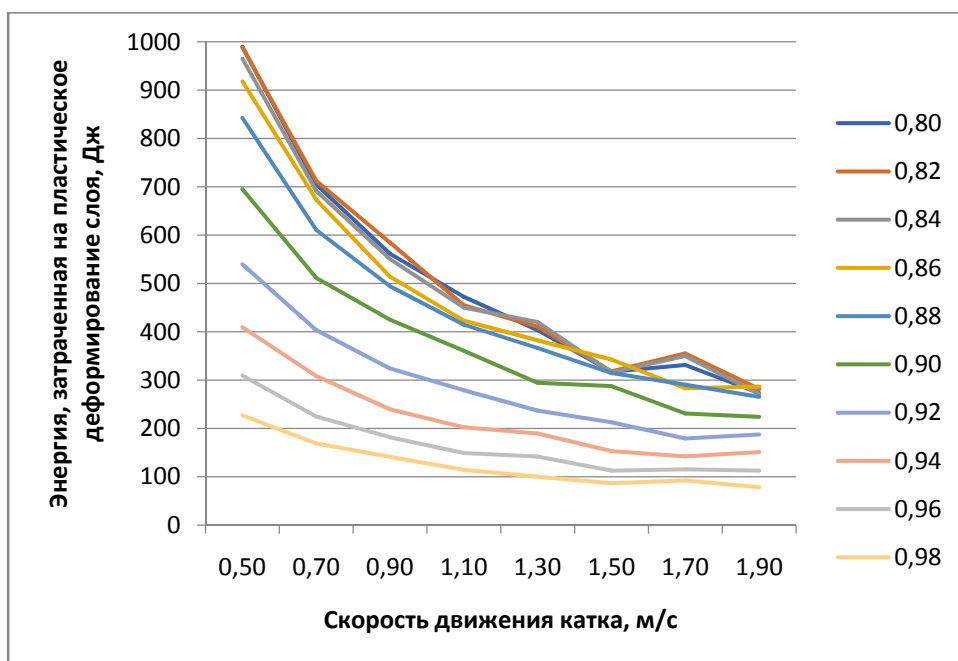
б)

Рисунок 5.8 – Достигнутый за один проход при работе катка коэффициент уплотнения в виде поверхности а), в зависимости от скорости движения катка б), и начального состояния материала слоя в)

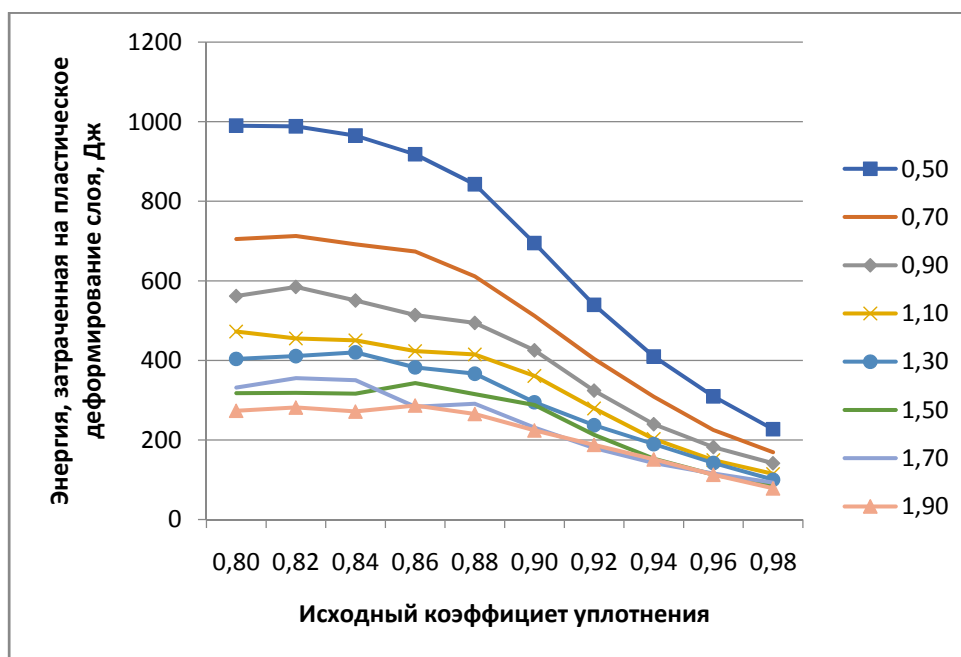
Коэффициент уплотнения, достигаемый за один проход при работе катка слою грунта, естественным образом, возрастает с начальным коэффициентом уплотнения и убывает со скоростью движения катка. Аналогично предыдущим зависимостям при средних скоростях движения катка для среднеуплотненного супесчаного грунта, приращение коэффициента уплотнения демонстрирует практически постоянный характер (1% за проход). Зависимости накопленного коэффициента уплотнения от скорости катка для различной толщины слоя могут служить для определения наиболее интенсивных режимов работы катка.



а)



б)

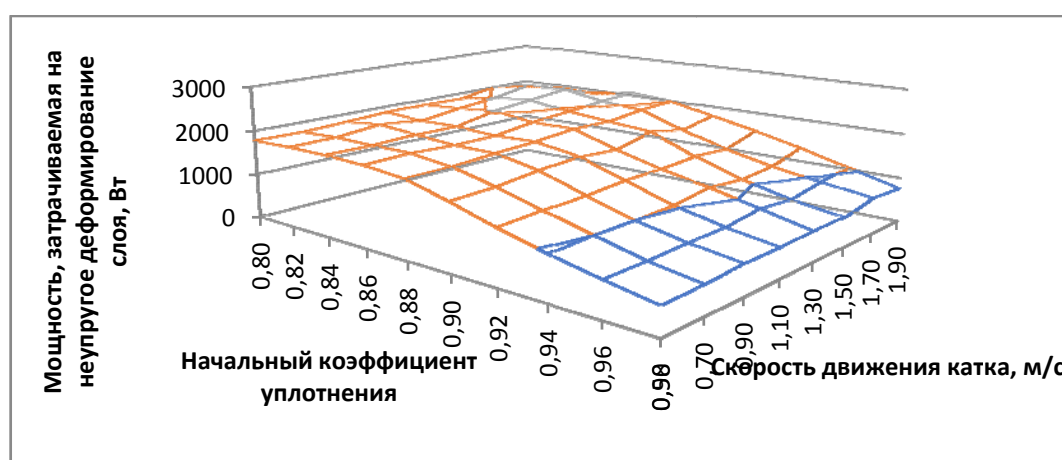


в)

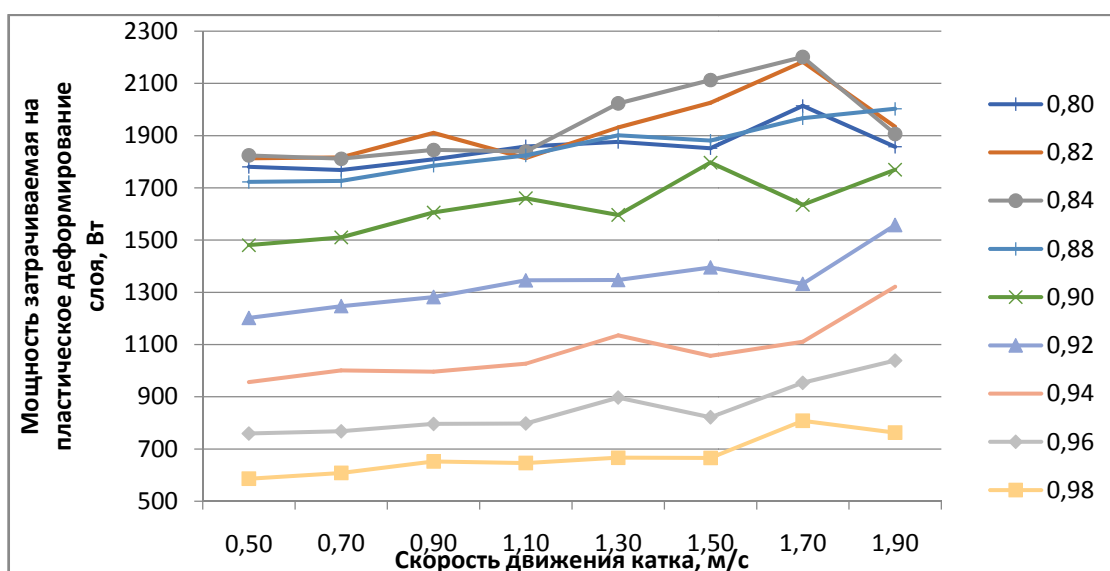
Рис. 5.9 Затраченная на неупругое деформирование энергия за один проход при работе катка в виде поверхности а), зависимости от скорости движения катка б) и начального состояния материала слоя в)

Зависимости передаваемой грунтовому слою энергии, затрачиваемой на пластическое деформирование при работе катка за один проход, служат для выявления скоростных режимных параметров энергоэффективной работы уплотняющих дорожных машин. С возрастанием скорости катка и начального

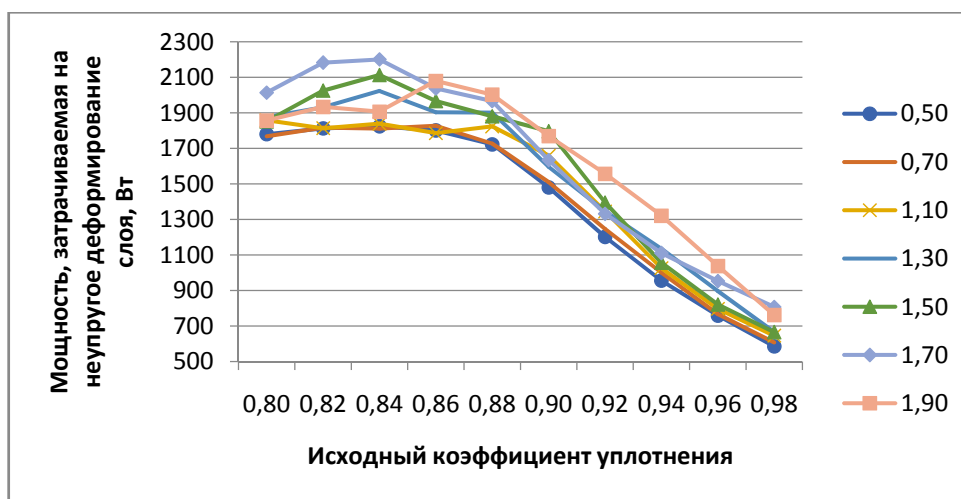
коэффициента уплотнения, как видно из графиков, энергия неупругого деформирования грунтового слоя, уменьшается, выходя на насыщение для высоких скоростей перемещения катка (4-7 км/ч). При этом приращение энергии, затраченной на неупругое деформирование слоя, не является пропорциональным изменению скорости, что может служить критерием для выбора энергоэффективного скоростного режима работы катка. Кроме этого семейства зависимостей, оценка эффективности энергопередачи может быть проведена при анализе резонансных характеристик активной области грунтового слоя, в частности с использованием механического импеданса, как было показано выше.



а)



б)



в)

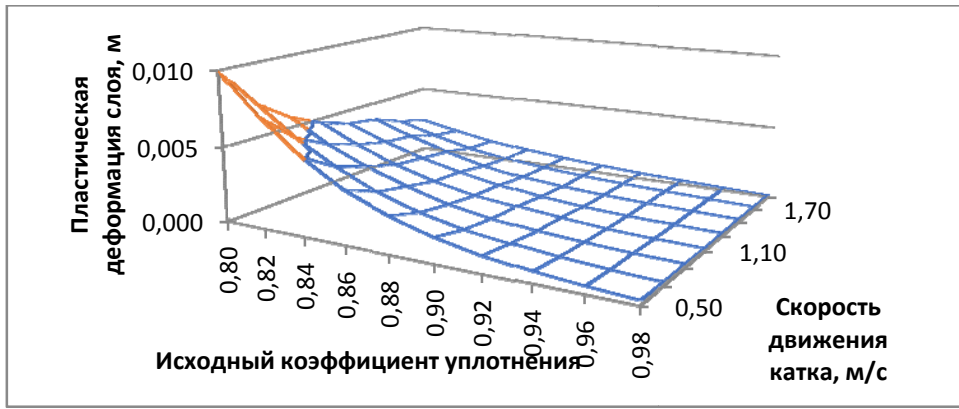
Рис. 5.10 Зависимость мощности катка, затраченной на неупругое деформирование за один проход катка виде поверхности а) от скорости движения катка а) и начального состояния материала слоя в)

Средняя мощность, затраченная при работе катка на неупругое деформирование грунтового слоя за один проход, выступает характеристикой процесса уплотнения, явно описывающей его энергоэффективность. Видно, что для с изменением начального состояния грунтового слоя мощность пластического деформирования для различных скоростей движения катка меняется достаточно слабо, однако максимум поглощаемой грунтом мощности смещается для более высоких скоростей движения катка в сторону более уплотненного исходного состояния материала слоя.

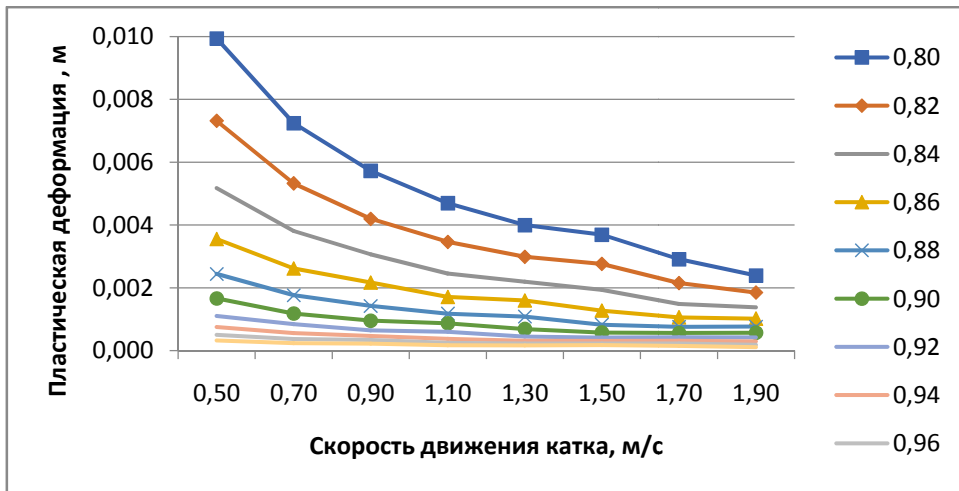
### **Каток ДУ-107 (слой суглинистого грунта толщиной 0,35 м)**

Результаты численного эксперимента по уплотнению суглинистого грунта (толщина слоя 350 мм) позволили получить зависимости, аналогичные случаю супесчаного грунта, исследованного выше и также представленные в виде поверхностей и семейств их сечений, параметризованных постоянными значениями скорости или исходной величины коэффициента уплотнения. Расчеты проводились для катка с параметрами, соответствующими модели ДУ-107 (масса 1.5 т, длина пятна контакта -1.2 м, амплитуда вынуждающей силы 15 кН).

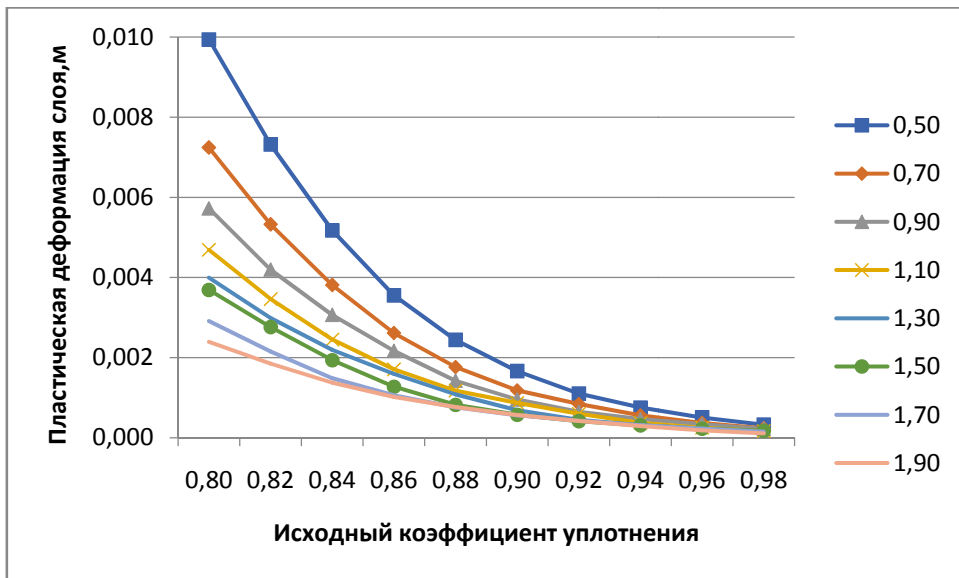




а)



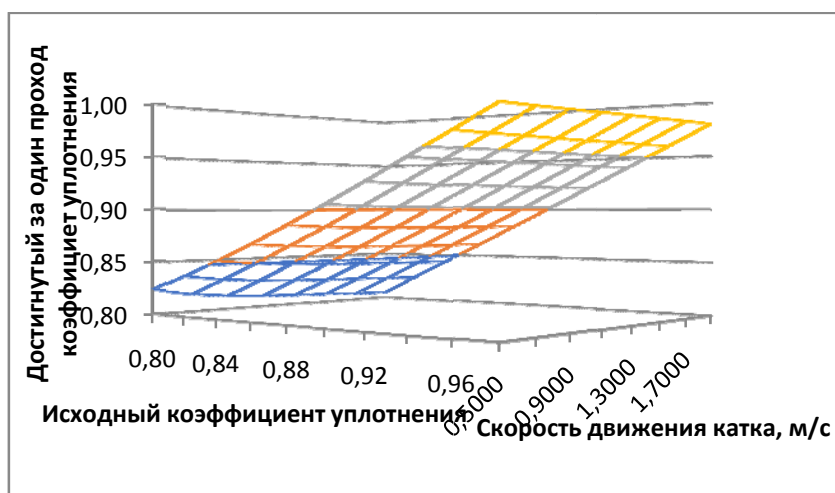
б)



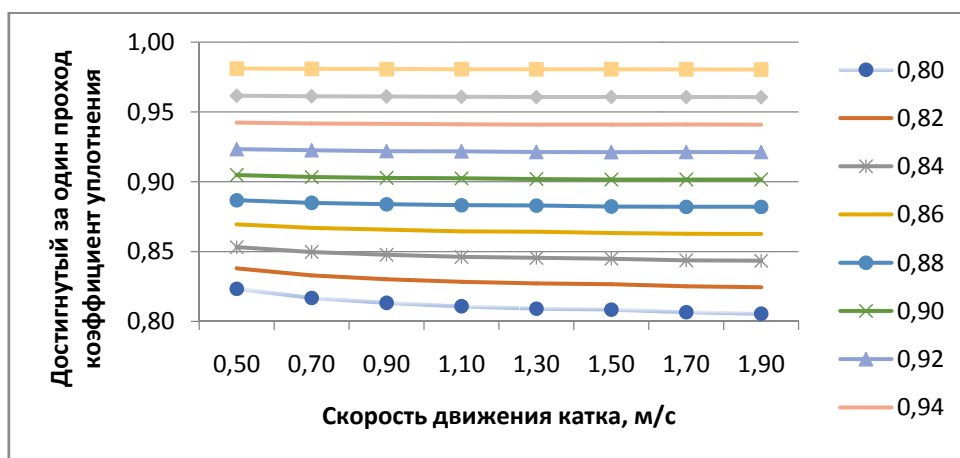
в)

Рис. 5.10 Накопленная слоем пластическая деформация при работе катка за один проход в виде поверхности а) в зависимости от скорости движения катка б) и начального состояния материала слоя в)

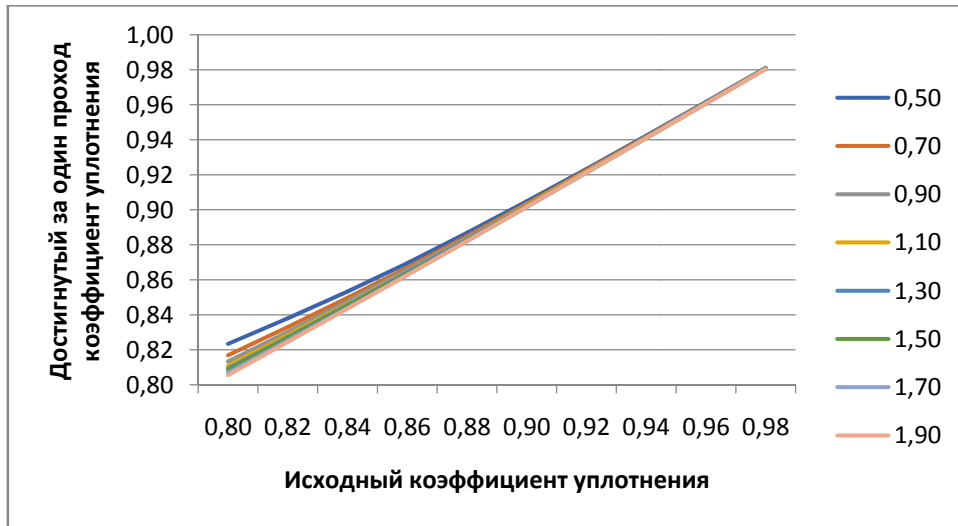
Область медленного изменения величины накопленной деформации за единичный проход для суглинистого грунта смещается в область более низких скоростей поступательного движения катка. Это объясняется более высокой жесткостью активной области слоя и отличием в зависимостях вязких и упругих свойствах среды от накопленной пластической деформации (коэффициента уплотнения).



а)



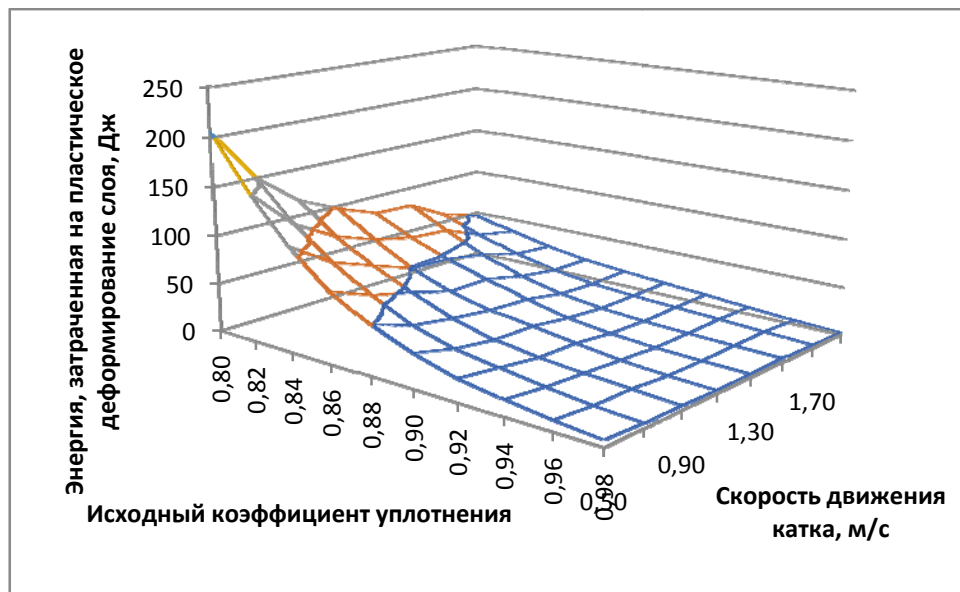
б)



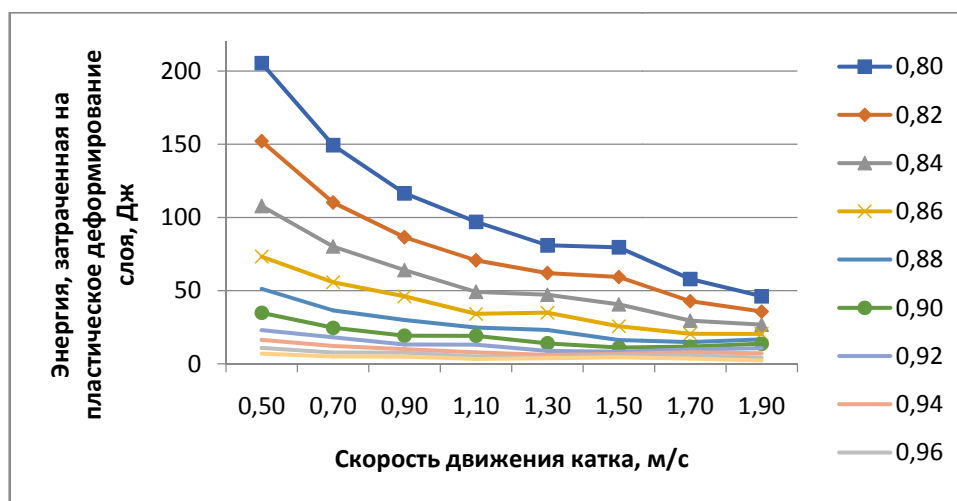
в)

Рисунок 5.9 – Достигнутый за проход коэффициент уплотнения при работе катка за один проход в виде поверхности а) и в зависимости от скорости движения катка б) и начального состояния материала слоя в)

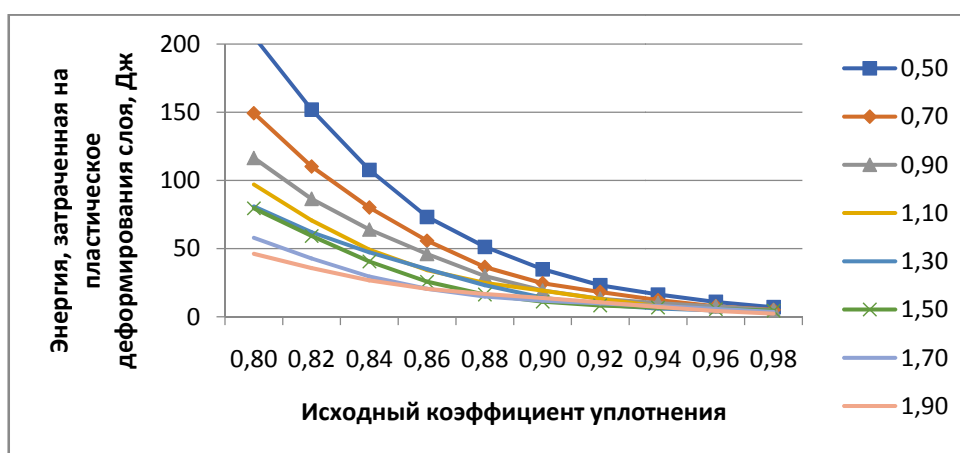
Зависимости достигнутого за проход коэффициента уплотнения демонстрируют аналогичное супесчаному грунту поведение, отличаясь по величине.



а)

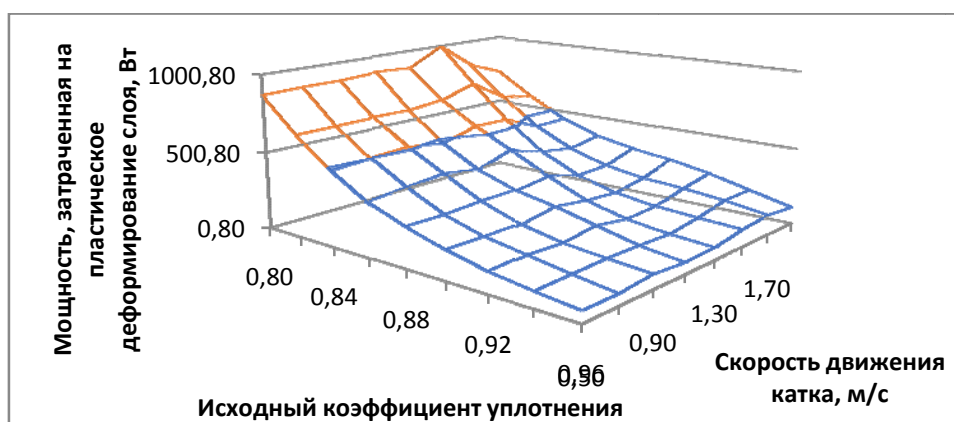


б)

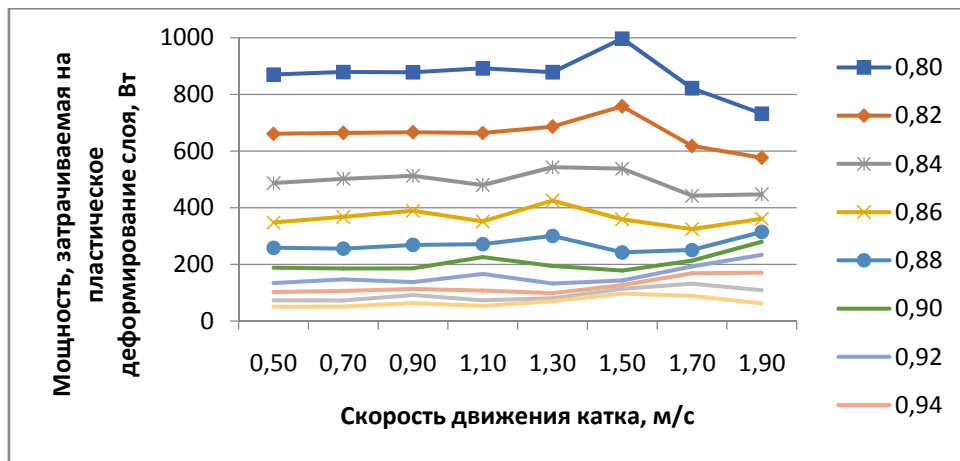


в)

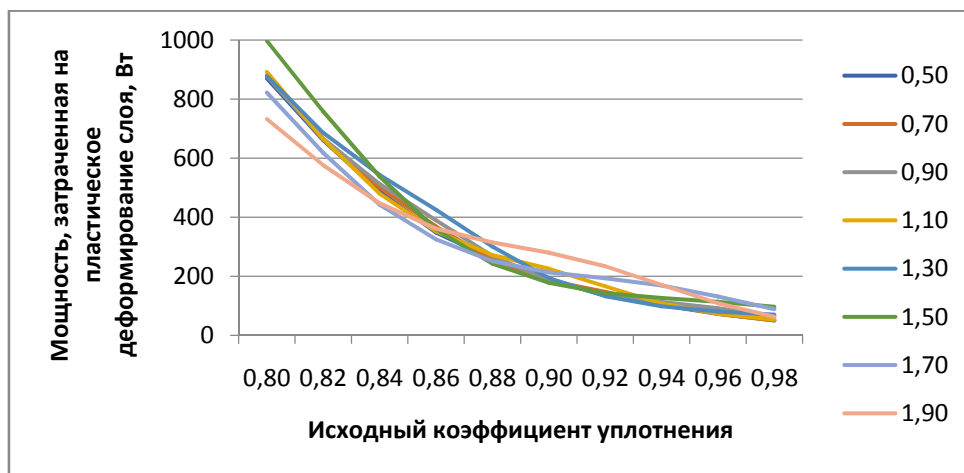
Рисунок 5.10 – Затраченная на неупругое деформирование энергия при работе катка за один проход в виде поверхности а) и в зависимости от скорости движения катка б) и начального состояния материала слоя в) [105]



а)



б)



в)

Рисунок 5.11 – Затраченная на неупругое деформирование мощность в виде поверхности а) и в зависимости от скорости движения катка б) и начального состояния материала слоя в) [105]

Деформативные характеристики суглинистого грунта обуславливают вид зависимостей поглощаемой средой мощности, идущей на неупругое деформирование. Соотношение зависимостей вязкой и упругой (квазиупругой) составляющей сопротивления деформирующему воздействию для суглинистого грунта таково, что мощность, передаваемая грунту для неупругого деформирования, имеет максимум. Максимальное значение передаваемой неупруго деформируемой грунтовой среде при работе катка за один проход мощности с ростом исходного коэффициента уплотнения смещается в область более низких скоростей, что подтверждает адекватность теоретических исследований. Также это может служить критерием для выбора

энергоэффективного скоростного режима работы катка при уплотнении суглинистых грунтов на различных этапах процесса уплотнения. Результаты исследований с обсуждением их возможностей были опубликованы автором в работе [191].

### Результаты исследований по определению эффективных частот приложения периодической уплотняющей силы

Результаты численного эксперимента, в котором варьировалась частота силы динамического воздействия, позволил выявить диапазоны частот, в которых уплотнение супесчаного и суглинистого грунтов происходит наиболее интенсивно.

В качестве зависимости, показывающей связь интенсивности накопления грунтом пластической деформации с частотными параметрами работы катка, выступала накопленная слоем пластической деформации за один проход катка от частоты вынуждающей силы. Поведение семейств частотных характеристик неупругой деформации при постоянной скорости движения катка приведено на рисунках 5.12-5.15. ( $k_y = 0.84, 0.86, 0.88, 0.90, 0.92, 0.94, 0.96, 0.98$ )

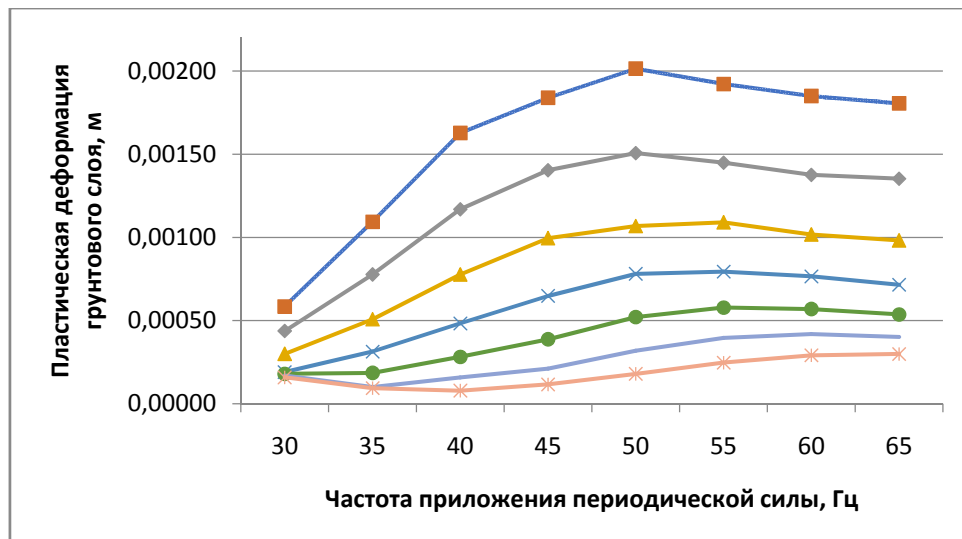


Рисунок 5.12 – Накопленная слоем суглинистого грунта пластическая деформация для различных исходных значений коэффициентов уплотнения в зависимости от частоты приложения силы при скорости движения катка ДУ-107 3 км/ч

Проведенные исследования выявили значения частотного параметра, при котором накопленная слоем пластическая деформация максимальна.

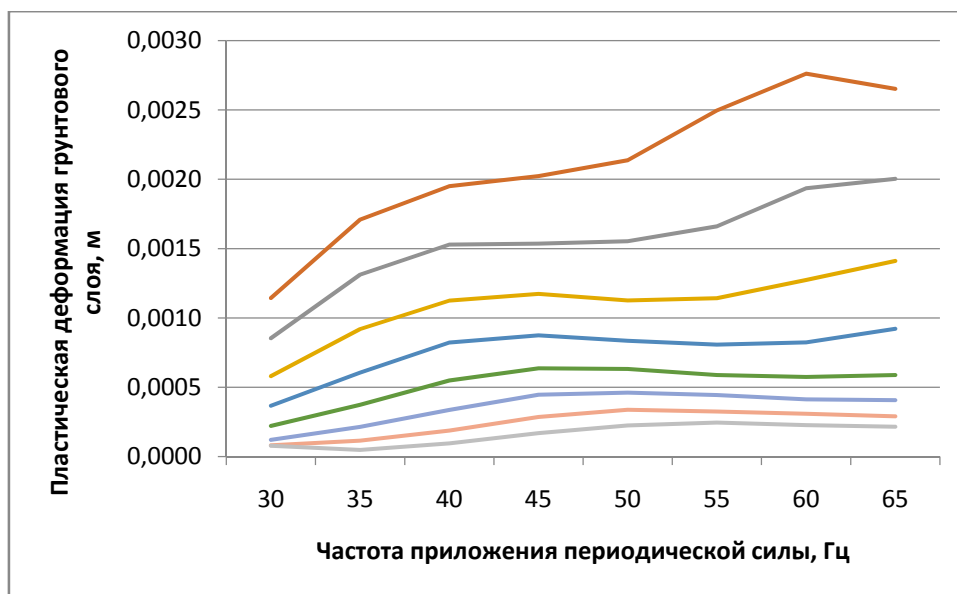


Рисунок 5.13 – Накопленная слоем суглинистого грунта при работе катка за один проход пластическая деформация для различных исходных коэффициентов уплотнения в зависимости от частоты при скорости движения катка ДУ-107 2,4 км/ч

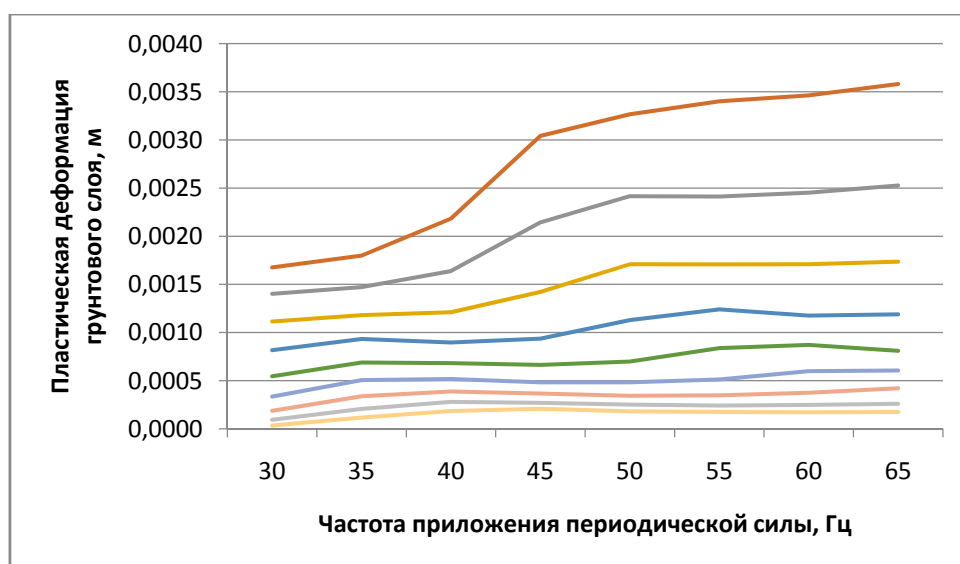


Рисунок 5.14 – Накопленная слоем суглинистого грунта при работе катка за один проход пластическая деформация для различных исходных коэффициентов уплотнения в зависимости от частоты при скорости движения катка ДУ-107 2 км/ч)

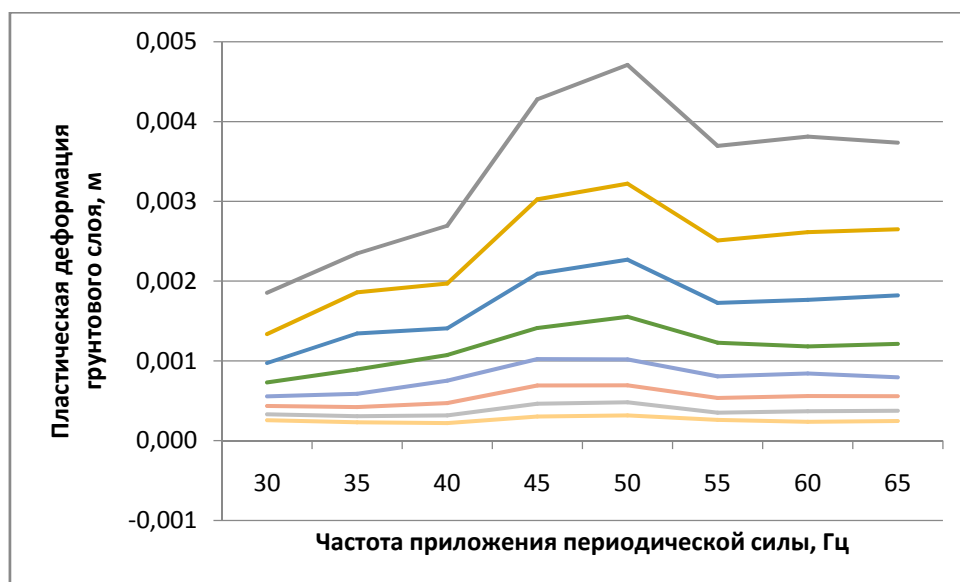


Рисунок 5.15 – Накопленная слоем суглинистого грунта при работе катка за один проход пластическая деформация для различных исходных коэффициентов уплотнения в зависимости от частоты при скорости движения катка ДУ-107 1 км/ч

Анализ зависимости частоты максимального накопления пластической деформации при работе катка от скорости его поступательного движения позволяет сделать выводы о возможности регулирования частотных параметров уплотняющего воздействия для повышения интенсивности уплотнения.

Поведение семейств характеристик выявляет закономерности поведения частоты максимального накопления пластических деформаций слоем суглинистого грунта от скорости движения катка при различных начальных состояниях (коэффициенте уплотнения слоя):

- 1) Частота максимального накопления пластической деформации при работе катка зависит от начальной плотности слоя.
- 2) Частота, соответствующая максимальному накоплению пластической деформации слоем при работе катка возрастает с увеличением скорости поступательного движения катка изменяясь в диапазоне 45-50 Гц для скоростей 1.5-3 км/ч, в диапазоне 50-60 Гц для скоростей 3-4.5 км/ч и 60-65 Гц для скоростей 4.5-6 км/ч.

Аналогичный результат в рамках численного моделирования был получен для уплотнения супесчаного грунта в условиях натурального эксперимента, результаты



которого обсуждались выше (Рис.5.16-5.19).

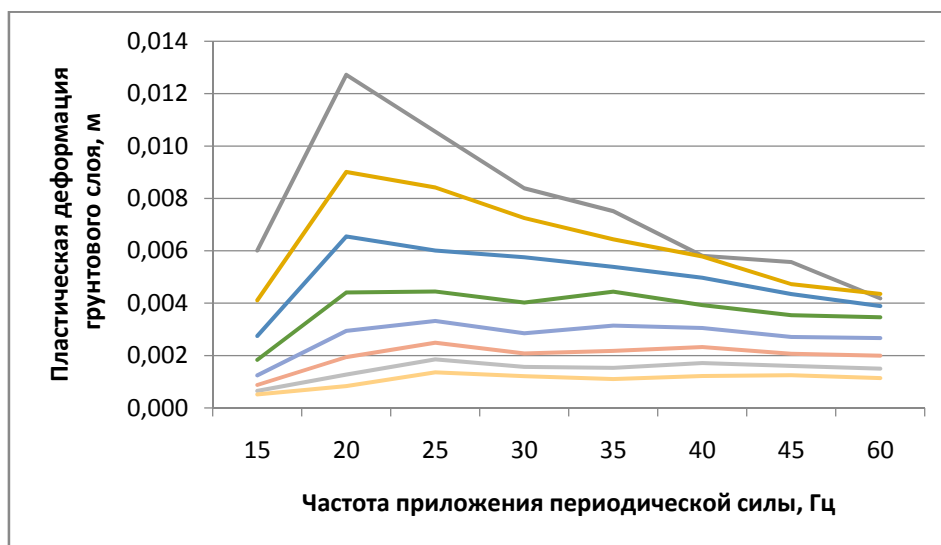


Рисунок 5.16 – Накопленная слоем супесчаного грунта пластическая деформация при работе катка для различных исходных коэффициентов уплотнения в зависимости от частоты приложения силы для скорости движения катка Stavostroj STA VHS 102K 6.12 км/ч

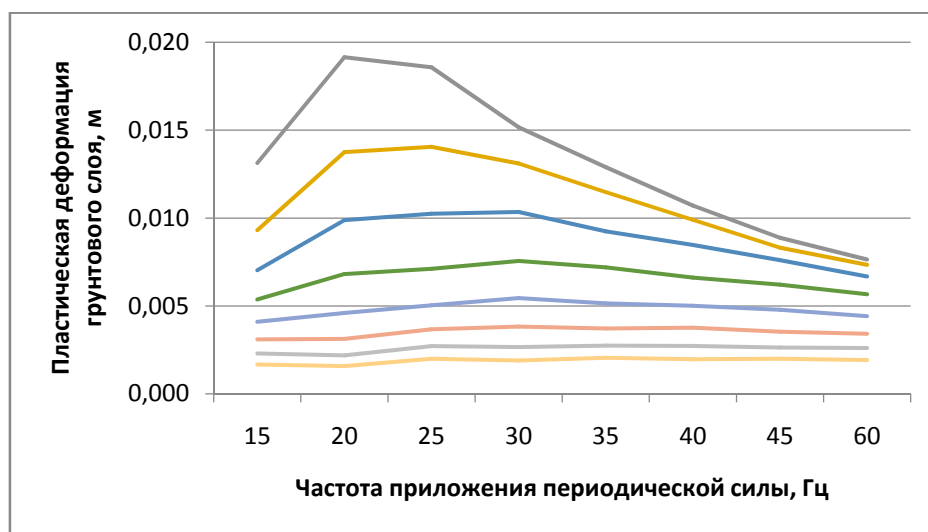


Рисунок 5.17 – Накопленная слоем супесчаного грунта пластическая деформация при работе катка для различных исходных коэффициентов уплотнения в зависимости от частоты приложения силы при скорости движения катка Stavostroj STA VHS 102K 3.24 км/ч

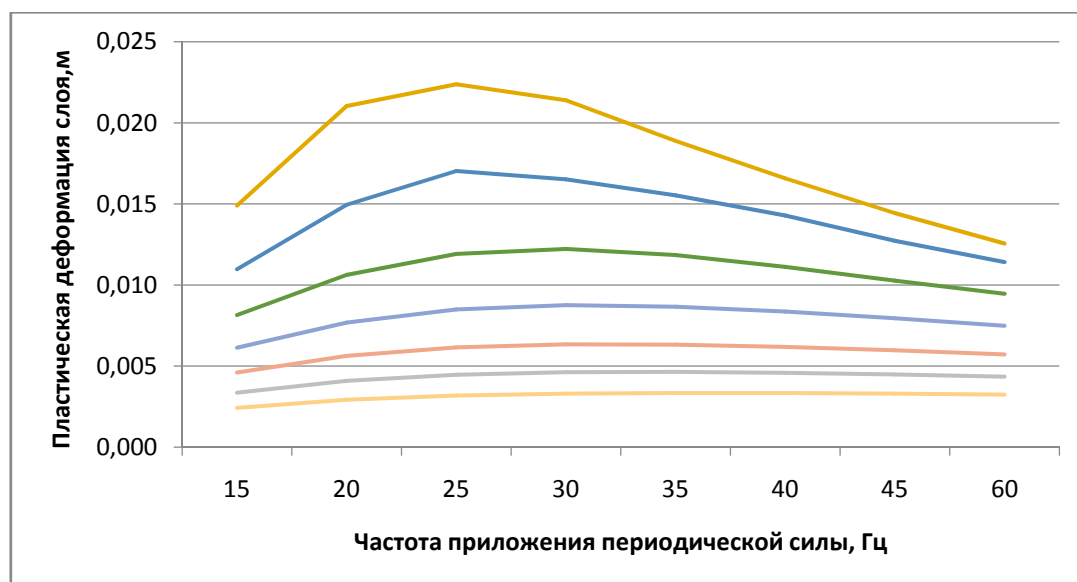


Рисунок 5.18 – Накопленная слоем супесчаного грунта пластическая деформация при работе катка для различных исходных коэффициентов уплотнения в зависимости от частоты приложения силы при скорости движения катка Stavostroj STA VHS 102K 1.8 км/ч

Особенности накопления супесчаным грунтом пластической деформации при работе катков на различных частотах силового воздействия демонстрируют максимумы в области низких частот, характерных для существующих моделей катков. При этом возрастание коэффициента уплотнения приводит к требованию повышения частоты деформирования, соответствующей максимуму накопленной пластической деформации. Это связано с изменениями резонансных характеристик активной области при изменении деформационных характеристик уплотняемого грунта.

### 5.3 Определение комплекса режимных параметров работы вибрационных катков для энергоэффективного уплотнения грунтов.

Современные требования к эффективной работе уплотняющих машин накладывают на скорость поступательного движения грунтовых вибрационных катков ограничения, связанные с особенностями уплотняемых сред и эксплуатационными характеристиками катков. Результаты проведенных в работе исследований послужили данными для оптимизационной схемы, позволяющей

выявлять наиболее выгодные с точки зрения как накопления пластических деформаций и энергопоглощения пластически деформируемой средой, так и с точки зрения производительности катка, скоростные и частотные режимы.

Результаты математического моделирования процесса уплотнения упруговязкопластичных грунтовых сред вибрационными катками подтверждает известные результаты о зависимостях пластического деформирования материалов в строительстве, в том числе и закрепленные в существующих стандартах и рекомендациях. Следует отметить, что Стандарт Национального объединения строителей 2012 года, которым руководствуются при устройстве оснований дорожных одежд автомобильных дорог, является в части технологии уплотнения грунтов развитием Методических рекомендаций по повышению эффективности использования виброкатков при сооружении земляного полотна автомобильных дорог 1987 года [86, 137, 138].

Указанные руководящие документы декларируют сходные идентичные частотные и скоростные параметры режимов работы катков, руководствуясь опытными данными.

Оптимальными при уплотнении грунтовых сред считаются скорости движения катков, лежащие в диапазоне от 1,5 до 3 км/ч с возможностью увеличения в различных условиях до 6-8 км/ч на промежуточных проходах. Частоты, рекомендуемые для вибрационного уплотнения грунтовых сред предполагаются лежащими в диапазоне 20-35 Гц, что не соответствует эксплуатационным параметрам современных катков, рассчитанных на работу с частотой более 40 Гц, доходя у легких универсальных виброкатков до 65 Гц.

Основным критерием выбора комбинации частотного и скоростного режима является время, проводимое активной областью грунтовой среды под воздействием вибрации (количество ударов) при работе катка за один проход. При этом особое внимание уделяется особенностям распределения вибрационных смещений и виброукорений по толщине грунтового слоя, которые оказываются существенно зависящими от скорости движения катка. Главным требованием при этом выступает сохранение требуемой глубины проработки слоя при

максимизации величины накопленной слоем пластической деформации за каждый проход при работе катка. Стандартным ходом технологического процесса выступает уплотнение при постоянной скорости движения катка. Такой подход не может не влиять на производительность технологического процесса, поскольку изменение характеристик среды с уплотнением при этом не принимается в расчет, а адаптивное уплотняющее воздействие по контактному давлению происходит естественным образом, благодаря уменьшению длины пятна контакта РО катка с поверхностью слоя при упрочнении уплотняемого материала во время работы катка.

Учет изменяющихся при работе катка физико-механических характеристик уплотняемой среды может послужить основой для выработки рекомендаций для оптимизации комплексного скоростно-частотного режима работы катка. Основой для этого выступают особенности поглощения грунтовой средой энергии вибрации с последующим неупругим деформированием, исследованные в предыдущих главах. Предлагаемый подход позволит в зависимости от массогабаритных характеристик заданного катка и доступных диапазонов изменения режимных параметров сделать выводы о требуемом на каждом этапе уплотнения скоростном режиме, при котором достигается наибольшая производительность процесса.

В качестве оптимизируемой целевой функции  $K(X, Y, \Omega)$  будем рассматривать векторную функцию (1.8) с условием, определяющем энергоэффективный режим уплотнения (1.9). Предполагается ее зависимость от параметров грунтовой среды (слоя)  $Y = [k_0, h_0, \rho_0, E, \eta]^T$ , эксплуатационных характеристик катка  $\Omega = [L, R, B]^T$  и режимных параметров его работы  $X = [P, F_0, f, v]^T$  – переменных задачи. Здесь приняты обозначения:

$L$ - ширина пятна контакта РО и поверхности грунта;

$R$ - радиус РО;

$B$  - длина пятна контакта РО и поверхности грунта;

$k_0$  - начальное значение коэффициента уплотнения

$h_0$  - толщина слоя ;

$\rho_0$  - начальная плотность среды;

$E$  - модуль деформации грунтовой среды (с учетом известной зависимости от напряжения и этапа процесса уплотнения);

$\eta$ - коэффициент динамической вязкости грунтовой среды (с учетом известной зависимости от напряжения и этапа процесса уплотнения);

$P$  - статическая часть нагрузки, приходящаяся на РО от его веса и веса рамы катка.

$F_0$  - амплитуда вынуждающей силы динамического воздействия;

$f$  - линейная частота периодического воздействия силы с гармонической зависимостью от времени;

$v$  - скорость поступательного движения катка.

Однако, учитывая, тот факт, что данные для решения оптимизационной задачи были получены в рамках моделирования в ходе численного эксперимента, подтвержденного в ходе эмпирической проверки, часть параметров задачи является избыточной. Этот факт стал следствием того, что, например зависимости от текущего коэффициента уплотнения (стадии процесса) для характеристик грунтового слоя, были учтены явно в ходе моделирования. В силу этого для решения оптимизационной задачи уместно добавить во множество режимных параметров дополнительные величины  $X = [P, F_0, f, v, k_0, h_0]^T$ , объединив величины, характеризующие параметры РО и среды в множество  $\Omega' = [L, R, B, \rho_0]^T$

Стандартным образом задача максимизации функционала, определяющего приращение коэффициента уплотнения, достигнутого за один проход катка, запишется в виде

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

Функционал  $\bar{K}(X', \Omega')$  представим в виде

$$\bar{K}(X', \Omega') = \bar{c}_1 P + \bar{c}_2 F_0 + \bar{c}_3 f + \bar{c}_4 k_0 + \bar{c}_5 h_0 + \bar{c}_6 v$$

Решение оптимизационной задачи осуществлялось встроенными инструментами библиотеки Optimization системы компьютерной алгебры MAPLE 2016.

В случае суглинистого грунта решение задачи порождает следующий вектор коэффициентов  $c$ .

$$\begin{array}{l} 6.70556368960468 \cdot 10^{-7} \\ 4.91010248901903 \cdot 10^{-7} \\ 0.000722020497803807 \\ -0.0153660322108346 \\ -0.0595505124450951 \\ -0.0182386530014641 \end{array}$$

Анализ значений коэффициентов и их смысла не представляет сложности – увеличение амплитуды силы воздействия вносят положительный вклад в приращение коэффициента уплотнения. В то же самое время, возрастание толщины слоя грунта, его начальной плотности и скорости поступательного движения катка приводит к уменьшению соответствующего приращения коэффициента уплотнения. Этот результат также подтверждает корректность подхода к моделированию процесса уплотнения грунтовой среды, использованного в работе.

В случае супесчаного грунта вектор коэффициентов линейной целевой функции приобретает следующее значение, отличное от найденного для суглинистых грунтов.

$$\begin{bmatrix} 2.43633305298570 \cdot 10^{-8} \\ 6.63179142136249 \cdot 10^{-7} \\ -0.000134205214465937 \\ -0.0745458368376788 \\ 0.0834259882253996 \\ 0.0128551303616485 \end{bmatrix}$$

Анализ компонент вектора параметров функционала  $K(X', \Omega')$  позволяет выявить отличия в поведении целевой функции для супесей и суглинков. Демонстрируя аналогичный характер зависимости для силовых характеристик воздействия, супесчаные грунты имеют обратную зависимость приращения коэффициента уплотнения от частоты приложения силы. Однако, это происходит в рамках выбранного для оптимизационной процедуры диапазона частот. Более тонкие исследования в рамках численного эксперимента показывают наличие максимума выбранной целевой функции в диапазоне частот, характерных для воздействия существующих катков (20-50 Гц).

Визуализация результатов проводилась в рамках средства Optimization Assistant системы компьютерной алгебры MAPLE 2016. Это позволяет наглядно представить экстремум оптимизируемой функции в трехмерном пространстве. Независимыми переменными при этом выступают пары величин, комбинация которых доставляет экстремум функционалу приращения коэффициента уплотнения.

Анализ результатов оптимизационного исследования позволило сделать рекомендации по подбору комбинированного скоростно-частотного режима работы вибрационных катков при уплотнении супесчаных и суглинистых грунтов для различных массово-габаритных характеристик вибрационных катков. Результаты приведены в таблицах 5.3 и 5.4 при этом оптимальные скорости катков и частоты воздействия определялись с учетом рекомендованных нормативными документами величин толщины уплотняемого грунтового слоя для массогабаритных характеристик вибрационных катков различных классов.

Таблица 5.3. – Параметры оптимальных скоростно-частотных режимов работы вибрационных катков при уплотнении суглинистых грунтов

Статическая нагрузка на вибрационный валец, кг	Этап уплотнения	Скорость катка $v$ , м/с	Частота приложения силы, $f$ , Гц
Легкие (3000-7000)	$0.85 \leq k_y \leq 0.9$	1.1-1.3	55-60
	$0.9 \leq k_y \leq 0.95$	1-1.2	45-55
	$0.95 \leq k_y \leq 1$	0.8-1.1	35-45
Средние (6000-10000)	$0.85 \leq k_y \leq 0.9$	1-1.2	45-52
	$0.9 \leq k_y \leq 0.95$	0.9-1.1	38-46
	$0.95 \leq k_y \leq 1$	0.8-1	28-38
Тяжелые (9000-12000)	$0.85 \leq k_y \leq 0.9$	1-1.2	38-45
	$0.9 \leq k_y \leq 0.95$	0.9-1.1	32-39
	$0.95 \leq k_y \leq 1$	0.7-1	27-33

Скорость поступательного движения катка, рекомендуемая для достижения оптимальной энергоэффективности при уплотнении суглинистых грунтов:

-для легких катков и рекомендуемых величин толщины слоя суглинистого грунта на начальном этапе уплотнения  $k_y = 0.85 - 0.9$ ,  $v_{opt} = 4.0 - 4.8$  км / ч ,  
 $f_{opt} = 55 - 60$  Гц на промежуточном  $k_y = 0.9 - 0.95$ ,  $v_{opt} = 3.5 - 4.3$  км / ч ,  
 $f_{opt} = 45 - 55$  Гц и на конечном  $k_y = 0.95 - 1.0$ ,  $v_{opt} = 2.8 - 3.8$  км / ч ,  
 $f_{opt} = 35 - 45$  Гц

-для средних катков и рекомендуемых величин толщины слоя суглинистого грунта на начальном этапе уплотнения  $k_y = 0.85 - 0.9$ ,  $v_{opt} = 3.6 - 4.2$  км / ч ,  
 $f_{opt} = 45 - 52$  Гц на промежуточном  $k_y = 0.9 - 0.95$ ,  $v_{opt} = 3.4 - 4.0$  км / ч ,



$f_{opt} = 38 - 46 \text{ Гц}$  и на конечном  $k_y = 0.95 - 1.0$ ,  $v_{opt} = 3.2 - 3.6 \text{ км / ч}$ ,

$f_{opt} = 32 - 38 \text{ Гц}$

-для тяжелых катков и рекомендуемых величин толщины слоя суглинистого грунта

на начальном этапе уплотнения  $k_y = 0.85 - 0.9$ ,  $v_{opt} = 3.6 - 4.2 \text{ км / ч}$ ,

$f_{opt} = 38 - 45 \text{ Гц}$  на промежуточном  $k_y = 0.9 - 0.95$ ,  $v_{opt} = 3.3 - 3.8 \text{ км / ч}$ ,

$f_{opt} = 32 - 39 \text{ Гц}$  и на конечном  $k_y = 0.95 - 1.0$ ,  $v_{opt} = 2.8 - 3.5 \text{ км / ч}$ ,

$f_{opt} = 27 - 33 \text{ Гц}$

Таблица 5.4. – Параметры оптимальных скоростно-частотных режимов работы вибрационных катков при уплотнении супесчаных грунтов

Статическая нагрузка на вибрационный валец, кг	Этап уплотнения	Скорость катка $v$ , м/с	Частота приложения силы $f$ , Гц
Легкие (3000-7000)	$0.85 \leq k_y \leq 0.9$	0.5-0.9	25-35
	$0.9 \leq k_y \leq 0.95$	1.1-1.5	30-40
	$0.95 \leq k_y \leq 1$	1.5-1.9	35-45
Средние (6000-10000)	$0.85 \leq k_y \leq 0.9$	0.7-1	18-24
	$0.9 \leq k_y \leq 0.95$	0.9-1.3	23-28
	$0.95 \leq k_y \leq 1$	1.3-1.7	30-35
Тяжелые (9000-12000)	$0.85 \leq k_y \leq 0.9$	0.5-0.7	15-23
	$0.9 \leq k_y \leq 0.95$	0.7-1.1	22-28
	$0.95 \leq k_y \leq 1$	1.1-1.5	26-32

Скорость поступательного движения катка, рекомендуемая для достижения оптимальной энергоэффективности при уплотнении супесчаных грунтов:

-для легких катков и рекомендуемых величин толщины слоя супесчаного грунта на

начальном этапе уплотнения  $k_y = 0.85 - 0.9$ ,  $v_{onm} = 2.5 - 3.5 \text{ км/ч}$ ,  $f_{onm} = 25 - 35 \text{ Гц}$

на промежуточном  $k_y = 0.9 - 0.95$ ,  $v_{onm} = 3.5 - 5 \text{ км/ч}$ ,  $f_{onm} = 30 - 40 \text{ Гц}$  и на

конечном  $k_y = 0.95 - 1.0$ ,  $v_{onm} = 4.5 - 6 \text{ км/ч}$ ,  $f_{onm} = 35 - 45 \text{ Гц}$

-для средних катков и рекомендуемых величин толщины слоя супесчаного грунта

на начальном этапе уплотнения  $k_y = 0.85 - 0.9$ ,  $v_{onm} = 2 - 3 \text{ км/ч}$ ,  $f_{onm} = 20 - 25 \text{ Гц}$

на промежуточном  $k_y = 0.9 - 0.95$ ,  $v_{onm} = 3 - 4.5 \text{ км/ч}$ ,  $f_{onm} = 25 - 30 \text{ Гц}$  и на

конечном  $k_y = 0.95 - 1.0$ ,  $v_{onm} = 4 - 5.5 \text{ км/ч}$ ,  $f_{onm} = 30 - 35 \text{ Гц}$

-для тяжелых катков и рекомендуемых величин толщины слоя супесчаного грунта

на начальном этапе уплотнения  $k_y = 0.85 - 0.9$ ,  $v_{onm} = 1.5 - 2.5 \text{ км/ч}$ ,

$f_{onm} = 15 - 23 \text{ Гц}$  на промежуточном  $k_y = 0.9 - 0.95$ ,  $v_{onm} = 2 - 4 \text{ км/ч}$ ,

$f_{onm} = 22 - 28 \text{ Гц}$  и на конечном  $k_y = 0.95 - 1.0$ ,  $v_{onm} = 3.5 - 5 \text{ км/ч}$ ,

$f_{onm} = 26 - 32 \text{ Гц}$

#### 5.4 Критерий оценки энергоэффективности деформирования упруговязкопластичных грунтовых сред уплотняющими машинами.

Работа катков различных типов, в том числе и вибрационных, по уплотнению грунтов, является циклическим процессом. Цикличность процесса проявляется двумя способами:

- 1) Динамическое воздействие рабочего органа, оказываемое на уплотняемый грунт, является периодическим процессом, так что движение массы активной области грунтового слоя носит периодический (квазипериодический) характер;
- 2) Проходы катка также могут трактоваться как циклы, количество которых до достижения требуемой плотности грунта определяет эффективность протекания процесса уплотнения.

Количество проходов и скорость катка являются определяющими величинами для описания технологического процесса уплотнения, при заданных параметрах

силового воздействия, конструктивно ограниченных типом используемой дорожной машины. Обозначим зависимость коэффициента уплотнения

$$k_y^{(n)} = F(v, k_y^{(n-1)}; \bar{X}) \quad (5.25)$$

на  $n$ -м проходе катка от скорости катка  $v$  и  $k_y^{(n-1)}$  - коэффициента уплотнения на предыдущем проходе. Здесь  $\bar{X}$  - вектор параметров, характеризующих динамическое воздействие и свойства грунта и определяемый для каждого конкретного режима уплотнения особо. При этом, свойства грунта как упруговязкопластичной среды при работе катка, зависят как от номера прохода (достигнутого коэффициента уплотнения), так и характеристик рабочего органа катка и режимных параметрах работы. В общем случае зависимость (5.22) может быть построена для любого режима уплотнения - от уплотнения статическим катком до вибротрамбования и трамбования.

Известны зависимости коэффициента уплотнения и модуля деформации грунта от количества проходов [149]. При постоянной скорости движения катка указанные характеристики экспоненциально убывают к некоторому значению насыщения и для дальнейшего повышения плотности грунта необходимо изменений значений режимных параметров. Эти зависимости отражены в существующих рекомендациях по практическому использованию катков различных типов [137].

Помимо требуемого коэффициента уплотнения, достижение которого является целью технологического процесса, в качестве величины, позволяющей оценить эффективность его протекания, выступает производительность катка. Традиционно используется формула для производительности, позволяющая вычислить объем проработанного грунта

$$P_3 = \frac{3600v h_{нач} (B - b)}{n} 0.75, \frac{м^3}{час}, \quad (5.26)$$

где 0.75 - коэффициент, учитывающий всевозможные потери рабочего времени,

$V$  - скорость движения катка, м/час,

$h$  - толщина грунтового слоя, м,

$B$  - ширина прорабатываемой области, м,

$b$  - ширина прорабатываемой области, м,

$n$  - число проходов катка. Производительность по смыслу показывает величину уплотненного до требуемой плотности объема грунтовой среды в единицу времени.

Однако возникают ситуации, когда пользоваться этой формулой для оценки эффективности работы катка нерационально, например, в том случае, если эксплуатационные характеристики используемого катка не позволяют уплотнить заданный грунт до требуемой плотности, а также в том случае, если скорость катка при работе изменяется от прохода к проходу. В таком случае более уместно использовать модифицированное выражение для производительности, учитывающее конструктивные ограничения возможностей используемой модели катка, не допускающие уплотнения до требуемой плотности, а также, возможные изменения скорости. Вместо формулы (5.26) предлагается использовать оригинальную формулу для **приведенной производительности** (к приращению коэффициента уплотнения), для одного прохода катка имеющую вид:

$$P_{\text{прив}} = 3600Vh_{\text{нач}} \alpha (B - b) \frac{k_{\text{укоп}} - k_{\text{унач}}}{1 - k_{\text{унач}}}, \quad (5.27)$$

$k_{\text{укоп}}$  - конечное значение коэффициента уплотнения после прохода катка;

$k_{\text{унач}}$  - начальное значение коэффициента уплотнения после до прохода катка;

$V$  - скорость поступательного движения катка, м/с;

$B$  - ширина прорабатываемой области, м,

$b$  - ширина прорабатываемой области, м,

$\alpha$  - коэффициент, учитывающий всевозможные потери рабочего времени.

Смыслом этого выражения для заданного катка и комплекса режимных параметров его работы является производительность с учетом достигнутого за проход коэффициента уплотнения. В том случае (идеальном), если грунт уплотняется до номинальной плотности за один проход, формула (5.27) переходит в формулу (5.26) для  $n=1$ , если скорость катка измерять в км/ч. предлагаемая

величина легко обобщается на случай произвольного числа проходов, осуществляемых с различными скоростями

$$P_{зприв} = 3600 \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_i} \right)^{-1} h_{нач} \alpha(B-b) \frac{k_{укон} - k_{унач}}{1 - k_{унач}} \quad (5.28)$$

$k_{укон}$  - конечное значение коэффициента уплотнения после прохода катка

$k_{унач}$  - начальное значение коэффициента уплотнения до n-го прохода катка

$V_i$  - скорость катка на i-м проходе, м/с.

Работа одного катка с заданными параметрами по уплотнению грунта до требуемой плотности за конечное число проходов  $n$  соответствует переходу к формуле (5.26). За скорость  $V$  может быть принята средняя скорость движения катка, фигурирующая в выражении (5.28).

С незначительными изменениями предложенная величина может быть использована для сравнительной оценки производительности катков, использование которых не допускает уплотнения грунтового слоя до состояния  $k_{уном} = 1$ . Если использование катка позволяет уплотнить заданный слой до плотности, соответствующей коэффициенту уплотнения  $k_{уном}$ , то

$$P_{зприв} = 3600 \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_i} \right)^{-1} h_{нач} \alpha(B-b) \frac{k_{укон} - k_{унач}}{k_{уном} - k_{унач}} \quad (5.29)$$

Указанный критерий, однако, не позволяет оценить энергозатраты для заданного режима уплотнения, в случае работы машин, затрачивающих для уплотнения различную мощность. Тогда формулы (5.27)-(5.29) модифицируются следующим образом:

$$P_{зприв}^{мощн} = \frac{3600 W h_{нач} \alpha(B-b) k_{укон} - k_{унач}}{W} \frac{M^3}{1 - k_{унач}}, \text{ кДж} \quad (5.30),$$

где  $W$  - средняя за проход мощность. Выражение (5.30) по смыслу представляет объем грунтового слоя, уплотняемого на единицу затраченной энергии. Соответственно, если производилось несколько проходов, за которые был

достигнут коэффициент уплотнения  $k_{укоп}$  при возможности уплотнения заданным катком до номинальной плотности, то

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

Преимущество предлагаемого критерия производительности катка относительно существующих, например, (5.26) выражается в возможности сравнения работы катков, способных уплотнить грунтовый слой из заданного состояния до требуемой плотности и катков, чьи эксплуатационные характеристики не позволяют достичь ее. Кроме этого, приведенная производительность позволяет сравнивать различные скоростные режимы уплотнения для одного и того же катка, а также режимы, отличающиеся характером динамического поверхностного воздействия на грунтовый слой.

Ниже в таблицах приведено сравнение производительности (5.26) и приведенной производительности (5.28) по возможности одновременной оценки эффективности протекания процесса уплотнения грунтовых работ катков по уплотнению грунтовых сред (с допустимостью обобщения на материалы, рассматриваемые как упруго-вязко-пластичные среды). Для рассмотрения производительности ниже принимается условие возможности ее применения (грунт уплотнен из заданного начального состояния до требуемой плотности).

Приведенный подход к расчету производительности обусловлен новыми техническими решениями, полученными в результате исследований. Поскольку разработанные новые конструкции катков и уплотняющего оборудования способны обеспечить достижение заданной плотности грунтов земляного полотна за меньшее количество проходов, по сравнению с существующими, но и, при определенных условиях, к уплотнению грунта до нормативных значений плотности одной машиной.

Таблица 5.5 – Производительность и приведенная производительность как, как показатель оценки эффективности работы уплотняющих машин

	Возможность оценить производительность при уплотнении до требуемой плотности	Возможность оценить производительность при уплотнении до произвольной плотности	Возможность оценить производительность при постоянной скорости катка	Возможность оценить производительность при переменной скорости катка	Возможность оценить производительность при постоянном режиме силового воздействия на среду	Возможность оценить производительность при различном режиме силового воздействия на среду
Возможность оценить производительность при уплотнении до требуемой плотности	x	0	+(+)	-(+)	+(+)	+(+)
Возможность оценить производительность при уплотнении до произвольной плотности	0	x	-(+)	-(+)	-(+)	-(+)
Возможность оценить производительность при постоянной скорости катка	+(+)	-(+)	x	0	-(+)	-(+)
Возможность оценить производительность при переменной скорости катка	-(+)	-(+)	0	x	-(+)	-(+)
Возможность оценить производительность при постоянном режиме силового воздействия на среду	+(+)	-(+)	-(+)	-(+)	x	0
Возможность оценить производительность при различном режиме силового воздействия на среду	+(+)	-(+)	-(+)	-(+)	0	x

Обозначения в таблицах 5.5 (в скобках приведены значения для показателя приведенной производительности):

+ - имеется возможность оценить производительность при заданных условиях;

0 – невозможна оценка производительности при одновременном выполнении условий;

x - оценка производительности не проводится.

Введение новых оригинальных величин - приведенной производительности и приведенной обратной энергоемкости обосновано необходимостью привлечения дополнительных характеристик для более глубокой оценки эффективности работы уплотняющей техники при исследовании энергоэффективности технологических

процессов. Приведенная производительность является интегральной характеристикой, неявно выявляющей, насколько эффективно заданный тип поверхностного силового воздействия, реализованный режимом работы уплотняющей машины, обеспечивает накопление слоев грунтовой среды неупругой деформации.

Результаты проведенных исследований позволили сделать выводы о количественных закономерностях, характеризующих энергоэффективные режимы работы вибрационных гладковальцовых катков. Анализ полученных графических зависимостей величин, характеризующих накопление необратимой деформации уплотняемым слоем за один проход катка, показывает, их определяют следующие приближенные закономерности (коэффициент корреляции  $R > 0.99$ ):

- 1) При фиксированном значении начального коэффициента уплотнения  $k_0$  приращение коэффициента уплотнения нелинейно убывает по закону  $\Delta k_y(v) = f_{1k}(k_0)(v^{-(\alpha_{1k} + \alpha_{2k}(1-k_0))})$  для супесчаных и по закону  $\Delta k_y(v) = f_{2k}(k_0)(\beta_{1k} - \beta_{2k} \ln(v))$  для суглинистых грунтов при постоянных режимных параметрах работы катка;
- 2) При фиксированной скорости катка приращение коэффициента уплотнения нелинейно убывает для супесчаных  $\Delta k_y(k_0) = F_{1k}(v)(k_0^3 + a_2 k_0^2 + a_1 k_0 + a_0)$  и по закону  $\Delta k_y(k_0) = F_{2k}(v)(\gamma_1 e^{-k_0(0.5 - \gamma_2 v)})$  для суглинистых при постоянных режимных параметрах работы катка;
- 3) При фиксированном значении начального коэффициента уплотнения  $k_0$  переданная грунту энергия неупругого деформирования нелинейно убывает по закону  $\Delta W(v) = f_{1w}(k_0)(v^{-(\beta_{1w} + \beta_{2w}(1-k_0))})$  для супесчаных и  $\Delta W(v) = f_{2w}(k_0)(\beta_{1w} - \beta_{2w} \ln(v))$  при постоянных режимных параметрах работы катка;
- 4) При фиксированной скорости катка переданная грунту энергия неупругого деформирования нелинейно убывает по закону  $\Delta W(k_0) = f_{2w}(v)(k_0^4 + a_{3w} k_0^3 + a_{2w} k_0^2 + a_{1w} k_0 + a_{0w})$  для супесчаных и по



закону  $\Delta W(k_0) = f_{2w}(v)(\gamma_{1w} e^{-k_0(0.5-\gamma_{2w}v)})$  для суглинистых грунтов при постоянных режимных параметрах работы катка.

Различие в характере зависимостей величин, характеризующих эффективность накопления неупругих деформаций грунтом при уплотнении, для супесчаных и суглинистых грунтов имеет причиной различие исходных зависимостей деформативных свойств грунтов от текущей плотности.

### 5.5 Выводы по Главе 5.

Повышение эффективности работы дорожных катков для уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве, рассматриваемого с точки зрения энергетического подхода, требует использования дополнительных критериев для оценки интенсивности работы катков и подбора режимных параметров для обеспечения ее энергоэффективности.

Исследования различных аспектов повышения энергоэффективности работы дорожных катков привели к выработке новых оригинальных критериев оценки его протекания и рекомендаций по совершенствованию существующих технологий использования вибрационных уплотняющих машин.

1. Исходя из новых полученных в работе научных знаний в виде закономерностей взаимодействия РО с уплотняемым объемом при уплотнении грунтовых сред предложен динамический критерий эффективности уплотнения – полное сопротивление деформированию (механический импеданс) активной области грунтового слоя.

2. На основании предложенного критерия определены данные для методики подбора параметров силового воздействия для уплотнения грунтовых сред вибрационными катками с жесткими рабочими органами для катков массой  $m=3-18$  т, частот воздействия 15-75 Гц, амплитуды силового воздействия 1.5-75 кН и диаметра рабочего органа 0.5-1.6 м.

3. На основании результатов теоретических исследований, подтверждённых

опытными данными, выявлены новые закономерности передачи энергии уплотнителя уплотняемому материалу и определены ее характеристики для различных условий работы катка, допускающие использования для определения энергоэффективных режимов работы катка.

4. Выявлен набор критериев для построения оптимизационной схемы обоснования выбора энергоэффективных режимов работы вибрационных катков при уплотнении супесчаного и суглинистого грунтов, включающий величину пластической деформации за проход, достигнутый коэффициент уплотнения, полная энергия неупругого деформирования слоя и мощность, затрачиваемая на неупругое уплотнение среды.

5. Установлены новые зависимости скорости поступательного движения катка и частоты вибрации, обеспечивающей наиболее энергоэффективный режим уплотнения от частоты вибрационного воздействия и параметров грунтового слоя для супесчаного при толщине слоя (20-80 см) и суглинистого при толщине слоя (15-60 см) грунтов и частотах воздействия 15-75 Гц.

6. На основе результатов исследований определены данные для реализации методики выбора скоростного режима катка, учитывающей текущее состояние грунтовой среды при начальных коэффициентах уплотнения от 0.8 до 0.98.

7. Предложены и обоснованы новые величины, характеризующие эффективность работы катка, позволяющие сравнивать режимы работы различных катков – приведенная производительность и приведенная обратная энергоемкость.

## ГЛАВА 6. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в области повышения энергоэффективности работы дорожных катков для уплотнения грунтовых сред указал ряд возможностей для интенсификации процесса уплотнения. Предложенный подход по выбору режимов работы, обеспечивающих наиболее эффективное накопление грунтом пластических деформаций, позволяет решить эту задачу.

Как отечественные, так и зарубежные специалисты видят разрешение основной задачи повышения эффективности уплотнения в совершенствовании и автоматизации процессов управления доступными параметрами режима работы катка – как скоростного режима, так и совокупности параметров режима силового воздействия. В этой области были достигнуты существенные результаты за счет использования средств контроля и регулирования уплотнения грунтовых сред, реализованные в технологии «Intelligent Soil Compaction» и ее аналогах на основе большого массива экспериментальных данных [78, 79, 81, 159, 208].

Рассмотрение этой задачи с точки зрения оптимизации передачи энергии уплотнителя грунтовой среде таким образом, чтобы доля энергии, идущая на пластическое деформирование среды, была максимальной, приводит к решению проблемы обеспечения энергоэффективности работы катка при уплотнении грунтовых сред. Это обеспечивается комплексом оптимальных или рациональных параметров работы катка. Выявление особенностей энергоэффективной работы катка связано с определением характера распределения напряжений в слое грунтовой среды [1], моделированием процесса взаимодействия [62], экспериментальными исследованиями в области методик измерения и контроля параметров слоя, определяющих эффективность использования дорожно-строительной техники [191].

Дальнейшее развитие построенного в работе теоретического подхода к интенсификации процесса уплотнения грунтовых сред дорожными катками дает возможность разработки новых конструкций узлов и агрегатов дорожных машин,

способных реализовать энергоэффективные режимы работы по уплотнению грунтов. К ним относятся рабочие органы катков и средства генерирования периодической силы (вибровозбудители). Перспективные конструкции этих устройств при проектировании требуют учета результатов анализа потерь мощности уплотняющей машины при эксплуатации и выявленных в ходе экспериментальных исследований особенностей передачи энергии уплотнителя слою грунтовой среды.

Было установлено, что для обеспечения энергоэффективности работы катков необходимо максимально увеличить долю энергии, идущую на пластическое деформирование при минимальном сопротивлении процессу уплотнения со стороны грунта. Это привело к разработке новых технических и конструктивных решений для уплотняющих машин и оборудования, в первую очередь, отвечающих за реализацию динамических режимов поверхностного воздействия на слой уплотняемой среды и передачу среде энергии уплотнителя.

Результатами исследований стали представленные ниже новые технические решения, защищенных патентами РФ.

## 6.1. Энергоэффективные конструкции вибрационных катков и рабочих органов.

### 6.1.1 Самоходный вибрационный каток, оснащенный дополнительным вальцом

Недостатком широко используемых для уплотнения дорожно-строительных материалов вибрационных катков является, то, что в процессе вибрирования энергия вибровозбудителя затрачивается на полезную работу уплотнения материала только в том полупериоде колебаний, когда валец под действием вибровозбудителя преодолевает силу сопротивления неупруго деформируемого грунта [89]. Во второй половине периода колеблющийся вибрационный валец перемещается вместе с поверхностью грунта вверх и не производит полезной

работы уплотнения. Таким образом, более половины энергии, затрачиваемой на возбуждение вибрации, тратится вхолостую, что повышает энергозатраты и снижает долю полезной работы катка. Частично эта энергия компенсируется при переходе в режим вибротрамбования и расходуется на приобретение вальцом дополнительной потенциальной энергии, однако при вибрационном уплотнении такого не происходит и можно считать, что половина энергии, затраченной на колебательное движение вальца, расходуется без перевода в полезную работу [89].

С точки зрения увеличения доли энергии, затрачиваемой катком на пластическое деформирование грунта, необходимо уменьшение «холостой» составляющей части работы по движению вальцов от поверхности грунтового слоя. Этот принцип реализован в следующей конструкции. В рамках исследования была разработана и запатентована перспективная конструкции катка с рабочим органом специального вида (патент РФ 2572478), изображенная на Рис. 6.1. Целью устройства является повышение энергоэффективности вибрационного уплотнения дорожно-строительных материалов.

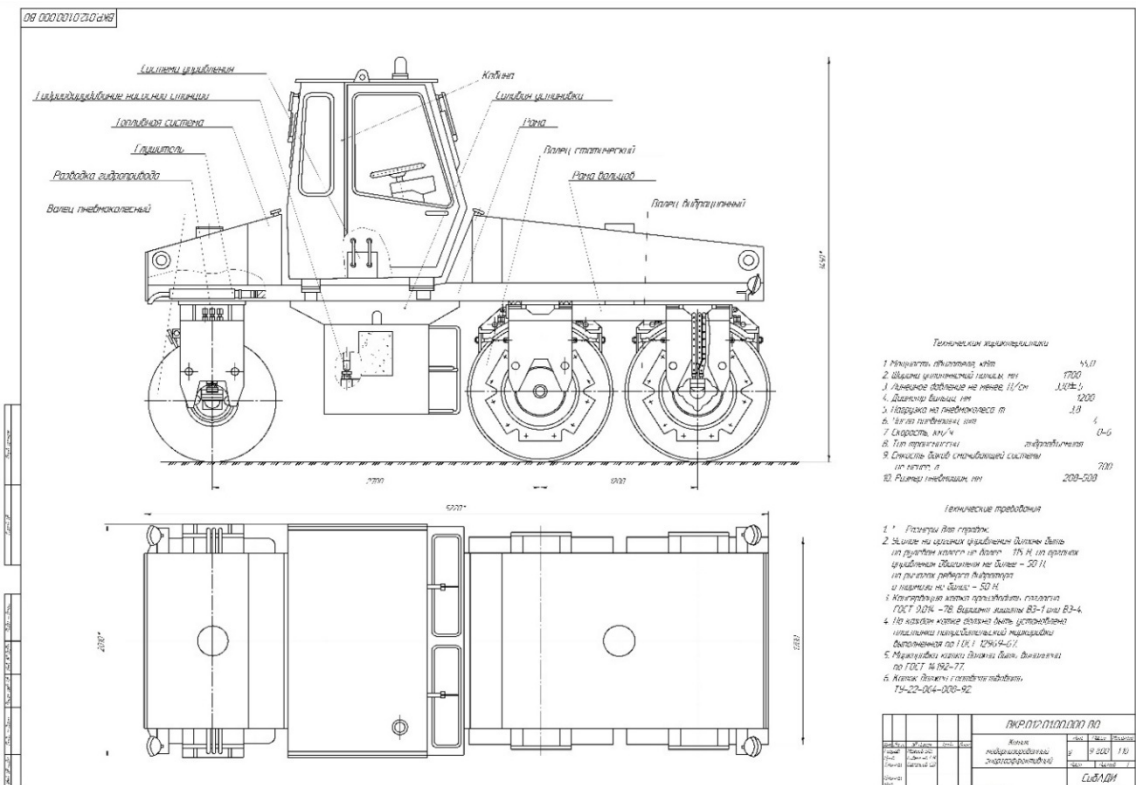


Рисунок 6.1. – Самоходный вибрационный каток с компенсирующим вальцом Патент РФ 2572478.

Самоходный вибрационный каток, содержит раму, и рабочий орган, состоящий из двух валцов – вибрационного и дополнительного статического вальца, шарнирно связанного с вибрационным при помощи двуплечего рычага через опорно-поворотное устройство (Рис. 6.2).

Рабочий режим катка осуществляется следующим образом. Вибрационный валец совершает колебания под воздействием вибровозбудителя. При этом рама катка остается практически неподвижной, так что относительно нее вибрационный валец также осуществляет колебательное движение. В процессе уплотнения на том полупериоде колебаний, в течение которого движение вибрационного вальца происходит вверх, посредством двуплечего рычага, через опорно-поворотный узел, усилие передается вспомогательному статическому вальцу, который движется вниз и осуществляет воздействие на уплотняемый грунт [89].

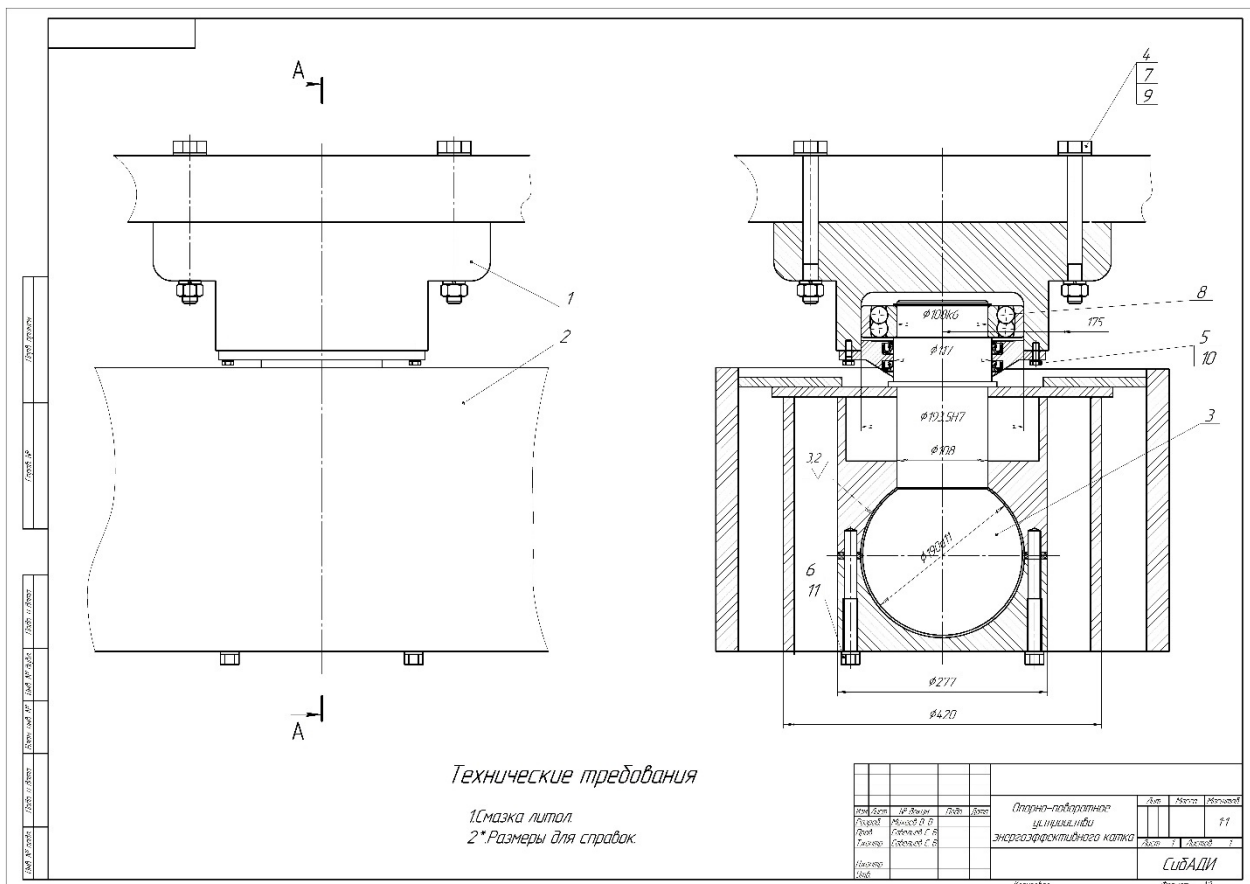


Рисунок 6.2 – Опорно-поворотное устройство комбинированного рабочего органа энергоэффективного катка

Учитывая типичные скорости движения реальных катков (2-7 км/ч) и частоты динамического воздействия (20-100 Гц), можно сделать вывод об эффективности воздействия вспомогательного статического вальца на уплотняемый грунт. За время одного прохода катка уплотняемый грунт не успевает накопить достаточную неупругую деформацию для того, чтобы значительно изменить свои механические свойства. Для силы и частоты воздействия вспомогательного вальца на грунт выполняются (приближенно) следующие условия

$$\omega_{\text{вспом}} = \omega_{\text{вибр}}, F_{\text{вспом}} = F_{\text{вибр}} \frac{l_{\text{вибр}}}{l_{\text{вспом}}} \quad (6.1)$$

где  $l_{\text{вибр}}$ ,  $l_{\text{вспом}}$  - плечи рычага б,  $\omega_{\text{вспом}}$ ,  $\omega_{\text{вибр}}$  - частоты вибрации вспомогательного статического и основного вибрационного вальца. При этом длина плеч рычага и масса вспомогательного вальца подбираются из условия на контактные напряжения, требуемые для уплотнения грунта:

$$\sigma_{\text{тек}} \leq \sigma_{\text{вспом}} < \sigma_{\text{проч}} \quad (6.2)$$

где  $\sigma_{\text{тек}}$  - предел текучести грунта,  $\sigma_{\text{вспом}}$  - текущее значение контактного давления для вспомогательного статического вальца,  $\sigma_{\text{проч}}$  - предел прочности грунта.  $\sigma_{\text{вспом}}$  может быть оценено по геометрическим параметрам вспомогательного вальца [89].

Наличие дополнительного вспомогательного вальца, соединённого с основным вибрационным вальцом посредством двухплечевого рычага на шарнире приводит к тому, что энергия вибровозбудителя основного вальца на полупериоде его «холостого хода», передаётся вспомогательному вальцу, и процесс уплотнения материала происходит с максимальной энергоэффективностью.

Оценка эффективности передачи энергии от вибрационного вальца вспомогательному чрез коромысла может быть сделана исходя из схемы устройства. Масса рамы катка, с учетом пригруза, значительно превышает массу движущегося вальца, однако не может считаться бесконечной. Следовательно, часть импульса обратного хода колебательного движения вальца получит рама.

Часть энергии может быть затрачена на деформирование коромысла и трение в шарнирном узле, посредством которого сопрягаются вальцы. Исходя из этих соображений, можно провести оценку передаваемой компенсирующему вальцу энергии

$$\Delta E_{comp} = (0.5 - 0.7) \frac{m\omega^2 A^2}{2}, \quad (6.3)$$

где  $m$  - масса вибрационного вальца,  $A$  - амплитуда его колебаний,  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота периодической силы.

Рекомендации по использованию катка с перспективной конструкцией рабочего органа для уплотнения грунтовых сред можно сделать, основываясь на том, что при его работе время пребывания уплотняемой среды под нагрузкой увеличивается. Тем самым возрастает достигнутый за один проход катка коэффициент уплотнения. Известно, что зависимость коэффициента уплотнения от количества проходов катка имеет характер, близкий к экспоненциальному [155], что подтверждается как теоретическими, так и экспериментальными исследованиями

$$k_y(n) = k_0 - \alpha \exp(-\beta n). \quad (6.4)$$

Таким образом, за один проход, стартуя на грунте с коэффициентом уплотнения  $k$ , каток при работе создаст приращение коэффициента уплотнения равное

$$\Delta k_y = (k_0 - k)(1 - \exp(-\beta))$$

При подключении второго компенсирующего вальца экспоненциальная зависимость накопленного коэффициента уплотнения от количества проходов по одному следу сохраняется, однако скорость возрастания коэффициента уплотнения с количеством проходов увеличивается. Это приводит, наряду с повышением энергоэффективности, к интенсификации процесса уплотнения. Повышение интенсивности выражается в уменьшении числа проходов, требуемых для достижения заданного коэффициента уплотнения, что приводит к повышению производительности катка. Оценка изменения требуемого для достижения нормативной плотности числа проходов и сопутствующие рекомендации для



выбора режима работы катка можно сделать исходя из следующих соображений. Если при использовании основного вальца без использования вспомогательного коэффициент уплотнения изменяется по закону

$$k_{y1}(n) = k_0 - \alpha_1 \exp(-\beta_1 n), \quad (6.5)$$

а для вспомогательного, используемого индивидуально

$$k_{y2}(n) = k_0 - \alpha_2 \exp(-\beta_2 n), \quad (6.6)$$

то при их совместной работе, предполагаемой энергоэффективным режимом уплотнения, он достигнет

$$k_{y12}(n) = k_0 - \alpha_1 \exp(-(\beta_1 + \beta_2)n).$$

Таким образом, при количестве проходов  $n_1$ , необходимых для уплотнения слоя одним основным вальцом до коэффициента уплотнения  $k_{треб}$ , понадобится

$$n_{12} = \left[ \frac{n_1 \beta_1}{\beta_1 + \beta_2} \right] + 1$$

проход катка в энергоэффективном режиме работы с использованием дополнительного вальца. Например, при требуемом количестве проходов  $n_1 = 8$  и соотношении  $\beta_2 = 0.4\beta_1$ , количество проходов в энергоэффективном режиме снижается до  $n_{12} = 6$ .

Предложенная конструкция вибрационного катка позволяет повысить интенсивность уплотняющего воздействия на грунтовую среду за счет нагружения дополнительным (компенсирующим) вальцом, что приведет к увеличению времени нахождения уплотняющей среды в напряженно-деформируемом состоянии. Дополнительно с этим конструкция катка допускает более эффективное использование мощности, затрачиваемой на возбуждение гармонической силы в вибрационном вальце за счет компенсации полупериода «обратного хода» вращения дебаланса.

### 6.1.2 Особенности работы энергоэффективного катка при уплотнении грунтовых сред

Дорожный каток при взаимодействии с уплотняемым грунтом в рамках подхода, предлагаемого в работе – сложная механическая система, характеристики которой определяются особенностями эксплуатации, а также параметрами рабочих режимов катка. Рабочие органы катка взаимодействуют как с грунтом, так и с рамой катка и, посредством ее, друг с другом, что не может не приниматься во внимание при выявлении особенностей энергопередачи, ведущей к уплотнению. Кроме этого, последовательное воздействие рабочих органов катка на уплотняемый грунт требует учета вариации характеристик грунта при изменении его состояния, а также учета взаимодействия рабочих органов. Поэтому для выявления оптимальных характеристик предложенной энергоэффективной конструкции катка требуется более детальный анализ динамики его работы.

Конструктивные особенности, характеристики режимных параметров, а также физико-механические параметры типов катков и их рабочих органов, влияющие на моделирование их взаимодействия с грунтом определяются типом уплотняемого грунта и параметрами слоя, для проработки которого предполагается использования заданного катка.

К ним относятся массогабаритные параметры катков – физические размеры и общая масса катка, а также доли массы катка, приходящиеся на оси вальца или вальцов сложного рабочего органа. Определение этого проводится с учетом размеров и массы рамы катка, служащей основанием для установки двигателя, приводов, кабины оператора, устройств управления, виброзащиты и приводит к необходимости рассмотрения неоднородного распределения общей массы катка по его осям и, как следствие неоднородности статической нагрузки на грунт.

Характер типа воздействия катка на грунт – статический или динамический - со стороны вальца/вальцов выступает при моделировании катка и взаимодействия его с грунтовой средой определяет вид вынуждающей силы при построении уравнений движения системы «каток-рабочий орган-грунт».

В зависимости от количества вальцов и их характеристик различают одновальцовые, двухвальцовые и многовальцовые катки. При этом некоторые

вальцы могут быть ведущими, обеспечивая поступательное движение катка. Вальцы катков, обеспечивающих динамические режимы уплотнения, являющиеся вибрационными, оснащаются генераторами периодической силы воздействия (вибровозбудителями) в отличие от вальцов статических катков или статические вальцов комбинированных катков.

Вид вальцов и их массогабаритные характеристики выступают в качестве основных особенностей динамической схемы «каток – уплотняемый грунт». Описание гладких недеформируемых вальцов как статических, так и вибрационных катков и включение их в динамическую схему сводится к введению дополнительных массивных элементов. Допущение о деформируемости вальцов (в случае пневмошинных, гидрошинных и более сложных рабочих органов), а также неоднородности поверхности вальцов (кулачковые, решетчатые и иные неоднородные рабочие органы) могут сделать систему уравнений движения неоднородной.

Разработка перспективных рабочих органов катков, в первую очередь, реализующих более широкий спектр воздействий одним катком [88], а также обеспечивающие энергоэффективные режимы воздействия, предусматривает использование комбинаций различных вальцов [89]. Связь вибрационных вальцов друг с другом или со статическими вальцами может реализовываться опосредованно, через раму катка или непосредственно, с помощью специальных узлов – балок и рычагов. В первом случае, воздействие вальцов друг на друга и на уплотняемый грунт является сложно контролируемым и имеет паразитный характер. Возникающие при этом силы необходимо рассматривать при проектировании устройств вибрационной защиты при воздействии вибрационных вальцов на узлы и агрегаты катков и рабочее место оператора. В случае принудительной связи между вальцами воздействие их друг на друга носит контролируемый характер, его особенности могут быть проанализированы, а взаимное воздействие использовано для интенсификации процесса уплотнения, в том числе и для уменьшения энергоемкости процесса.

Динамическая схема катка должна учитывать характер связи вальцов катка с его рамой. В случае использования специальных элементов и устройств подвески их упругие и вязкие свойства должны быть рассмотрены в комплексе с упругими и вязкими свойствами вальца.

Построение динамической модели катка должно вестись с учетом описанных выше факторов и их взаимодействия. Принимая во внимание отсутствие пластических деформаций (износа) элементов катка, подверженных силовым воздействиям, и неизменность их формы и размеров при наличии упругих и вязких свойств, моделирование может вестись в рамках Лагранжева формализма классической механики. Все элементы схемы катка представляются линейными, обладающими упругими и вязкими свойствами взаимодействующими массивными телами, рассматриваемые в рамках подхода сосредоточенных параметров. Это делает единой форму рассмотрения деформирования активной области грунта и движение рабочего органа катка.

В силу этого, включение сил взаимодействия узлов катка во внешнюю периодическую силу воздействия вальца на грунт не вызывает трудностей. Моделирование процесса деформирования активной области тем самым должно проводится с учетом:

- 1) Взаимодействия узлов катка между собой;
- 2) Взаимодействия различных участков уплотняемого слоя посредством воздействия реакциями на рабочие органы катка;

Вопрос выявления энергоэффективных режимов уплотнения грунтов катками с комбинированными рабочими органами требует отдельного исследования. Компенсирующий комбинированный рабочий орган, описанный выше, сочетает в себе возможность более эффективного использования энергии колебаний вибрационного вальца с дополнительным воздействием на грунт с частотой, соответствующей минимальному сопротивлению среды деформированию.

Комбинированный рабочий орган (Рис.6.1) состоит из двух вальцов – основного (вибрационного) и компенсирующего (статического), закрепленных установленных на концах балки – рычага, закрепленного с возможностью вращения на раме катка посредством опрно-поворотного устройства (Рис. 6.2).

Дальнейшее моделирование движения системы проводится в приближении малости вертикальных смещений тел системы, по отношению к радиусам их вращения.

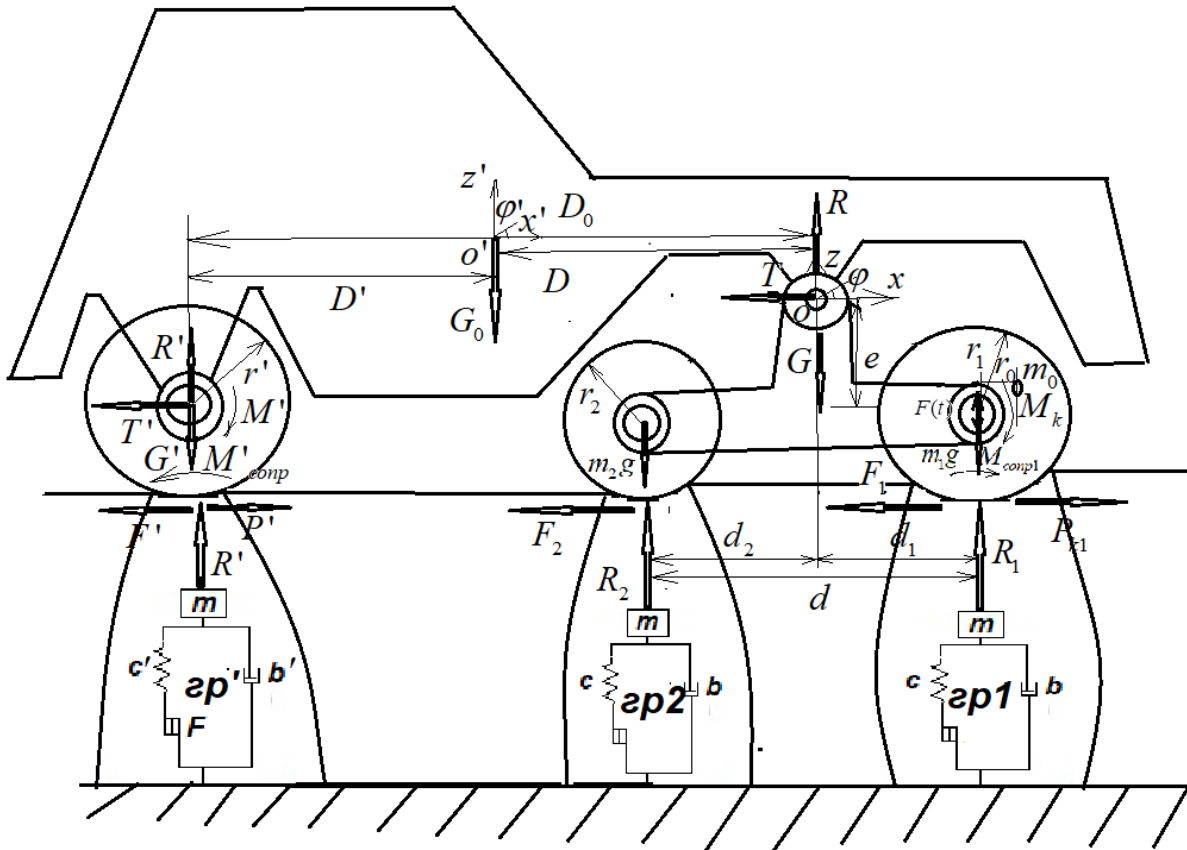


Рисунок 6.3. – Самоходный вибрационный каток с компенсирующим валццом

$M_k$  - 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;

$M'_{\text{сопр}} = \alpha r' R'_{\text{сп}}$  - момент сил сопротивления на ведущем вальце;

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

Уравнения движения системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\text{РО}} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = (m_1 g - R_1(m_{\text{сп1}}, b_{\text{сп1}}, m_{\text{сп1}}, \ddot{z}_{\text{сп1}}, \dot{z}_{\text{сп1}}, z_{\text{сп1}}) + F(t))d_1 + \\ + (R_2(m_{\text{сп2}}, b_{\text{сп2}}, m_{\text{сп2}}, \ddot{z}_{\text{сп2}}, \dot{z}_{\text{сп2}}, z_{\text{сп2}}) - m_2 g)d_2, \\ M_{\text{РО}} \frac{d^2 z}{dt^2} = -G + R_1(m_{\text{сп1}}, b_{\text{сп1}}, m_{\text{сп1}}, \ddot{z}_{\text{сп1}}, \dot{z}_{\text{сп1}}, z_{\text{сп1}}) + \\ + R_2(m_{\text{сп2}}, b_{\text{сп2}}, m_{\text{сп2}}, \ddot{z}_{\text{сп2}}, \dot{z}_{\text{сп2}}, z_{\text{сп2}}) - m_1 g - m_2 g + F(t), \\ M_{\text{рама}} \frac{d^2 z'}{dt^2} = -G_0 + R'(m'_{\text{сп}}, b'_{\text{сп}}, m'_{\text{сп}}, \ddot{z}'_{\text{сп}}, \dot{z}'_{\text{сп}}, z'_{\text{сп}}) + R - m' g, \\ J_{\text{рама}} \frac{d^2 \varphi'}{dt^2} = -R'(m'_{\text{сп2}}, b'_{\text{сп2}}, m'_{\text{сп2}}, \ddot{z}'_{\text{сп2}}, \dot{z}'_{\text{сп2}}, z'_{\text{сп2}})D' + RD + m' gD'. \end{array} \right.$$

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

Зависимости, характеризующие использование катка с инновационным рабочим органом приведены на графиках ниже. Рисунки 6.4-6.5 иллюстрируют зависимости приращение коэффициента уплотнения при работе среднего катка (12-18 т), оснащенного новым рабочим органом, при уплотнении супесчаного грунта рекомендованной толщины (30-40 см) для различных исходных

коэффициентов уплотнения. Исследование позволило выявить зависимости, определяющие интенсивность накопления пластических деформаций грунтом при работе катка с новым рабочим органом. Варьирование параметров рабочего органа, величины статической силы и амплитуды силового воздействия при расчетах послужило для построения расчетной схемы, определяющие характеристики рабочего органа, обеспечивающие максимальную производительность. Соответствующие зависимости приведены на Рисунках 6.4-6.7.

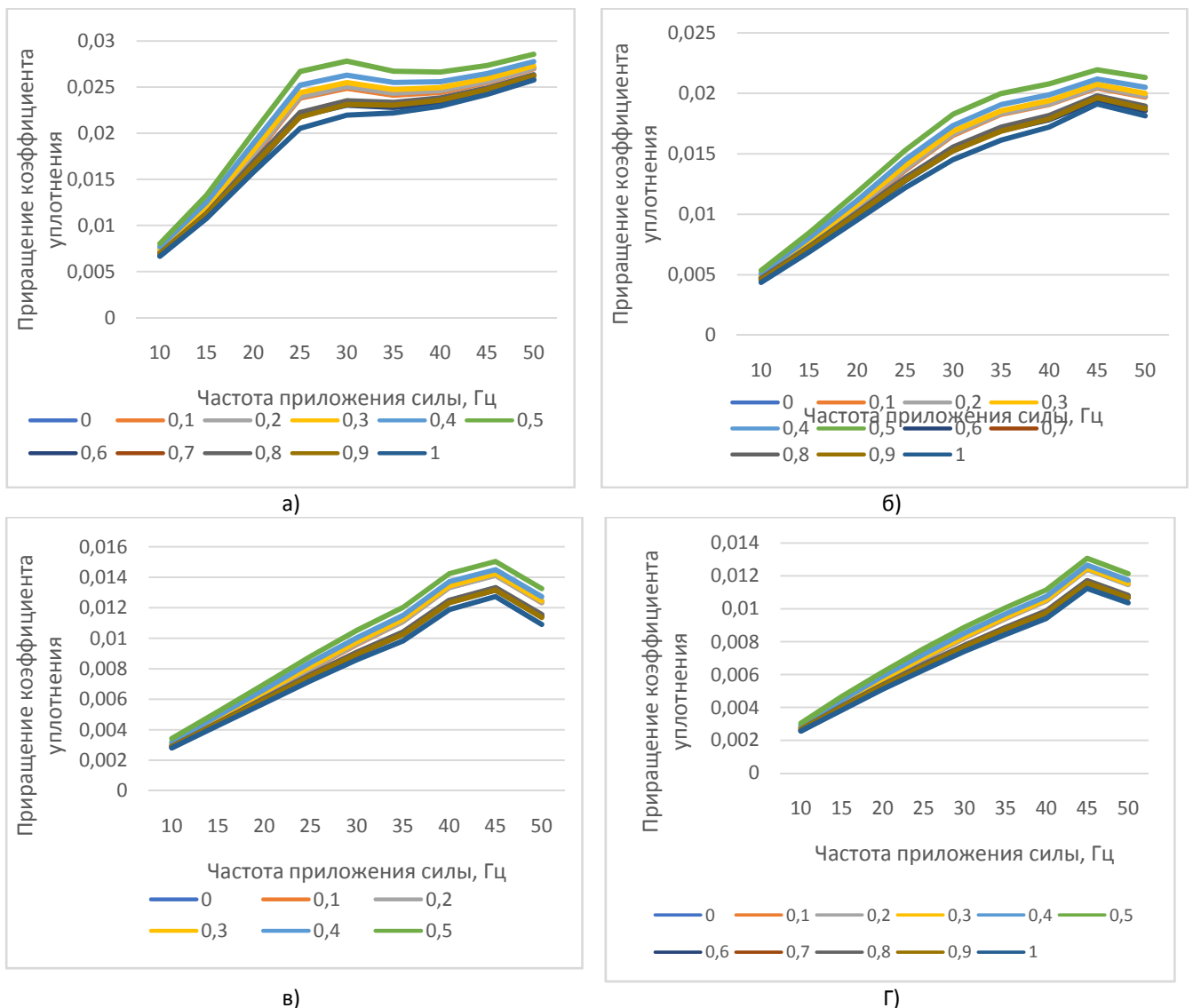


Рисунок 6.4 – Зависимость приращения коэффициента уплотнения от частоты воздействия вибрационного вальца за один проход катка а)  $k_y = 0.85$ , б)  $k_y = 0.90$ , в)  $k_y = 0.95$ , г)  $k_y = 0.95$

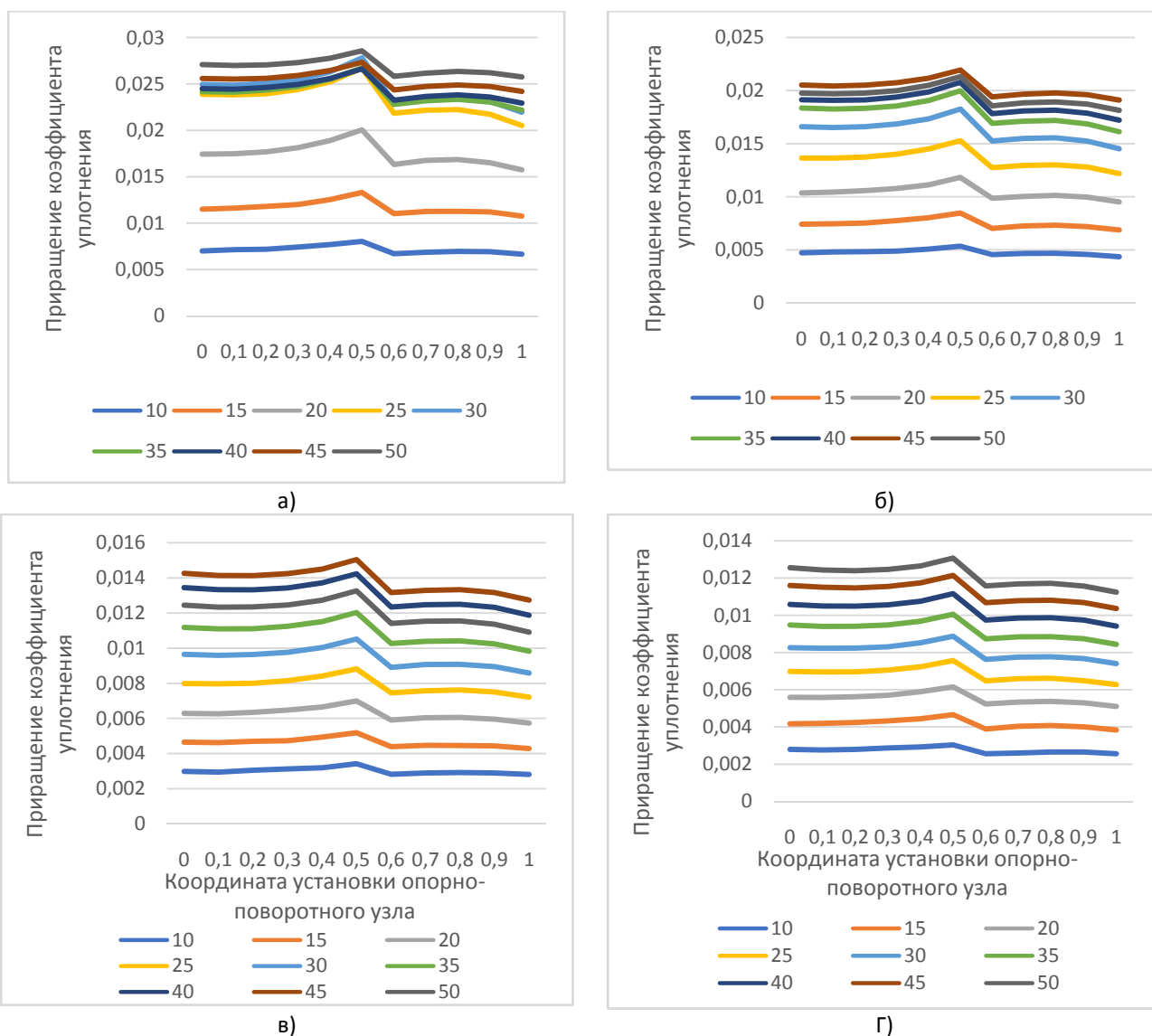


Рисунок 6.5 – Зависимость приращения коэффициента уплотнения от позиции опорно-поворотного узла за один проход катка а)  $k_y = 0.85$ , б)  $k_y = 0.90$ , в)  $k_y = 0.95$ , г)  $k_y = 0.95$

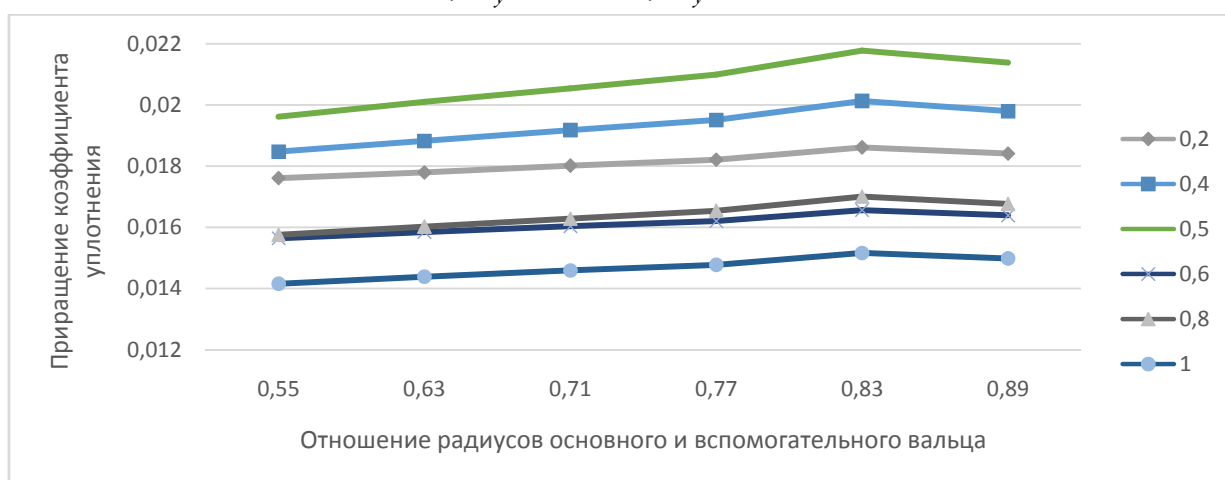


Рисунок 6.6 – Зависимость приращения коэффициента уплотнения от соотношения радиусов  $r_2/r_1$  основного и вспомогательного вальца за один проход катка



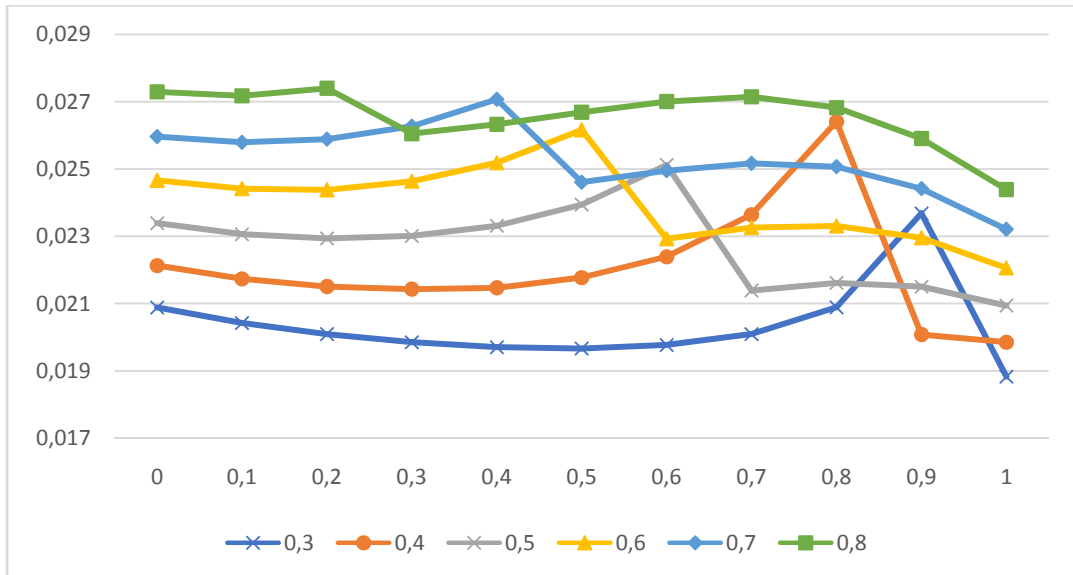


Рисунок 6.7 – Зависимость приращения коэффициента уплотнения от места установки опорно-поворотного механизма  $d_1/d$  при различных соотношениях статической нагрузки и амплитуды периодической силы при уплотнении супесчаного грунта  $F_0/F_{cm} = 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8$

Результаты разработки расчетной схемы параметров для проектирования рабочего органа гладковальцового вибрационного катка приведены в Таблицах 6.1 и 6.2

Таблица 6.1 – Исходные данные расчетной схемы перспективного рабочего органа вибрационного катка

Для тяжелых катков (18-22 т)	Для средних катков (12-18 т)	Для легких катков (9-12 т)
$\tilde{m}_0 = 3000 \text{ кг}$	$\tilde{m}_0 = 2000 \text{ кг}$	$\tilde{m}_0 = 1200 \text{ кг}$
$\tilde{M}_0 = 10000 \text{ кг}$	$\tilde{M}_0 = 7500 \text{ кг}$	$\tilde{M}_0 = 5000 \text{ кг}$
$\tilde{F}_0 = 100000 \text{ Н}$	$\tilde{F}_0 = 60000 \text{ Н}$	$\tilde{F}_0 = 40000 \text{ Н}$
$\tilde{R}_0 = 0,8 \text{ м}$	$\tilde{R}_0 = 0,6 \text{ м}$	$\tilde{R}_0 = 0,5 \text{ м}$

Таблица 6.2 – Линеаризованная расчетная схема параметров перспективного рабочего органа вибрационного катка

	<b>Исходные данные расчетной схемы перспективного РО</b>
<p><math>M_0</math> - доля массы рамы катка, приходящегося на ось вальца;</p> <p><math>m_0</math> - масса вальца; <math>R_0</math> - радиус вальца;</p> <p><math>F_{\text{вibr0}}(t) = mr(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft) =</math>  <math>= F_0 \sin(2\pi ft)</math> - периодическая сила воздействия.</p> <p>Расчетные величины:</p> <p><math>d = d_1 + d_2 &gt; R_1 + R_2</math> - расстояние между центрами валцов;</p> <p><math>m_1(M_0, m_0, F_0, R_0)</math> - масса основного вальца 1;</p>	<p><math>m_2(M_0, m_0, F_0, R_0)</math> - масса вспомогательного вальца 2;</p> <p><math>M_1(M_0, m_0, F_0, R_0)</math> - масса рамы, приходящаяся на валец 1;</p> <p><math>M_2(M_0, m_0, F_0, R_0)</math> - масса рамы, приходящаяся на валец 2;</p> <p><math>F_1(M_0, m_0, F_0, R_0)</math> - амплитуда периодической силы вальца 1.</p> <p><math>R_1(M_0, m_0, F_0, R_0)</math> - радиус основного вальца 1;</p> <p><math>R_2(M_0, m_0, F_0, R_0)</math> - радиус вспомогательного вальца 2;</p>
<b>Расчетные формулы для параметров основного вальца (вибрационного)</b>	<b>Расчетные формулы для параметров вспомогательного вальца (компенсирующего)</b>
$m_1(M_0, m_0, F_0, R_0) = m_0(1 - 0.0759 \frac{M_0}{M_0} - 0.0737 \frac{F_0}{F_0} - 0.0747 \frac{R_0}{R_0})$	$m_2(M_0, m_0, F_0, R_0) = m_0(1 - 0.213 \frac{M_0}{M_0} - 0.198 \frac{F_0}{F_0} - 0.186 \frac{R_0}{R_0})$
$M_1(M_0, m_0, F_0, R_0) = M_0(1 - 0.0673 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.0765 \frac{F_0}{F_0} - 0.0731 \frac{R_0}{R_0})$	$M_2(M_0, m_0, F_0, R_0) = M_0(1 - 0.235 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.175 \frac{F_0}{F_0} - 0.211 \frac{R_0}{R_0})$
$F_1(M_0, m_0, F_0, R_0) = F_0(1 - 0.0652 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.0755 \frac{M_0}{M_0} - 0.0757 \frac{R_0}{R_0})$	$R_2(M_0, m_0, F_0, R_0) = R_0(1 - 0.196 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.179 \frac{M_0}{M_0} - 0.205 \frac{F_0}{F_0})$
$R_1(M_0, m_0, F_0, R_0) = F_0(1 - 0.0765 \frac{m_0}{\tilde{m}_0} - 0.0742 \frac{M_0}{M_0} - 0.0767 \frac{F_0}{F_0})$	$d = d_1 + d_2 = R_1 + R_2 + \frac{(R_1 + R_2)}{2} > R_1 + R_2;$

### 6.1.3 Валец дорожного катка специального вида

Поддержание среды в состоянии, наиболее восприимчивом к накоплению пластических деформаций при взаимодействии РО с грунтовым слоем является одним из условий, обеспечивающих энергоэффективный режим работы катка. Существующие конструкции жестких РО катков не всегда способны обеспечить требуемый характер адаптирования параметров силового воздействия на всех этапах уплотнения в соответствии с изменяющимися деформативными свойствами грунтовой среды.

Из известных конструкций следует упомянуть, решетчатые катки [155], которые достаточно эффективно уплотняют связные и несвязные комковатые грунты, а также грунты, содержащие мерзлые комья. При этом мерзлые комья дробятся решеткой катка, что значительно повышает качество уплотнения.

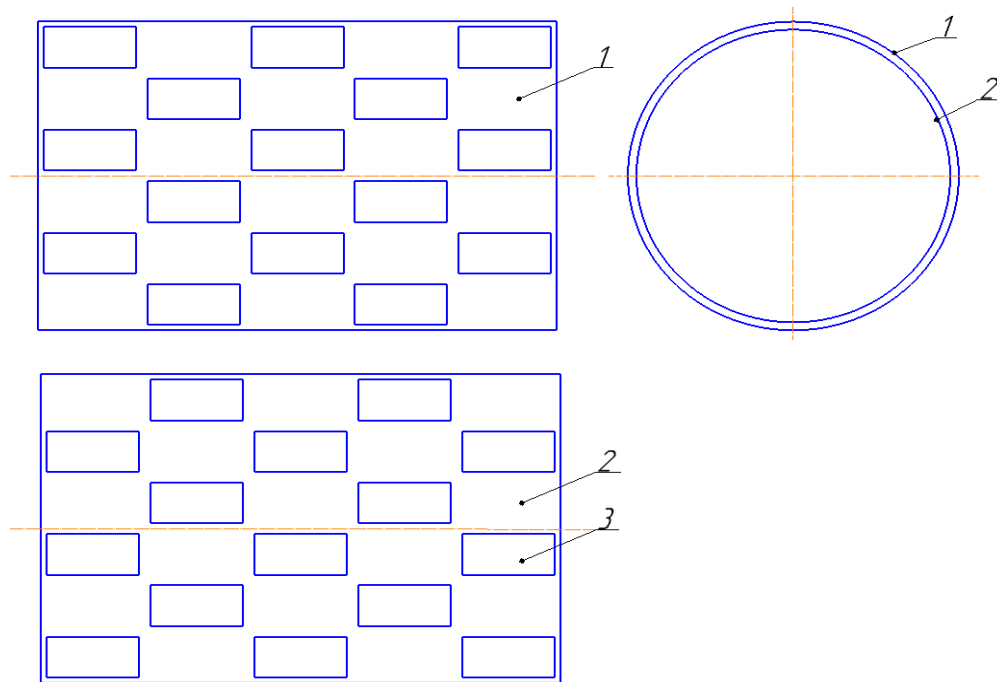
Однако для достижения необходимых контактных давлений и ровности поверхности после проходов решетчатых катков необходимо применять катки других типов, что увеличивает энергоемкость и себестоимость строительства.

Поскольку при использовании решетчатых катков невозможно одновременно достичь требуемого диапазона контактных давлений и добиться ровной поверхности уплотненного материала, то приходится применять другие виды катков, так что значительно снижается общая эффективность процесса уплотнения, в том числе сказываясь и на энергоэффективности.

Указанная проблема может быть решена с помощью катка с вальцом специального вида. На Рисунке 6.8 а). изображены проекции вальца дорожного катка, вращающегося на оси катка, который содержит внешнюю обечайку 1 и внутреннюю обечайку 2 с отверстиями 3. Рисунок 6.8 б) представляет вид опытного образца вальца со смещенными друг относительно друга обечайками [102].

Техническим результатом использования предлагаемой конструкции (Патент РФ на полезную модель №162483 [90]) является повышение

эффективности уплотнения дорожно-строительных материалов путём обеспечения возможности регулирования контактных давлений и повышение прочности конструкции катка.



а)



б)

Рисунок 6.8 – Валец специального вида с возможностью адаптивирования контактного давления

Технический результат по повышению эффективности работы катка, обеспечиваемый конструкцией, достигается тем, что валец, содержащий закреплённую на оси цилиндрическую обечайку со сквозными отверстиями на её поверхности, снабжен дополнительной цилиндрической обечайкой с отверстиями

на её поверхности, закреплённой на той же оси и расположенной внутри первой обечайки с возможностью поворота относительно неё и частичного или полного перекрытия отверстий внутренней обечайки сплошной поверхностью внешней. Устройство, осуществляющее поворот обечаек 1 и 2 друг относительно друга и регулирование размера отверстий, не рассматривается, поскольку может иметь самую различную конструкцию.

При проворачивании внутренней обечайки относительно внешней, изменяется размер сквозных отверстий. При полном перекрытии отверстий внутренней металлической обечайки сплошной поверхностью внешней металлической обечайки валец принимает форму «гладковальцового» [102].

Оригинальная конструкция вальца приводит к тому, что появляется возможность адаптировать контактное давление при работе катка по уплотнению грунтовых сред в значительных пределах, также конструкция позволяет регулировать неоднородность поверхности вальца от «решетчатого» катка с переменным размером ячеек до «гладковальцового».

Рабочий режим катка осуществляется следующим образом. На начальной стадии работы катка, когда необходимо размельчение верхних слоев материала, внутренняя обечайка расположена таким образом, чтобы ее отверстия совпадали с отверстиями внешней, т.е. сквозные отверстия имеют максимальный размер. При этом площадь контакта с грунтом минимальна, а контактные давления максимальны [102].

По мере структурной модификации и уплотнения материала в ходе работы катка, для достижения ровности поверхности внутреннюю обечайку проворачивают относительно внешней, увеличивая площадь контакта с грунтом. На финальной стадии уплотнения, когда будет необходима достаточная ровность обрабатываемой поверхности, отверстия внутренней металлической обечайки перекрываются сплошной поверхностью внешней металлической обечайки и валец принимает форму «гладкого» [102].

Используя новые элементы, в частности две подвижные металлические обечайки, расположенные одна внутри другой, в которых имеются соосные

отверстия, появляется возможность регулировать контактные давления, а также ровность поверхности вальца в широком диапазоне, что в свою очередь позволяет значительно повысить эффективность уплотнения дорожно-строительных материалов.

#### 6.1.4 Деформируемый РО в виде гидрошины с регулируемой жесткостью и естественной адаптацией по контактному давлению.

Регулирование характеристик деформируемого рабочего органа уплотняющей машины выступает ключевым процессом, служащим для повышения интенсивности ее работы, реализуясь выбором оптимального набора режимных параметров.

В работе [191] была рассмотрена возможность регулирования деформативных и диссипативных свойств деформирования модифицированного пневмошинного рабочего органа катка, снабженного металлическими бандажами. Были выявлены закономерности изменения жесткости и вязкости рабочего органа от количества бандажей и давления воздуха внутри шины. При этом характеристики допускали только принудительный характер регулирования.

Еще одним способом регулирования деформативных свойств рабочего органа для повышения энергоэффективности работы катка выступает естественная адаптация, когда характеристики РО изменяются согласованно с характеристиками уплотняемого материала. Примерами могут выступать гидрошинные и пневмошинные рабочие органы. В рамках настоящей работы была разработана и запатентована конструкция устройства, повышающего деформационные и снижающая диссипационные свойства гидрошинных рабочих органов катков.

Устройство относится к рабочим органам, обеспечивающим уплотнение грунтов катками различных типов. Вибрационные катки, широко используемые в строительстве для уплотнения материалов грунтовых насыпей, оснащаются рабочими органами, обладающих широким спектром массово-габаритных характеристик и технических особенностей. Деформативные свойства пневмошин

и гидрошин, как рабочих органов вибрационных катков, могут регулироваться принудительно или естественным образом за счет сил реакции при осуществлении силового воздействия на поверхность уплотняемой среды [109].

Результат применения предлагаемой конструкции гидрошинного рабочего органа для энергоэффективной обработки грунтовых сред достигается тем, что конструкция устройства включает перемычки, разделяющие заполненную жидкостью оболочку на секторы, с возможностью перекрытия при деформировании, при этом область оболочки, заполненной жидкостью, непосредственно взаимодействующая с поверхностью уплотненного слоя, изолируется, и жидкость внутри оболочки не перераспределяется. Этим повышается жесткость вальца при взаимодействии с поверхностью слоя, что приводит к повышению контактных давлений до значений, приводящих к дальнейшему уплотнению [109].

На Рис. 6.10 а) приведен вид обечайки, установленной на ободу в фронтальной и боковой проекциях (состояние отвечает недеформированной оболочки, заполненной жидкостью, с зазором между перемычками)

На Рис. 6.10 б) представлено деформированное состояние оболочки, заполненной жидкостью, при котором пластины 3 и 4 замкнуты. Тем самым секторы оболочки, заполненные жидкостью, находящиеся в контакте с поверхностью уплотняемого слоя, изолируются друг от друга и ее деформативные свойства меняются. [109]

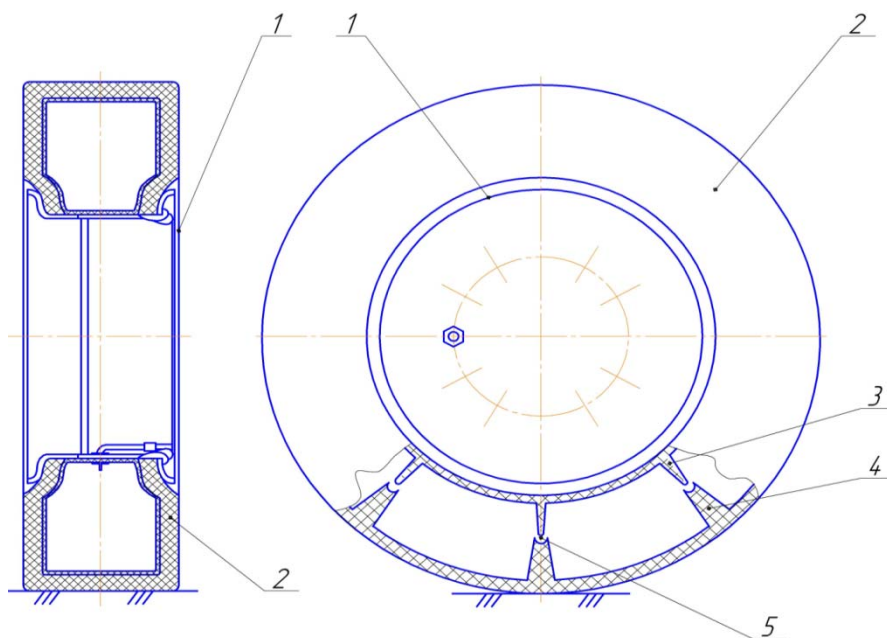
Обечайка состоит из одной или нескольких гидрошин 2 в виде упругих, заполненных жидкостью оболочек, установленных на ободу 1. Внутренний объем гидрошины 2 разделен перемычками, представляющими собой пары пластин 3 и 4, торцы которых снабжены клиновидными выступами, являющихся частью гидрошины 2 и выполненных из того же материала, что и гидрошины 2, разделенных зазором 5.

В недеформированном состоянии пластины 3 и 4 не касаются друг друга. При незначительной деформации гидрошины 2 просвет зазора 5 уменьшается и жидкость, стремящаяся перераспределиться через нее в секторы гидрошины 2, которые непосредственно не взаимодействуют с поверхностью слоя, обеспечивает силу вязкого трения, увеличивающуюся при дальнейшем уменьшении зазора 5.

Эта сила препятствует деформированию, что приводит к неизменности площади пятна контакта и препятствует уменьшению контактного давления на грунт. При возрастании с уплотнением прочности слоя гидрошина 2 может деформироваться так, что торцы пластин 3 и 4 полностью перекроют зазор 5, образовав непрерывную перегородку 6 и изолировав сектор от остального объема гидрошины 2. Попадание друг в друга клиновидных выступов при перекрытии торцов пластин 3 и 4 обеспечивают большую эффективность «запирания» [109].

При перекрытии зазора 5 между пластинами 3 и 4 объем сектора гидрошины 2, взаимодействующего с поверхностью грунтового слоя, изолируется с дополнительным повышением жесткости и уменьшением вязких свойств в силу прекращения перераспределения жидкости внутри гидрошины 2.

Таким образом, упругие и вязкие свойства гидрошины 2 будут зависеть от количества пар пластин 3 и 4 и величины зазора 5 между ними, изменяясь при деформировании, что позволит осуществлять подбор этих параметров, в зависимости от характеристик уплотняемых сред, для обеспечения величин контактного давления, соответствующего эффективному уплотнению слоев грунтовых сред на всех этапах процесса [109].



a)



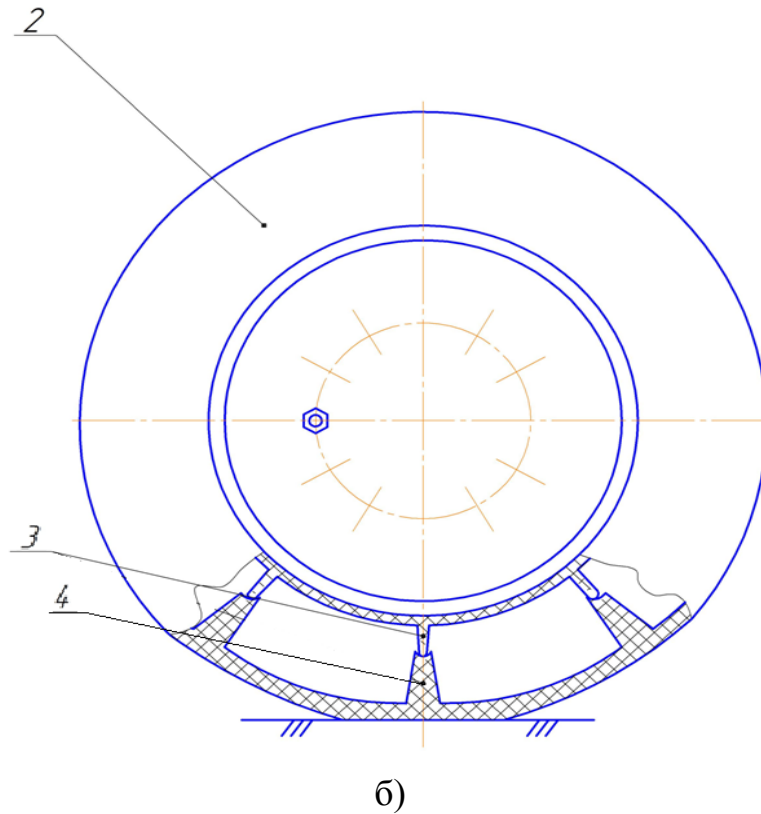


Рисунок 6.9 - Обечайка гидрошинного вальца вибрационного катка в недеформированном состоянии а), в деформированном состоянии с замкнутыми перемычками (Патент РФ № 184799)

## 6.2 Планетарный вибровозбудитель с регулируемыми характеристиками и цепной передачей

В качестве технического решения, позволяющего добиться расширения спектра режимов динамического уплотняющего воздействия предлагается усовершенствованная конструкция планетарного генератора периодического воздействия (вибровозбудителя) [89] для реализации энергоэффективных режимов работы катков при уплотнении грунтовых сред представлена на рисунке 6.10. [108].

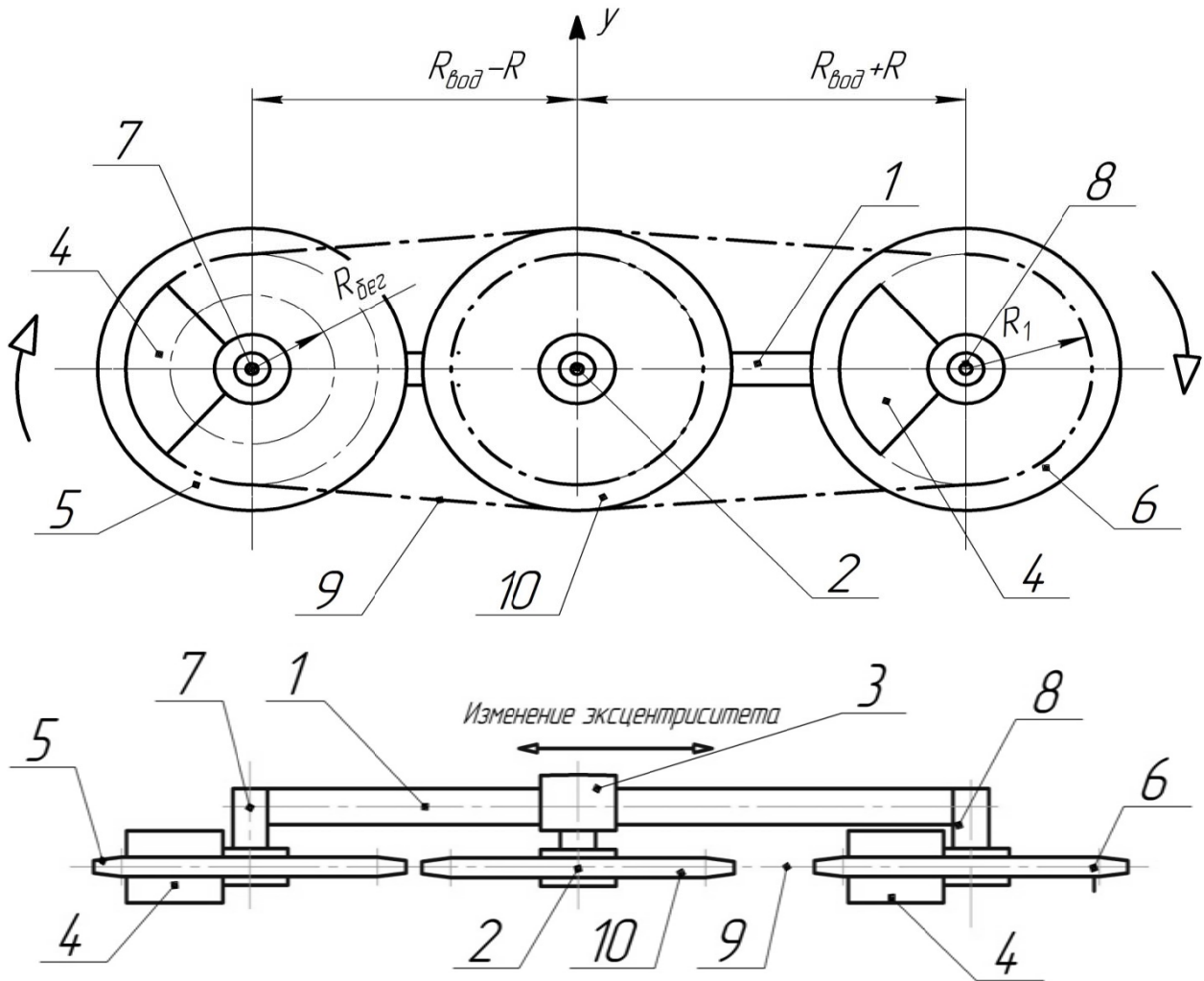


Рисунок 6.10 Планетарный вибровозбудитель с регулируемыми характеристиками и цепной передачей

Вибровозбудитель состоит из водила 1, установленного с возможностью вращения вокруг оси 2, положение которой относительно центра водила может регулироваться при помощи крепежного узла 3.

На концах водила 1 установлены снабженные эксцентрическими массами 9 и 10 бегунки-сателлиты 5 и 6 с возможностью вращения вокруг осей 7 и 8 соответственно. Бегунки соединены друг с другом цепной передачей 4, осуществляющей жесткую кинематическую связь между ними, через неподвижную звездочку 11. [108]

При вращении водила 1 вокруг оси 2, бегунки 5 и 6 на его концах совершают

дополнительное вращение вокруг осей 7 и 8. Вращательное движение водила 1 передается бегункам при помощи цепной передачи 4 через неподвижную звездочку 11. Вращение бегунков происходит с угловыми скоростями с угловыми скоростями, определяемыми положением оси 2 по отношению к центру водила, регулируемым при помощи крепежного узла 3, и угловой скоростью вращения водила. [108]

Положение центров эксцентричных масс бегунков определяет характер направленности центробежной силы инерции

$$\bar{F} = \bar{F}_{вод} + \bar{F}_{бег} = m_{вод} \ddot{\bar{r}}_{вод} + m_{бег}^{(1)} \ddot{\bar{r}}_{бег}^{(1)} + m_{бег}^{(2)} \ddot{\bar{r}}_{бег}^{(2)}, \quad (6.8)$$

соответственно, ее вертикальная составляющая, приложенная к оси, может быть определена как проекция на ось  $y$

$$\bar{F}_{верт} = (m_{вод} \ddot{\bar{r}}_{вод} \cdot \bar{e}_{вод} + m_{бег}^{(1)} \ddot{\bar{r}}_{бег}^{(1)} \cdot \bar{e}_{бег}^{(1)} + m_{бег}^{(2)} \ddot{\bar{r}}_{бег}^{(2)} \cdot \bar{e}_{бег}^{(2)}) \bar{e}_y, \quad (6.9)$$

где  $m_{вод}$  - масса водила (сосредоточенная в его центре масс);  $\ddot{\bar{r}}_{вод}$  - полное ускорение центра масс водила;  $\bar{e}_{вод}$  - единичный вектор радиус-вектора центра масс водила;  $m_{бег}$  - масса бегунка (сосредоточенная в его центре масс);  $\ddot{\bar{r}}_{бег}$  - полное ускорение центра масс бегунка;  $\bar{e}_{бег}$  - единичный вектор радиус-вектора центра масс бегунка;  $\bar{e}_y$  - единичный вектор направления оси  $y$  [108].

Вместо  $\bar{e}_y$  - единичного вектора направления оси  $y$  в качестве вектора, определяющего направление воздействия вибровозбудителя, может быть выбран произвольный вектор [108].

Учитывая то, что радиус-вектор центра масс водила 1 и положения центров эксцентрических масс бегунков могут регулироваться, модуль силы, действующей на ось, может варьироваться в широких пределах. Регулирование вида зависимости силы динамического воздействия от времени можно осуществить соответствующим подбором начального положения (фазы) движения водил и бегунков [108].

Радиус-вектор  $\bar{r}_{вод}$  центра масс водила радиуса  $R_{вод}$  при вращательном движении с угловой частотой  $\omega$  меняется по закону

$$\bar{r}_{\text{вод}} = \frac{1}{2} (R_{\text{вод}} \cos(\omega t + \varphi_{\text{вод}}), R_{\text{вод}} \sin(\omega t + \varphi_{\text{вод}})), \quad (6.10)$$

причем  $R_{\text{вод}}$  представляет расстояние от центра масс водила до оси 2.

В свою очередь каждый из бегунков будет совершать более сложное движение и радиус-вектор центра эксцентрической массы бегунка будет меняться по закону

$$\bar{r}_{\text{бег}} = (R \cos(\omega t + \varphi_{\text{вод}}) + R_{\text{бег}} \cos(\omega_{\text{бег}} t + \varphi_{\text{бег}}), R \sin(\omega t + \varphi_{\text{вод}}) + R_{\text{бег}} \sin(\omega_{\text{бег}} t + \varphi_{\text{бег}})) \quad (6.11)$$

где  $R$  - длина водила от оси вибровозбудителя до оси бегунка 5;  $\varphi_{\text{вод}}$  - начальная фаза (положение) водила;  $R_{\text{бег}}$  - расстояние от центра масс бегунка до оси бегунка;  $\varphi_{\text{бег}}$  - начальная фаза бегунка относительно оси;  $\omega_{\text{бег}}$  - угловая скорость вращения бегунка вокруг своей оси, определяемая по формуле

$$\omega_{\text{бег}} = \omega \frac{R}{R_0},$$

где  $R_0$  - радиус зубчатой звездочки цепной передачи бегунка [108].

Таким образом, положения масс бегунков, водил и их начальные фазы (положения) могут обеспечить при фиксированном значении расстояния от центра масс водила до его оси вращения 2 любую из конфигураций, промежуточную между приведенными на Рис. 6.2 Этим регулируется направление максимального динамического воздействия и величина и зависимость от времени силы, генерируемой возбудителем.

На Рис. 6.11 приведен вид вибровозбудителя в двух проекциях. Положение оси вращения 1 водила 7 смещено относительно его геометрического центра и зафиксировано крепежным узлом 8.

Режимы периодического воздействия близкие к импульсным, могут быть реализованы на основе гидрообъемных вибровозбудителей, как, например, в известной работе Н.А. Азюкова [3].

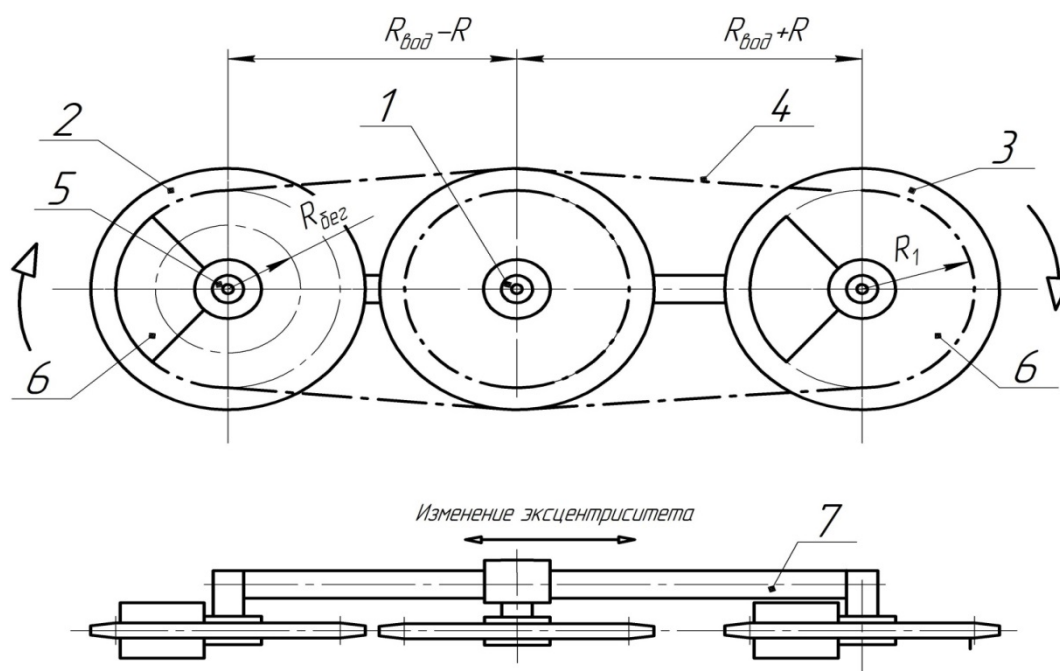


Рисунок 6.11 – Планетарный вибровозбудитель с регулируемыми характеристиками в асимметричном положении

На Рис. 6.12 представлены положения эксцентрических масс на бегунках, обеспечивающие и максимальную величину амплитуды периодического динамического воздействия в заданном направлении [108].

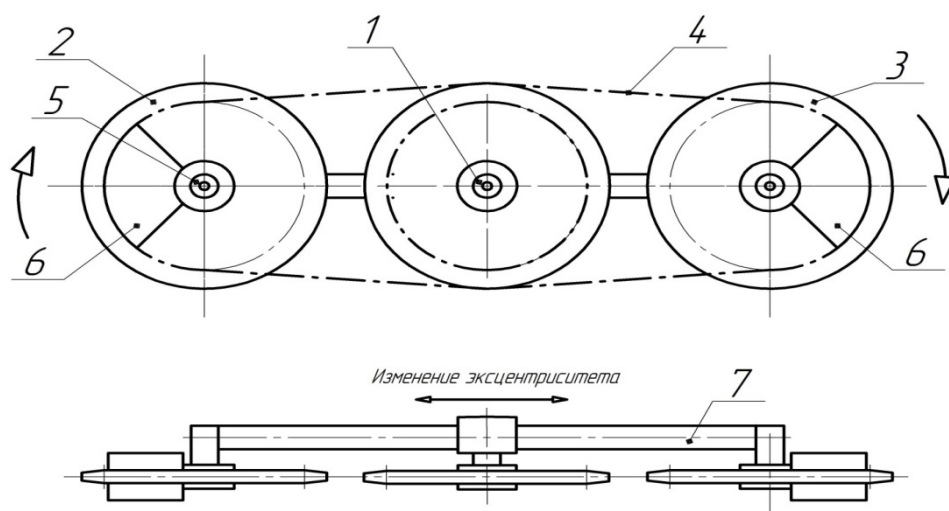


Рисунок 6.11 – Планетарный вибровозбудитель с регулируемыми характеристиками в симметричном положении

Техническим результатом внедрения предлагаемой конструкции вибровозбудителя является расширение спектра типов возбуждаемых одним и тем же устройством периодических динамических воздействий, способных

варьироваться по амплитуде, направленному действию и виду зависимости от времени, более сложному, чем гармонический, без необходимости использования зубчатых передач, требующих высокой точности изготовления. Указанный результат достигается тем, конструкция устройства включает пару бегунков-звездочек с эксцентрическими массами на водиле, установленном на оси с возможностью изменения своего положения относительно нее и неподвижно закрепленной дополнительной звездочки с возможностью сообщения вращательного движения бегункам при помощи цепной передачи.

В качестве примера рассмотрим силу, генерируемую предлагаемым вибровозбудителем с одним водилом и бегунком при следующих параметрах системы:

- масса водила  $m_{вод} = 10 \text{ кг}$  ;
- масса бегунка  $m_{бег} = 0.5 \text{ кг}$  ;
- радиус вектор центра масс водила  $R_{вод} = 0.125 \text{ м}$  ;
- радиус водила  $R = 0.05 \text{ м}$  ;
- радиус вращения эксцентрической массы бегунка  $R = 0.1 \text{ м}$  ;
- частота вращения водила  $\omega = 20\pi \text{ с}^{-1}$  ;
- частота вращения эксцентрической массы бегунка  $\omega = 100\pi \text{ с}^{-1}$  .

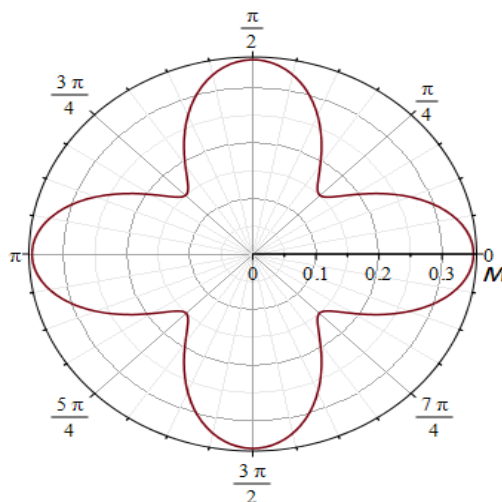


Рисунок 6.12 – Зависимость радиус-вектора эксцентрической массы бегунка от угла поворота водила.

$$\bar{r}_{\sigma_{ez}} = (R \cos(\omega t + \varphi_{\sigma_{od}}) + R_{\sigma_{ez}} \cos(\omega_{\sigma_{ez}} t + \varphi_{\sigma_{ez}}), R \sin(\omega t + \varphi_{\sigma_{od}}) + R_{\sigma_{ez}} \sin(\omega_{\sigma_{ez}} t + \varphi_{\sigma_{ez}})) \quad (6.12)$$

Энергоэффективность устройства достаточно просто объяснима. Эксцентрическая масса бегунка вращается с частотой в разы превышающей частоту вращения водила, что обеспечивает повышение частоты воздействия для силы, генерируемой устройством. Зависимость силы от времени графически изображена на Рис. 6.18

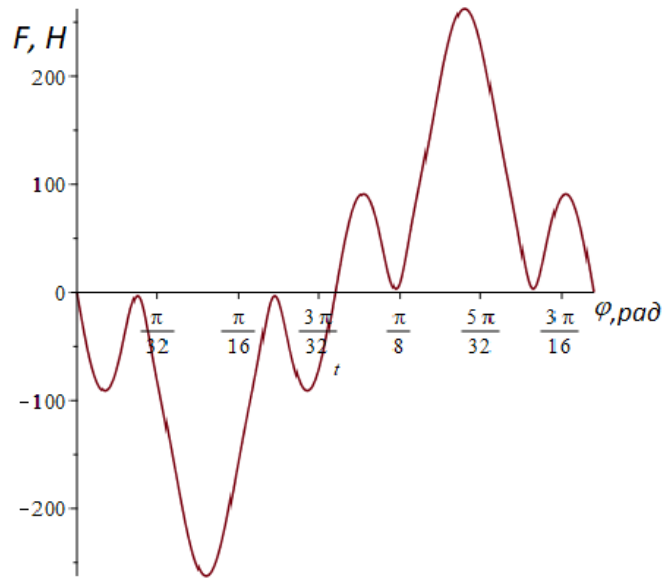


Рисунок 6.13 – Зависимость инерционной силы, генерируемой планетарным вибровозбудителем в вертикальном направлении на одном периоде вращения водила [108].

Видно, что сила, генерируемая планетарным вибровозбудителем, носит импульсный характер и имеет частоту, отличающуюся от исходной частоты вращения водила. С учетом зависимости характеристик поглощения энергии активной областью грунтового слоя при динамических режимах уплотнения указанный вибровозбудитель может быть использован в качестве генератора динамических колебаний, используемого для обеспечения энергоэффективности работы тяжелых статических катков при уплотнении грунтов. Другим способом повышения энергоэффективности вибровозбудителей является разработка устройств направленного действия, например, описанного в [190] и запатентованного

### 6.3 Технологические рекомендации по энергоэффективному уплотнению грунтов вибрационными катками

Особенностью работ по устройству земляного полотна в дорожном строительстве является вклад, который качество уплотнения вносит в общую долговечность и эксплуатационные характеристики устроенных на нем основания дороги и дорожных одежд. При этом неоспорим факт, что стоимость материалов и работ по устройству оснований и дорожных одежд превосходят таковые для земляного полотна в десятки раз [153].

Согласно нормативным документам, требуемое качество работ по уплотнению грунтов насыпи должно достигаться использованием по меньшей мере двух машин, что обуславливается необходимостью адаптировать воздействие на материал слоя согласованно с изменением его характеристик. При этом основную роль играет возрастание, в первую очередь, прочности, параметризуемой величиной достигнутого коэффициента уплотнения. Другим фактором, заставляющим использовать дополнительный каток, выступает необходимость укатки до требуемых значений плотности разрушенного при уплотнении с использованием, например, кулачковых катков, грунта приповерхностной области слоя. Это оказывает негативное влияние как на производительность работ, так и на затраты ресурсов при их осуществлении, в первую очередь энергоемкость.

Результаты настоящей работы по выявлению энергоэффективных режимов уплотнения грунтов земляного полотна вибрационными катками позволяют уточнить стандартные технологические рекомендации по использованию гладковальцовых вибрационных катков [150]

Рекомендованные параметры энергоэффективных режимов работы катков во многом зависят от начальной плотности грунта в свежесыпанном состоянии. Она определяется характером начальных операций по разработке и отсыпки слоев грунта. Согласно современным данным [118,119], наибольшая начальная плотность свежесыпанного грунта земляного полотна достигается при



устройстве скреперами или автосамосвалами. При этом относительная величина  $k_y=0.85-0.90$  для самосвалов и  $k_y=0.90-0.92$  для скреперов. В то время как устройство насыпи бульдозерами и грейдерами-элеваторами приводит к начальным плотностям  $k_y=0.75-0.85$ , что требует дополнительных затрат времени и ресурсов для их уплотнения катками.

Известно, что влажность уплотняемых грунтов оказывает влияние как на протекание процесса уплотнения земляного полотна, так и, в дальнейшем, на прочностные и эксплуатационные характеристики дороги. Уплотнение грунтов основания в силу этого следует проводить при оптимальной влажности или несколько ниже нее (на 10-15%). Ее ориентировочные значения могут варьироваться в зависимости от типа и состава грунта, составляя в %: для песчаных – 8-12; супесчаных – 9-15; тяжелых суглинков – 15-22; пылеватых суглинков – 17-23; глинистых – 18-25 [49, 117]. При этом для достижения потребной влажности грунт должен быть подсушен или дополнительно увлажнен [127].

Уплотнение слоев должно проводиться при их рациональной толщине, обеспечивающей требуемую проработку для всего материала слоя. В зависимости от массогабаритных характеристик и типа катка толщина может быть определена согласно формулам, приведенным в [35, 47, 161, 169].

Значение рациональной толщины слоя для катков может быть получено из известных формул [32, 49, 155]. Величина толщины уплотняемого слоя в рыхлом состоянии, требуемое число проходов по одному следу и соответствующее число проходов для работы катка приведены для связанных и несвязанных грунтов в таблице 6.3. Предполагается, что конструкция катка имеет возможность варьировать частоту приложения гармонической силы в пределах 20-60 Гц.

Таблица 6.3 - Толщина слоя и требуемое количество проходов для энергоэффективных режимов работы катков

Тип катка (нагрузка на вибродвижитель, амплитуда воздействия)	Самоходный 3-6 т, $F_0=15-40$ кН	Самоходный 6-9 т, $F_0=40-60$ кН	Самоходный 9-12 т, $F_0=50-100$ кН
Толщина слоя несвязанного грунта, см	20-35	30-50	45-60
Толщина слоя связанного грунта, см	10-20	15-25	20-35
Количество проходов для несвязанного грунта	4-8	5-8	5-9
Количество проходов для связанного грунта	7-11	7-12	7-13

Энергоэффективный режим работы катка обеспечивается комбинацией рационального скоростного режима и частоты приложенной периодической силы, которую необходимо подбирать от прохода к проходу, изменяя как скорость движения катка, так и частоту в зависимости от достигнутого грунтом коэффициента уплотнения.

Для реализации энергоэффективного режима выбиралась линейная челночная схема уплотнения насыпи со смещением от бровок к середине с перекрытием следа 15-25 см в зависимости от ширины вальца используемого катка и наименьшим расстоянием края насыпи 50 см длиной 200-250 м (Рис. 6.14). Такая схема обладает более высокой достигаемой производительностью, в особенности при использовании самоходных катков, в силу меньшего количества холостого времени, затрачиваемого катком движение по области, не включающего в себя площадь уплотняемой захватки, при кольцевой схеме работы.

Порядок подбора комбинации скоростного и частотного режима уплотнения грунтовой среды гладковальцовым катком определяется следующей последовательностью действий, которая может быть формализована в виде алгоритма Рис. 6.15:

- 1) Уточняются исходные параметры грунтового слоя, соответствующие эксплуатационным и массово-габаритным характеристикам катка;
- 2) По таблице выбираются значения комбинированного скоростно-частотного энергоэффективного режима уплотнения;
- 3) Проводится требуемое количество проходов катка при постоянных параметрах режима, согласно выбранной схеме уплотнения;
- 4) Уточняются параметры скоростно-частотного режима, при необходимости выбираются новые значения скорости и частоты;
- 5) Производится корректировка режима эксплуатации катка;
- 6) Переход к пункту 3;
- 7) После проведения требуемого количества проходов, процесс завершается.

Параметры энергоэффективного режима работы самоходного вибрационного катка массой 10 тонн при уплотнении слоя супесчаного грунта по линейной челночной схеме Рис. влажности  $0.9W_0$  толщиной 30 см приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 - Параметры энергоэффективного режима работы самоходного вибрационного катка

f, Гц	15-25	25-35	35-45
v, км/ч			
1.5-2.5	1,7,13,19,25,31,37		
2.5-3.5	2,8,14,20,26,32,38	3,9,15,21,27,33,39	
3.5-4.5		4,10,16,22,28,34,40	5,11,17,23,29,37,41
4.5-5.5			6,12,18,24,30,36,42
	Номера проходов		

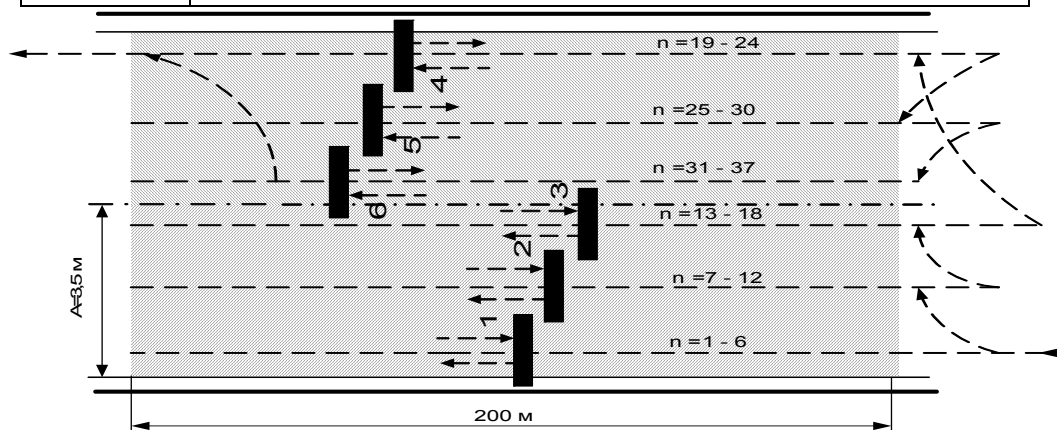


Рисунок 6.14– Линейная челночная технологическая схема уплотнения

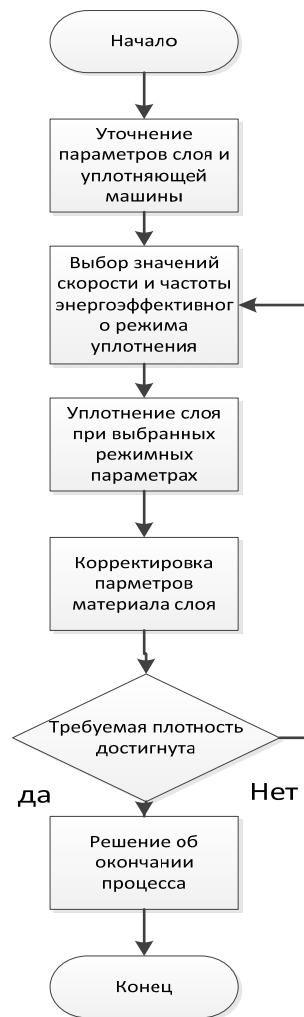


Рисунок – 6.15 Алгоритм методики выбора параметров энергоэффективного режима уплотнения грунтовых сред.

К повышению коэффициента уплотнения может привести уменьшение толщины грунтового слоя. Как показано в рамках многочисленных исследований и в том числе подтверждено результатами данной работы, уменьшение толщины слоя уплотняемого грунта (даже оставаясь в рамках рекомендованных значений) значительно повышает интенсивность проработки слоя. При этом количество проходов катка для достижения требуемой плотности может быть уменьшено на 10% на каждые 3% уменьшения толщины слоя уплотняемого грунта.

Для более точного подбора энергоэффективных параметров режима работы гладковальцовых вибрационных катков по уплотнению грунтовых сред может быть использована расчетная методика, использующая результаты проведенных исследований.

Для вычисления комбинации скорости поступательного движения катка  $v_{omm}$  и частоты воздействия периодической силы  $f_{omm}$  используются их линеаризованные зависимости и от текущего состояния среды, параметризуемого коэффициентом уплотнения  $k$  и статической нагрузки от массы катка  $M$ , приходящейся на вибрационный валец.

$$v_{omm} = v_0 + c_{M,v}(M - M_0) + c_{k,v}(k - k_0), \quad (6.18)$$

$$f_{omm} = f_0 + c_{M,f}(M - M_0) + c_{k,f}(k - k_0). \quad (6.19)$$

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

Коэффициенты для расчетов параметров энергоэффективного режима работы гладковальцовых вибрационных катков при уплотнении супесчаных и суглинистых грунтов оптимальной влажности приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.5. - Коэффициенты для вычисления параметров энергоэффективных режимов работы вибрационных катков при уплотнении грунтов [110]

Тип грунта	Масса, 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	33	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

**Пример использования методики.** Определение энергоэффективных скорости катка и частоты воздействия осуществляется следующим образом (на примере слоя суглинистого грунта оптимальной влажности с числом пластичности 7, толщиной 25 см, уплотняемого катком со статической

нагрузкой вибрационного вальца 5.1 т):

1) Определяется коэффициент уплотнения грунта слоя  $k$  ( $k = 0.87$ ), отвечающий его текущему состоянию

2) По Таблице 1 для выбираются значения расчетных коэффициентов для вычисления оптимальной скорости катка  $v_0 = 1.0$  м/с,  $c_{M,v} = 0.105$  м/(с·т),  $c_{k,v} = -3.915$  м/с

3) Вычисляется значение оптимальной скорости

$$v_{opt} = 1.0 + 0.105(5.1 - 7.5) + (-3.915)(0.87 - 0.92) = 1.0846 \text{ м/с} = 3.9 \text{ км/ч}$$

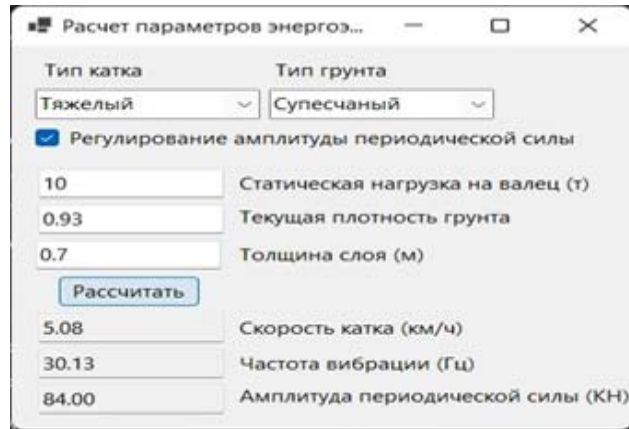
4) По Таблице 1 выбираются значения расчетных коэффициентов для вычисления оптимальной частоты воздействия  $f_0 = 40$  Гц,  $c_{M,f} = -1$  Гц/т,  $c_{k,v} = -120$  Гц,

$$5) f_{opt} = 40 + (-1)(5.1 - 7.5) + (-120)(0.87 - 0.92) = 48.4 \text{ Гц}$$

Положения методики были реализованы в программном приложении, позволяющем определять параметры режима работы гладковальцового вибрационного катка.

Параметрами, определяющими значение пары функций  $(f_{opt}, v_{opt})$ , выступают вид уплотняемого грунта (супесчаный или суглинистый), масса, приходящаяся на вибрационный валец (определяется массогабаритными характеристиками катка), толщина уплотняемого слоя (должна находиться в пределах, рекомендуемых для заданного типа катка), коэффициент уплотнения, при котором осуществляется проход катка. Расчет ведется для грунта с оптимальной влажностью.

Контактное давление определяется для заданного катка по формуле максимального контактного давления (1.7) для параметров вибрационного вальца катка при коэффициенте уплотнения, равном 0.85.



Параметр	Значение
Тип катка	Тяжелый
Тип грунта	Супесчаный
Регулирование амплитуды периодической силы	<input checked="" type="checkbox"/>
Статическая нагрузка на валец (т)	10
Текущая плотность грунта	0.93
Толщина слоя (м)	0.7
Скорость катка (км/ч)	5.08
Частота вибрации (Гц)	30.13
Амплитуда периодической силы (кН)	84.00

Рисунок 6.16 Интерфейс приложения для определения комплекса энергоэффективных параметров работы гладковальцового вибрационного катка

Графическое представление полученных результатов для методики выбора комплекса режимных параметров работы гладковальцовых вибрационных катков при уплотнении супесчаных сред приведено на Рис. 6.17, 6.18. [104]

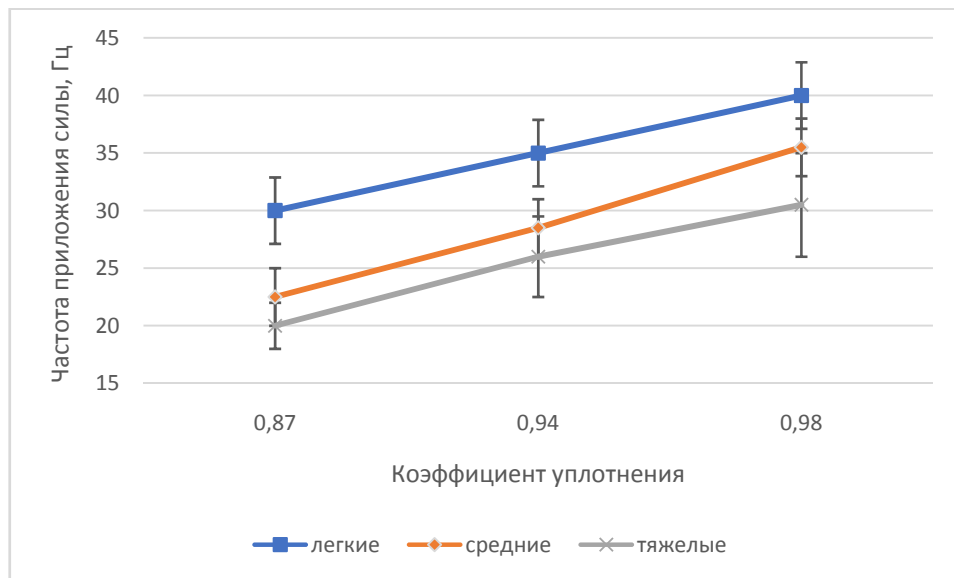


Рисунок 6.17 – Интервалы значений частоты силового воздействия, обеспечивающей энергоэффективный режим работы вибрационного катка на супесчаном грунте (начальный-  $k_y = 0,87 - 0,92$ , промежуточный  $k_y = 0,92 - 0,98$ , конечный -  $k_y = 0,98 - 1,0$ )

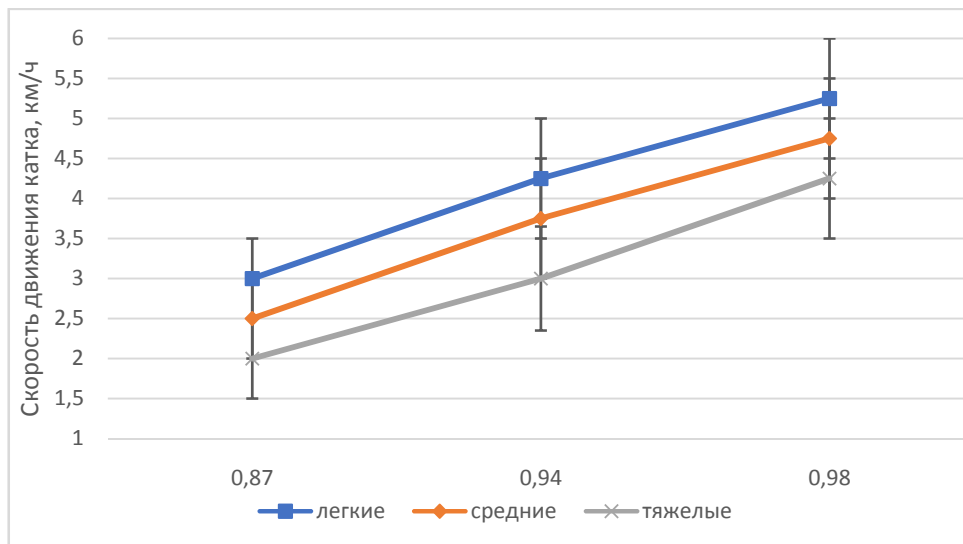


Рисунок 6.18 – Интервалы скорости поступательного движения, обеспечивающей энергоэффективный режим работы вибрационного катка на супесчаном грунте (начальный-  $k_y = 0,87 - 0,92$ , промежуточный  $k_y = 0,92 - 0,98$ , конечный -  $k_y = 0,98 - 1,0$ )

Для уплотнения суглинистых грунтов зависимости комплекса режимных параметров, обеспечивающих энергоэффективный режим уплотнения наглядно приведены на Рис. 6.19, 6.20.

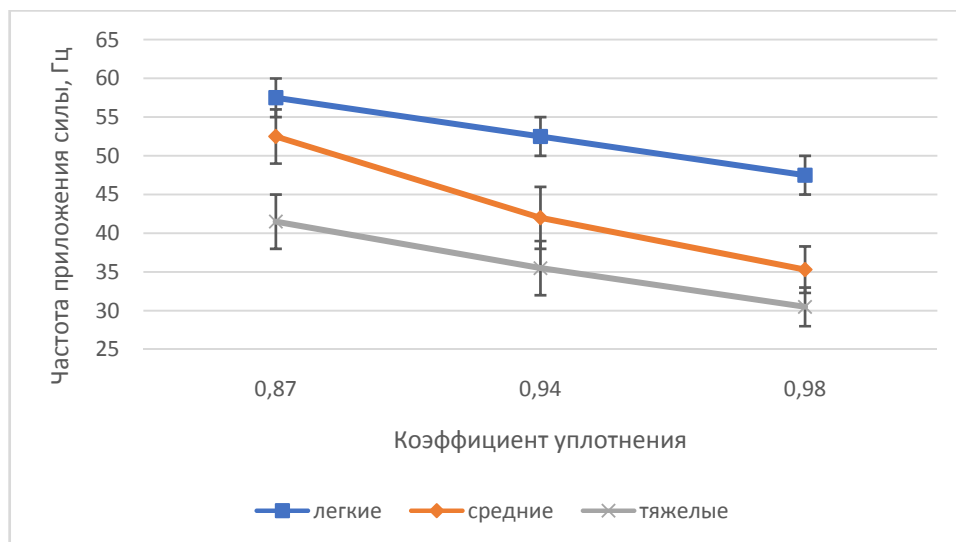


Рисунок 6.19 – Интервалы значений частоты силового воздействия, обеспечивающей энергоэффективный режим работы вибрационного катка на суглинистом грунте (начальный-  $k_y = 0,87 - 0,92$ , промежуточный  $k_y = 0,92 - 0,98$ , конечный -  $k_y = 0,98 - 1,0$ )



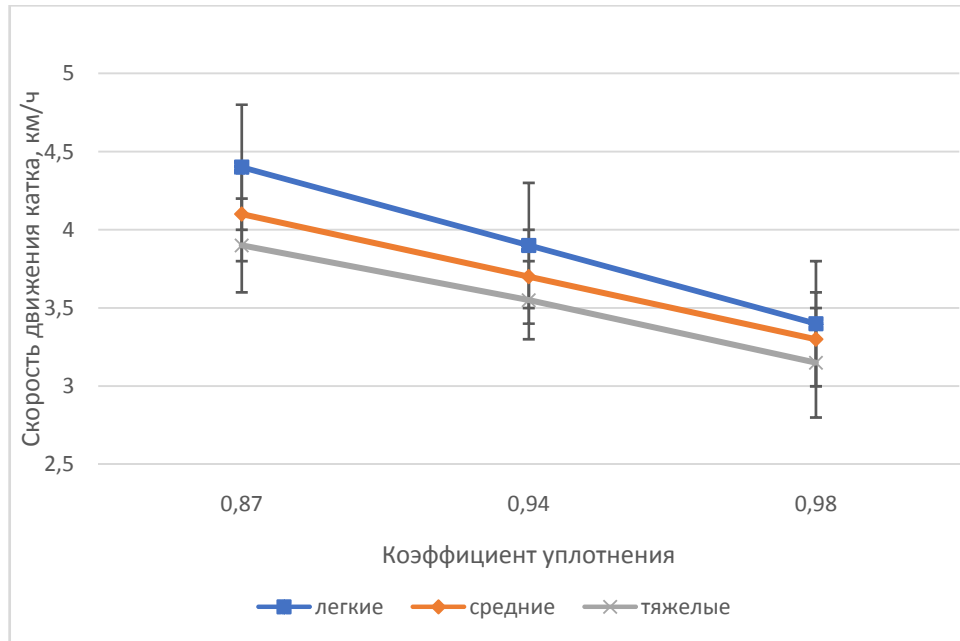


Рисунок 6.20 – Интервалы скорости поступательного движения, обеспечивающей энергоэффективный режим работы вибрационного катка на суглинистом грунте (начальный-  $k_y = 0,87 - 0,92$ , промежуточный  $k_y = 0,92 - 0,98$ , конечный -  $k_y = 0,98 - 1,0$ )

Характер выявленных зависимостей обуславливается эволюцией физико-механических характеристик среды при накоплении необратимой деформации.

#### 6.4 Анализ применимости методики выбора энергоэффективного режима работы уплотняющей машины и оценка экономической эффективности

Практическим результатом эксплуатации катков на энергоэффективных режимах выступает повышение эффективности их работы, выражающееся в конечном итоге в повышении производительности. Для выявления эффекта от использования методики, предложенной в работе, проведем сравнительный анализ производительности катка, эксплуатируемого согласно принятым требованиям СНиП [137], и при реализации энергоэффективного режима на всех этапах уплотнения.

В качестве исходного рассмотрим отечественный каток RV-17 DT с эксплуатационной массой 17 т, выпускаемый ПО «Раскат» (г. Рыбинск).

Определим максимальную производительность по формуле (5.26), обобщив ее на переменную скорость движения катка

$$P_{з\max} = 3600 \frac{(B-b)h}{\frac{n_1}{V_1} + \frac{n_2}{V_2} + \frac{n_3}{V_3}} k_6 = 3600 \frac{(2.2-0.4) \cdot 0.3}{\frac{3}{0.7} + \frac{4}{1.4} + \frac{2}{0.7}} 0.85 = 165.24 \text{ м}^3 / \text{час}, \quad (6.20)$$

где приняты значения параметров:

толщина слоя суглинистого грунта  $h=0.3$  м;

ширина вальца (уплотняемой полосы)  $B=2.2$  м;

скорости поступательного движения катка составляют  $V_1=0.7$  м/с=2.52 км/ч,

(значение скорости определено рекомендациями нормативных документов и близко к максимальному для начального этапа и выполняется со слабой вибрацией или без вибрации),  $V_2=1.4$  м/с=5.04 км/ч,  $V_3=0.7$  м/с=2.52 км/ч;

количество проходов  $n=9$ ;

величина  $b=0.4$  м учитывает перекрытие следов катка при последующих проходах;

$k_6 = 0.85$  – коэффициент, учитывающий потери рабочего времени.

Соответственно, минимальная производительность может быть определена как

$$P_{з\max} = 3600 \frac{(B-b)h}{\frac{n_1}{V_1} + \frac{n_2}{V_2} + \frac{n_3}{V_3}} k_6 = 3600 \frac{(2.2-0.4) \cdot 0.3}{\frac{4}{0.55} + \frac{6}{1.1} + \frac{4}{0.55}} 0.85 = 87.62 \text{ м}^3 / \text{час}, \quad (6.21)$$

где приняты значения параметров:

толщина слоя суглинистого грунта  $h=0.3$  м;

ширина вальца (уплотняемой полосы)  $B=2.2$  м;

скорости поступательного движения катка составляют  $V_1=0.55$  м/с=1.98 км/ч,

(значение скорости определено рекомендациями нормативных документов и близко к минимальному для начального этапа и выполняется со слабой вибрацией или без вибрации),  $V_2=1.1$  м/с=3,96 км/ч,  $V_3=0.7$  м/с=1.98 км/ч;

количество проходов  $n=14$ ;

величина  $b=0.4$  м учитывает перекрытие следов катка при последующих

проходах;

$k_e = 0.85$  – коэффициент, учитывающий потери рабочего времени.

Расчеты для энергоэффективного катка следует проводить при тех же значениях параметров грунтового слоя. При этом каток считается способным варьировать как скорость движения катка, так и частоту силового воздействия. На начальном этапе уплотнения следует выбирать частоту  $f_1 = 40 - 45$  Гц, на завершающих проходах  $f_2 = 25 - 30$  Гц.:

$$P_9 = 3600 \left( \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{V_i} \right)^{-1} h(B-b)k_e = \frac{3600h}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{V_i} \right)} k_e = \frac{1652.4}{\left( \frac{2}{1.1} + \frac{4}{1} + \frac{3}{0.9} \right)} = 180,56 \text{ м}^3 / \text{час} \quad (6.22)$$

Скорости поступательного движения катка составляют  $V_1 = 1$  м/с = 3,6 км/ч, (значение скорости определено рекомендациями нормативных документов и близко к минимальному для начального этапа и выполняется со слабой вибрацией или без вибрации),  $V_2 = 1.1$  м/с = 3,96 км/ч,  $V_3 = 0.7$  м/с = 2,52 км/ч; количество проходов  $n = 9$ ;

При этом число проходов сохранилось неизменным по отношению к режиму работы исходного катка с максимальной производительностью. Таким образом оценка повышения производительности работы катка составляет 9%. Аналогичные результаты возможно получить для уплотнения несвязанных грунтов на примере супесчаных сред с учетом особенностей найденных соотношений параметров энергоэффективных режимов.

В экономическом расчете в виде аналога энергоэффективного дорожного катка принимается исходный каток RV-17 DT розничная цена которого на декабрь 2021 г. составляла около 6 700 000 руб. Он же принимается качестве базовой машины для изготовления эффективного катка.

#### 6.4.1 Оценка экономической эффективности использования энергоэффективных катков

Эксплуатационная производительность для исходного катка определим как полученную выше максимальную (6.20), составляющую

$$P_{\text{зmax}} = 165.24 \text{ м}^3 / \text{час},$$

а для энергоэффективного катка примем среднюю (6.22)

$$P_{\text{э}} = 180,56 \text{ м}^3 / \text{час}$$

Количество часов работы катка за год составляет:

$$T_{\text{Г}} = (T_{\text{с}} - D_{\text{в}} - D_{\text{р}}) t_{\text{см}} K_{\text{см}}, \quad (6.23)$$

где  $T_{\text{с}}$  – продолжительность строительного сезона для Омской области,

$T_{\text{с}} = 184$  дня;

$D_{\text{в}}$  – количество выходных и праздничных дней,  $D_{\text{в}} = 55$  дней;

$D_{\text{р}}$  – количество дней, в которые работа была невозможна;  $D_{\text{р}} = 6$ ;

$t_{\text{см}}$  – продолжительность смены,  $t_{\text{см}} = 8,2$  ч.

Получим для пятидневной рабочей недели:

$$T_{\text{экс год}} = (184 - 55 - 6) * 8.2 * 1.5 = 1513 \text{ ч/год.}$$

Отсюда годовая эксплуатационная производительность составляет

$$P_{\text{экс.г}} = P T_{\text{экс год}}, \quad (\text{П.1.3})$$

Для базового катка :

$$P_{\text{экс.г}} = 249984 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Для энергоэффективного катка:

$$P_{\text{экс.г}} = 273187 \text{ м}^3/\text{год}$$

#### Определение розничной цены

Учитывая модульную систему производства катков на заводе «Раскат» и, как следствие высокую степень унификации деталей, можно заключить, что цена  $C$

нового энергоэффективного катка, построенного на базе исходного RV-17 DT не должна значительно превышать стоимость аналога, составляя около 7000000 руб.

### Расчет удельных приведенных затрат

Удельные приведенные затраты будут определяться зависимостью:

$$K_z = \frac{a\Pi}{\Pi_{\text{экс год}}} \quad (6.24)$$

где  $a$  – коэффициент затрат на транспортировку машины с, принимаемый для обоих катков завода,  $a=1,05$ .

Для энергоэффективного катка:

$$K_z = \frac{1.05 * 7000000}{273187} = 26.9 \text{руб/м}^3,$$

Для базового катка:

$$K_z = \frac{1.05 * 6700000}{249984} = 28.14 \text{руб/м}^3$$

Стоимость машиномен для сравниваемых катков будет одинаковая, т. к. они отличаются только конструкцией вальцов и составляет  $C=1680$  руб.

Стоимость единицы продукции сравниваемых машин будет равна:

$$C_{\text{ед}} = \frac{C}{\Pi_{\text{см}}} = \frac{C}{t_{\text{см}} \Pi}$$

$\Pi_{\text{см}}$  - сменная производительность катка, мз/см.

Для энергоэффективного катка:

$$C_{\text{ед}} = \frac{1680}{8.2 * 180.56} = 1.13 \text{руб./мз.}$$

Для базового катка:

$$C_{\text{ед}} = \frac{1680}{8.2 * 165.24} = 1.239 \text{руб/мз.}$$

Удельные приведённые затраты для сопоставляемых машин составят:

$$Z_{\text{уд}} = C_{\text{ед}} + E_n K_{\text{уд}}, \quad (6.25)$$

где  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности,  $E_n=0,15$ .

Для энергоэффективного катка:

$$Z_{y\delta\epsilon} = 1.13 + 0.15 * 26.9 = 5.16 \text{ руб/м}^3.$$

Для базового катка:

$$Z_{y\delta\delta} = 1.239 + 0.15 * 28.14 = 5.46 \text{ руб/м}^3.$$

Экономический эффект определится:

$$\mathcal{E} = (Z_{y\delta\delta} - Z_{y\delta\epsilon}) \Pi_{\text{год}\epsilon} = (5.46 - 5.16) * 273187 = 81900 \text{ руб/год}.$$

Таким образом, годовой доход предприятия от использования энергоэффективного катка вместо отечественного базового катка составит не менее 81900 рублей. В том случае, если в качестве конкурирующей машины выбирается каток Hamm 3414 НТ с характеристиками, сопоставимыми с базовым катком, ценой 9500000 руб, то

$$K_z = \frac{1.05 * 9500000}{249984} = 39.90 \text{ руб/м}^3$$

$$Z_{y\delta\text{Hamm}} = 1.239 + 0.15 * 39.90 = 7.224 \text{ руб/м}^3.$$

$$\mathcal{E} = (Z_{y\delta\text{Hamm}} - Z_{y\delta\epsilon}) \Pi_{\text{год}\epsilon} = (7.224 - 5.16) * 273187 = 563\,858 \text{ руб/год}.$$

Это показывает перспективы использования перспективных конструкций энергоэффективных катков в целях реализации импортозамещающих технологий в дорожном строительстве.

## 6.5 Выводы по главе 6.

Развитие современных технологий дорожного строительства предусматривает, в первую очередь, повышение эффективности работы катков по уплотнению грунтовых сред, оцениваемой по достижению грунтом слоя требуемой плотности за минимальное время с минимальными затратами ресурсов и энергии.

Исследования показали, что минимизация потерь при передаче энергии слою не исчерпывает возможностей повышения энергоэффективности работы

уплотняющих машин. Анализ, проведенный в работе, выявил возможности снизить потери мощности, рассеиваемые в рабочих органах уплотняющих машин на динамических режимах уплотнения. Эффект повышения энергоэффективности может быть достигнут за счет использования предлагаемых в работе перспективных конструкций рабочих органов катков, реализации перспективных режимов уплотняющего воздействия, а также применения энергоэффективных конструкций генераторов периодического силового воздействия.

1. Предложена конструкция комбинированного рабочего органа вибрационного катка (Рис. 6.6). Особенностью конструкции является компенсирующий валец, использующий часть энергии генератора колебаний, рассеивающуюся в раме катка, в том числе и на создание паразитных вибраций, для дополнительного воздействия на поверхность грунтового слоя с оптимальной частотой.

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

3. Разработана конструкция гидрошинного рабочего органа катков, 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.

4. На основании результатов исследований предложена усовершенствованная методика использования, гладковальцовых вибрационных катков с учетом требования энергоэффективности процесса уплотнения.

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.

## 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. Определены 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 рабочих органов катков, 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% и. 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 энергоэффективных деформируемых рабочих органов, допускающих широкие возможности адаптирования;
2. Разработку линейки 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 энергоэффективной работы катка.

Автор выражает особую благодарность и глубокую признательность доктору технических наук, профессору Владиславу Борисовичу Пермякову за доброжелательную критику, множество ценных замечаний и советов, способствовавших решению задач, поставленных в рамках настоящей работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абраменков, Э. А. Совершенствование технологий уплотнения на базе аналитических исследований напряжений в грунтовых средах/ Э. А. Абраменков, Д. Э. Абраменков, А. В. Грузин// Известия высших учебных заведений. – Новосибирск, 2008. – № 4. – С. 73–76. – (Строительство).
2. Абраменков, Э. А. Обоснование и выбор оборудования для исследований взаимодействия штампов с грунтом / Грузин А.В., Абраменков Э.А. //Известия высших учебных заведений. Строительство. Новосибирск, 2011. № 4. С. 83–92.
3. Азюков, Н. А. Обоснование параметров виброплиты с гидрообъемным вибровозбудителем для уплотнения асфальтобетонной смеси: дис.... канд. техн. наук: 05.05.04 / Н. А. Азюков; СибАДИ. – Омск, 1986. – 177 с.
4. Анфимов, В. А. Исследование комплексного уплотнения грунтов машинами на пневматических шинах: дис... канд. техн. наук/ В.А. Анфимов; ХАДИ. – Харьков, 1970. – 189 с.
5. Дорожные машины: в 2–х частях. Ч.II. Машины для устройства дорожных покрытий/ К.А. Артемьев, Т.В. Алексеева, В.Г. Белокрылов [и др.] – М.: Машиностроение, 1982. – 396 с.
6. Бабичев, А.П. Вибрационная обработка деталей. Изд. 2–е, перераб и доп. М.: Машиностроение, 1974. – 134 с.
7. Бабичев, А.П. Исследование технологических основ процессов обработки деталей в среде колеблющихся тел с использованием низкочастотных вибраций: Дис. ...докт. техн. наук. Ростов н/Д., 1975. – 330 с.
8. Бабков, В. Ф. Сопротивление грунтов деформированию с различными скоростям /В. Ф. Бабков// Труды МАДИ. – М., 1957. – Вып. 16.– С. 107–120.
9. Бабков, В. Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов: учеб. пособие/ В. Ф. Бабков, В. М. Безрук. – М.: Высшая школа, 1976. – 328 с.: ил.
10. Баженов, В.Г. Математическое моделирование нестационарных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред. /В.Г. Баженов, В. Л.Котов. –М : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 208 с.

11. Баженов, В. Г. Идентификация параметров динамической сжимаемости и сопротивления сдвигу грунтовой среды при внедрении ударников / В. Г. Баженов, В. Л. Котов // Доклады Академии наук. – 2006. – Т. 408. – № 3. – С. 333-336.
12. Экспериментально-теоретический анализ нестационарных процессов взаимодействия деформируемых ударников с грунтовой средой / В. Г. Баженов, В. Л. Котов, С. В. Крылов [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42. – № 6(250). – С. 190-198.
13. Баловнев, В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно–строительных машин: учеб. пособие для студентов вузов / В. И. Баловнев. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.: ил.
14. Баловнев, В.И. Определение оптимальных параметров и выбор дорожно–строительных машин методом анализа четвертой координаты./ В.И.Баловнев. – М., 2014.
15. Баловнев, В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно–строительных машин: учеб. пособие для вузов / В.И. Баловнев. – 2–е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1994. – 432 с.
16. Баловнев, В.И. Интеллектуализация строительной техники – важный фактор повышения качества и сокращения криминализации работ / В.И. Баловнев // Механизация строительства. – 2012. – № 11. – С. 8–10.
17. Дорожно–строительные машины и комплексы: учебник для вузов / В.И. Баловнев, С.В. Абрамов, В.И. Мещеряков [и др.]; под общей ред. В.И. Баловнева. – М.; Омск: СибАДИ, 2001. – 425 с.
18. Баловнев, В.И. Определение параметров дорожных катков / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов, Г.В. Кустарев //Механизация строительства. – 2012. – № 2. – С. 6–11.
19. Баркан, Д. Д. Экспериментальные исследования вибровязкости грунта/ Д. Д. Баркан// ЖТФ. – 1948. – Т. 8. – Вып. 5.– С.701 – 706.
20. Баркан, Д. Д. Динамика оснований и фундаментов/ Д. Д. Баркан. – М.: Стройвоенмориздат, 1948. – 411 с.
21. Баркан, Д. Д. Теория поверхностного уплотнения грунтов/ Д. Д.

Баркан, О. Я. Шехтер // Применение вибрации в строительстве. – М., 1962. – С. 5–26.

22. Батраков, О. Т. Уплотнение грунтовых оснований катками на пневматиках/ О. Т. Батраков// Труды/ ХАДИ.– Харьков, 1954. – Вып. 17. – С. 55–59.

23. Батраков, О. Т. Распределение контактных давлений по следу пневматического колеса / О. Т. Батраков. – М.: Автотрансиздат, 1956. –199 с.

24. Батраков, О. Т. Сопротивление грунтов при уплотнении/О. Т. Батраков // Материалы совещания по закреплению и уплотнению грунтов. – Киев: Изд-во Акад. стр-ва и архит., 1962. – С. 12–15.

25. Батраков, О. Т. Оценка вязких свойств грунтов при вдавливании штампа / О. Т. Батраков //Труды ХАДИ. – Харьков, 1963. – Вып. 28. – С. 49–53.

26. Батраков, О. Т. Вязкие свойства грунтовых оснований дорожных одежд автомобильных дорог/ О. Т. Батраков// Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1964. – №4. – С. 74–78.

27. Безрук, В. М. Геология и грунтоведение/ В. М. Безрук. – М.: «Недра», 1977. – 256 с.

28. Бидерман, В. Л. Автомобильные шины/ В. Л. Бидерман [и др.] – М.: Автотрансиздат, 1963. – С. 18–19.

29. Бируля, А. К. Деформация и уплотнение грунта при качении колеса/ А. К. Бируля//Труды ХАДИ. – Харьков, 1950. – Вып. 6. – С. 7–11.

30. Бируля, А. К. Уплотнение четырёхфазного грунта / А. К. Бируля// Труды ХАДИ. – Харьков, 1953. – Вып. 10. – С. 18–21.

31. Бируля, А. К. Эксплуатация автомобильных дорог/А. К. Бируля. – М.: НТИ Автотрансп. лит, 1956. – 340 с.

32. Бируля, А. К. К теории качения пневматического колеса по деформируемой поверхности/ А. К. Бируля//Труды ХАДИ. – Харьков, 1959. – Вып. 21. – С. 23–27.

33. Бируля, А. К. Эксплуатация автомобильных дорог/А. К. Бируля. – М.: НТИ Автотрансп. лит, 1956. – 340 с.

34. Бируля, В. И. Взаимодействие компонентов трёхфазного грунта при

его уплотнении/ В. И. Бируля// Труды/ ХАДИ. – Харьков, 1950. – Вып. 10. – С. 16–19.

35. Блехман, И. И. Вибрационное перемещение/ И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 410 с.

36. Блехман, И.И. Действие вибрации на нелинейные механические системы (Механика медленных движений, виброперемещение, виброреология) // Справ. Вибрации в технике, т.2. –М.: Машиностроение, 1979.–С. 240–262

37. Блехман, И.И. Движение материальной частицы по вибрирующей шероховатой поверхности // Справ. Вибрации в технике, т.4. –М.: Машиностроение, 1981. – С. 13–62

38. Блехман, И.И. Поведение сыпучих тел под действием вибраций / И.И. Блехман, Э.Э. Лавендел, И.Ф. Гончаревич // Справ. Вибрации в технике, т.4, – М., Машиностроение, 1981. С. 78–98

39. Патент 2079610 Российская Федерация, МПК7 E02F5/12, E01C19/28 Самоходный вибрационный каток с возбудителем комбинированного действия/ М.Р. Буренюк, О.М. Карпов, А.А. Цуканов, В.Н. Григоров заявитель и патентообладатель Московское высшее военное дорожное инженерное училище.– № 94033300/03; заявл. 14.09.1994; опуб. 20.05.1997

40. Бурый, Г. Г. Обоснование режимных параметров вибрационных катков с учетом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации: дис. ... кандидата технических наук: 05.05.04 / Бурый Григорий Геннадьевич;– Омск, 2016.– 169 с.

41. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для строительных вузов/ С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с., ил.

42. Авторское свидетельство СССР SU 526398, МПК В06В1/16. Возбудитель колебаний. / А.И. Горский, Е.Б. Иванов–Эмин, Г.С. Табуринский, А.Р. Голованов. Опубликовано 05.08.1978. Бюл. №5

43. ГОСТ 30416–2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения, – М., 2013

44. Гельфандбейн, А.М. Натурные исследования осадок поверхности связного грунтового основания, нагруженного штампом / А.М. Гельфандбейн,

Л.А. Шелест // Основания, фундаменты и механика грунтов. –1974. – № 2. – С. 27 – 29.

45. Герсеванов, Н. М. Теоретические основы механики грунтов и их практическое применение/ Н. М. Герсеванов, Д. Е. Польшин. – М.: Госстройиздат, 1948. – 551 с.

46. Гладков, В.Ю. Способ определения напряженно–деформированного состояния зернистых систем от нагрузки, передаваемой через жесткий круглый штамп / В.Ю. Гладков // «Новое в проектировании конструкций дорожных одежд»: труды СоюздорНИИ. – М. : СоюздорНИИ, 1988. – С. 65 – 79.

47. Гольдштейн, М.Н. Некоторые вопросы развития механики грунтов / М.Н. Гольдштейн // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1960. – № 1. – С. 8 – 10.

48. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М. : Стройиздат, 1971. – 367 с.

49. Горельшев, Н. В. Технология и организация строительства автомобильных дорог/ Н. В. Горельшев. – М., 1992. – 551с.

50. Гребенщиков, В. М. Экспериментальные исследования деформации шины при движении автомобиля по мягким грунтам/ В. М. Гребенщиков// Автомобили и тракторная промышленность. – 1956. – №10. – С. 18–20.

51. Григорян, С.С. Об основных представлениях динамики грунтов // ПММ. 1960. Т. 24, Вып. 6. С. 1057–1072.

52. Дерягин, Б.В. Поверхностные силы./ Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. –М: Наука, 1985 – 398 с.

53. Доценко, А.И. Разработка и внедрение комплекса ресурсосберегающих технологий строительства дорожно–транспортных сооружений повышенной долговечности/ А. И. Доценко, А.В.Руденский// Дороги и мосты. 2011. № 1. С. 38–45.

54. ДУ–97. Каток вибрационный двухосный двухвальцовый ДУ–96. Каток вибрационный комбинированный двухосный ДУ–97. Руководство по эксплуатации. ДУ–96.000.000 РЭ2. Электронный ресурс: [http://oao-raskat.ru/wp-content/uploads/Ruk po ekspl s perechnem DSE katkov DU-96 97.pdf](http://oao-raskat.ru/wp-content/uploads/Ruk_po_ekspl_s_perechnem_DSE_katkov_DU-96_97.pdf)

55. Патент 14541 Республика Казахстан МПК, В06В 1/16, Планетарный вибровозбудитель/ Дудкин М.В. Заявитель и патентообладатель Восточно–Казахстанский государственный технический университет имени Д.Серикбаева
56. Патент 22221 Республика Казахстан МПК: В06В 1/16, Планетарный вибровозбудитель/М. В. Дудкин. Заявитель и патентообладатель Восточно–Казахстанский государственный технический университет имени Д.Серикбаева
57. Дудкин, М.В. Динамический анализ эллиптического планетарного вибровозбудителя для дорожных вибрационных катков. / М.В. Дудкин, П.С. Кузнецов//Журнал «Вестник ВКГТУ». № 1, 2005. – 7 с
58. Авторское свидетельство СССР SU 1727930, Планетарный вибровозбудитель. / А.Б. Ермилов, М.В. Дудкин. Опубликовано 23.04.1992. Бюл. №29
59. Жиркович С. В. Уплотняющие машины в строительстве и производстве строительных изделий/ С.В. Жиркович, Н.И. Наумец// Теория и расчеты основных параметров: в 3 ч. Ч. 3. – Куйбышев, 1962. — 444 с.
60. Захаренко, А. В. Обоснование амплитуды колебаний вибраторов и рабочих скоростей дорожных катков/ А. В. Захаренко, С. В. Савельев// Актуальные проблемы повышения надёжности и долговечности автомобильных дорог и искусственных сооружений на них: сб. тр. Всероссийской научно–практ. конф. 22– 25 апр. 2003 г. – Барнаул: Изд–во АлтГТУ, 2003. – С. 165–168.
61. Захаренко, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: дис.... д–ра техн. наук: 05.05.04/ А. В. Захаренко; СибАДИ. – Омск, 2005. – 320 с.
62. Зедгенизов, В. Г. Методология создания машин для прокладки гибких подземных коммуникаций: дис.... д–ра техн. наук:05.05.04. В. Г. Зедгенизов; ИрГТУ. – Иркутск, 2005. 234 с.
63. Патент РФ 2015748, МПК В06В01/00. Планетарный вибровозбудитель./ Ермилов А.Б., Дудкин М.В. , Опубликовано 15.07.1994
64. Иванов Н. Н. Требования к уплотнению грунтов и земляных сооружений/ Н. Н. Иванов// Механизированное уплотнение грунтов в строительстве. – М.: Госстройиздат, 1962. – С. 31–33.



65. Патент № 2381078 С2 Российская Федерация, МПК В06В 1/00. Способ получения направленных механических колебаний и устройство для его осуществления : № 2007148177/28 : заявл. 24.12.2007 : опубл. 10.02.2010 / И. К. Исаев, М. Д. Герасимов ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (БГТУ им. В.Г. Шухова).

66. Иванченко, С.Н. Научные основы формирования рабочих органов дорожных машин для уплотнения асфальтобетонных смесей : дис. ... д-ра техн. наук.:05.05.04/ С.Н.Иванченко. – СПб., 1997. – 482 с.

67. Иванченко, С.Н. Тенденции развития уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчиков / С.Н. Иванченко, В. В. Сидорков, А. А. Шестопапов // Прогрессивные конструкции и технологии в машиностроении : сб. науч. тр. студентов и аспирантов. МГСУ. – М., 1996. – № 7. – С. 51–55.

68. Патент № 2078869 С1 Российская Федерация, МПК Е01С 19/48. Уплотняющий рабочий орган асфальтоукладчика : № 95111660/33 : заявл. 06.07.1995 : опубл. 10.05.1997 / А. А. Шестопапов, Э. И. Деникин, С. Н. Иванченко, В. В. Сидорков.

69. Ишлинский, А. Ю. Математическая теория пластичности/ А. Ю. Ишлинский, Д. Д. Ивлев. – М.: Изд-во: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 704 с.

70. Калужский, Я. А. Закономерности укатки грунтовых слоёв жёсткими катками/ Я. А. Калужский// Труды ХАДИ. – Харьков, 1959. – Вып. 20. – С. 34–36.

71. Калужский, Я. А. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд: учеб. пособие/ Я. А. Калужский, О. Т. Батраков. – М.: Транспорт, 1971. – 159 с.

72. Кнороз, В. И. Работа автомобильной шины/ В. И. Кнороз. – М.: Автотрансиздат, 1957. – 134 с.

73. Козлов, В.В. Биллиарды. Генетическое введение в динамику систем с ударами. /В.В.Козлов, Д.В. Трещев. – М.: Изд.МГУ, 1991. – 168 с.

74. Козлов, В. В., Лагранжева механика и сухое трение/В.В.Козлов// Нелинейная Динамика, 2010, т. 6, № 4, с. 855–868. DOI:10.20537/nd1004009

75. Коротин, О. Ю. Самоходные катки на пневматических шинах: обзор/ О. Ю. Коротин, Л. А. Антипов, А. И. Путк. – М.: ЦНТИИТЭстроймаш, 1968. – 60

с.

76. Костельов, М. П. Возможности и уплотнение виброкатками грунтов различного типа и состояния/ М. П. Костельов// Дорожная техника: каталог–справочник.– СПб.: Славутич, 2004. – С. 72–82.

77. Костельов, М.П. «Умные» виброкатки для дорожников/ М. П. Костельов//Дорожная техника: каталог–справочник.– СПб.: Славутич, 2006. – С. 30–62.

78. Костельов, М. П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками/ М.П.Костельов// Дорожная техника: каталог–справочник. – СПб.: Славутич, 2008. – С. 40 – 47.

79. Красников, Н. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. /Н.Д.Красников.– Л.: Стройиздат, 1970. 238 с.

80. Кустарев, Г. В. Анализ факторов, влияющих на качество процесса уплотнения/ Г. В.Кустарев, С. А. Павлов, П. Е. Жарцов// Механизация строительства. – 2013. – № 4 (826). – С. 6–10.

81. Ландау, Л.Д., Теоретическая физика. /Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. 4–е изд., испр. в 10 т. Т. 1. –М.: Наука. Гл. ред. физ.–мат. лит., 1988. – 216 с.

82. Лебедев, А. Ф. Уплотнение грунтов при различной их влажности/ А. Ф. Лебедев. – М.: Стройвоенмориздат, 1949. – 140 с.

83. Малиновский, Е. Ю. Синтез уравнений движения и анализ динамики механизмов строительных и дорожных машин: сб. науч. тр./ Е. Ю. Малиновский. – М.: ВНИИСтройдормаш, 1988. – №73. – С. 3 – 14.

84. Малышев, А. А. Качение колеса с пневматической шиной по деформируемой поверхности с образованием колеи/ А. А. Малышев// Труды МАДИ. – М., 1958. – Вып. 22. – С. 44 – 45.

85. Методические рекомендации по повышению эффективности использования виброкатков при сооружении земляного полотна автомобильных дорог, –М.: СоюзДорНИИ, 1987.–37 с.

86. Мещеряков, В. А. Нейросетевое адаптивное управление тяговыми режимами землеройно–транспортных машин: монография. – Омск: ОмГТУ, 2007. – 219 с.

87. Механика гранулированных сред. Теория быстрых движений./ Сборник статей под ред. И.В.Ширко. –М.: Мир, 1985. – 280 с.

88. Патент № 2631011 С1 Российская Федерация, МПК В06В 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 образования "Омский государственный технический университет".

89. 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".

90. 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".

91. 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)".

92. 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)".

93. 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).

94. Михеев, В.В. Исследования напряженно–деформируемого состояния упруго–вязкой среды при вибрационном нагружении. / В.В.Михеев, С.В. Савельев//Вестник СибАДИ. – 2012. –№3(25). –С. 83–86.

95. Михеев, В.В. Исследования деформирования упруго–вязкой среды при ударном нагружении. /В.В.Михеев, С.В. Савельев//Вестник СибАДИ. – 2012. –№4(26). –С. 100–103.

96. 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

97. 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. .

98. Михеев, В. В. Использование деформативных свойств пневмошин в вибрационных машинах / В. Б. Пермяков, С. В. Савельев, В. В. Михеев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 11. – С. 56-58.

99. Михеев, В.В. Математическая модель процесса динамического деформирования уплотняемой упруго вязкой пластичной среды /В.В.Михеев, С.В. Савельев, А.С. Белодед //Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал. – Омск: СибАДИ. – № 3(49). – 2016 г. С. 99 – 104.

100. Михеев, В.В. Моделирование характеристик деформируемых грунтов в процессе их уплотнения цилиндрическими рабочими органами катков /В.В. Михеев, С.В. Савельев // Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал. –

Омск: СибАДИ. – № 4(50). – 2016 г. С. 29 – 36.

101. 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 СибАДИ: Научный рецензируемый журнал. – Омск: СибАДИ. – № 2 (54). – 2017 г. С. 28–36.

102. 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. – № 2(57). – 2017. – С. 51–59

103. Михеев, В.В. К вопросу о повышении энергоэффективности вибровозбудителя для дорожных вибрационных катков /В.В.Михеев, С.В. Савельев, М.К. Шушубаева // Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал. – Омск: СибАДИ. – № 1 (59). – 2018. С. 46–54.

104. 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. 36–45.

105. 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.

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

107. 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.

108. 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.

109. 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. 44

110. 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.

111. Нагаев, Р.Ф. Механические процессы с повторными затухающими соударениями. /М.: Наука, 1985. – 200 с.

112. Нагаев, Р.Ф. К теории соударения бильярдных шаров/ Р.Ф.Нагаев , Н.А. Холодилин // Изв. РАН, Механика твердого тела. 1992 – №6. – С. 48–55

113. Налимов В. В. Теория эксперимента/ В. В.Налимов. – М.: Наука, 1971. – 260 с.

114. Налимов, В. В. Логические основания планирования эксперимента/ В. В. Налимов, Т. И. Голикова. – Изд. 2–е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1980. – 152 с.

115. Овчинников, П. Ф. Виброреология/ П. Ф. Овчинников. – Киев: Наук. Думка, 1983. – 272 с.

116. Островцев, Н. А. Самоходные катки на пневматических шинах/ Н. А. Островцев. – М: Машиностроение, 1969. – 104 с.

117. Пермяков, В. Б. Совершенствование теории, методов расчета и конструкций машин для уплотнения асфальтобетонных смесей: дис. ... д–ра техн. наук.: 05.05.04 / В.Б. Пермяков; СибАДИ. – Омск, 1990. – 485 с.

118. Пермяков, В. Б. Перспективы развития конструкций асфальтоукладчиков и дорожных катков/ А. В. Захаренко, В. Б. Пермяков, А. С. Семёнов, В. М. Максимов// Строительные и дорожные машины. – 2012 . – №2.– С. 19 – 23.

119. Пермяков, В. Б. Комплексная механизация строительства: учебник для строительных и автомобильно–дорожных институтов/ В. Б. Пермяков.– М.: Высшая школа, 2004. – 540 с. 87.

120. Пермяков, В. Б. Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): учеб. пособие/ В. Б. Пермяков [и др.]; под ред. проф. В. Б. Пермякова.– Омск: изд–во СибАДИ, 2007. – 440 с. Гл. 20.

121. Пиппард, А. Физика колебаний / А. Пиппард, А. Н. Матвеев . – М. : Высш. шк., 1985 . – 456 с. + Библиогр.: с. 450–453.

122. Покровский, Г. И. Исследования по физике грунтов/ Г. И. Покровский. – М.–Л.: ОНТИ, 1937. – 48 с.

123. Покровский, Г. И. Трение и сцепление в грунтах/ Г. И. Покровский. –М.–Л.: Стройиздат, 1941. – 60 с.

124. Работнов, Ю. Н. Реология. Теория и приложения/ под ред. Ф. Эйрика; пер. с англ.; под общ. ред. Ю. Н. Работнова, П. А. Ребиндера. – М.: Изд–во иностр. лит–ры, 1962. – 824 с.

125. Ребиндер, П. А. Физико–химическая механика как основа закрепления грунтов в дорожном строительстве и производстве строительных материалов на основе грунтов/ П. А. Ребиндер// Труды совещания по теоретическим основам мелиорации грунтов. – Изд–во МГУ, 1961. – 181 с.

126. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико–химическая механика. Избранные труды. / П. А. Ребиндер. – Москва, Наука, 1979. – 384 с.

127. Савельев, С. В. Развитие теории и совершенствование конструкций вибрационных катков с пневмошинными рабочими органами : диссертация ... доктора технических наук : 05.05.04 / С. В. Савельев. – Омск, 2014. – 326 с. : 152 ил.

128. Патент № 2341609 С2 Российская Федерация, МПК E01C 19/28.

Валец дорожного катка : № 2006139545/03 : заявл. 07.11.2006 : опубл. 20.12.2008 / С. В. Савельев; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно–дорожная академия (СибАДИ)" .

129. Савельев, С. В. Экспериментальные исследования «активной области» деформируемой среды при вибрационном уплотнении/ С. В. Савельев, Г. Г. Бурый// Вестник СибАДИ. – Омск: СибАДИ, 2012. – № 5 (27). – С. 88 – 95.

130. 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.

131. Савельев, С. В. Применение алгоритма определения параметров вибрационных катков с учетом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации/С.В. Савельев, Г.Г Бурый, И.К. Потеряев//Вестник СибАДИ. – 2015. –№6. –С 32 –37.

132. Савельев, С. В. Уплотнение упруговязкопластичных смесей: особенности теории и расчёта : Монография: [Электронный ресурс] / К. В. Беляев, В. С. Серебренников, С. В. Савельев. – Омск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно–дорожная академия (СибАДИ)", 2014. – 148 с.

133. Руководство по эксплуатации вибротрамбовки «Импульс VT80» [http://smm.tradicia-k.ru/images/products/files/vibrotrambovka\\_impulse.pdf](http://smm.tradicia-k.ru/images/products/files/vibrotrambovka_impulse.pdf)

134. Сагомоян А.Я. Проникание. /А.Я. Сагомоян. –М.: Изд–во МГУ, 1974. 299 с.

135. Самарский, А. А. Численные методы: Учеб, пособие для вузов. /А. А. Самарский, А. В. Гулин. –М.: Наука. Гл. ред. физ–мат. лит., 1989.– 432 с.– ISBN 5–02–013996–3.

136. Синай, Я. Г. Динамические системы с упругими отражениями. Эргодические свойства рассеивающих бильярдов /Я.Г. Синай// УМН, 1970. Т.25. – №2. – С. 141–192



137. СНиП 3.06.03–85: Строительные нормы и правила. Автомобильные дороги. – М.: ЦНТП Госстроя СССР, 1986: Срок введ. в действие 1.01.86/ Госстрой СССР. – 112 с. (Актуализированная редакция СП 78.13330.2012)

138. СТО НОСТРОЙ 2.25.23–2011. Автомобильные дороги. Устройство оснований дорожных одежд. Часть 1. Механизация земляных работ при сооружении земляного полотна автомобильных дорог. –М: Изд.–во БСТ .–73 с.

139. Сюрье, П.Л. Определение толщины слоя грунта, уплотняемого пневмоколесными катками, с учетом его напряженного состояния: дис. ... канд. техн. наук/ П.Л. Сюрье.– Таллин, 1984. – 290 с.

140. Патент № 2509839 С2 Российская Федерация, МПК E01C 19/48. Способ уплотнения горячей асфальтобетонной смеси укаткой посредством дорожного катка: № 2012120598/03: заявл. 13.07.2012: опубл. 20.03.2014/ С. А. Тарантин, Э. И. Деникин, Ю. Д. Нетеса, А. А. Шестопапов.

141. Тарасов, В. Н. Грузоподъемность шин с жидким балластом/ В. Н. Тарасов// Тракторы и сельхозмашины. – 1965. – №8. – С. 35 – 38.

142. Тарасов, В. Н. Теория удара в теоретической механике и ее приложение в строительстве: учеб. пособие/ В. Н. Тарасов, Г. Н. Бояркин.– Омск: ОмГТУ, 1999. – 120 с.

143. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле/ С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер; под ред. Э. И. Григолюка; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

144. Грунтоведение // Под ред. В.Т.Трофимова – 6–е изд., перераб. и дополн. (серия "Классический университетский учебник") / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв, Е. А. Вознесенский [и др.] – М.: Изд–во МГУ и "Наука", 2005. – 1024 с.

145. Ульянов, Н. А. Основы теории и расчета колесного движителя землеройных машин / Н. А. Ульянов. – М.: Машгиз, 1962. – 208 с.

146. Филиппов, Б. И. Динамические характеристики грунтового основания при соударении с жестким штампом/ Б. И. Филиппов// Автомобильные дороги. – 1966. – №5. – С.27 – 28.

147. Флорин, В.А. Основы механики грунтов. Общие зависимости и напряженное состояние сооружений / В.А. Флорин. – Л. : Госстройиздат, 1959. –

Т. 1. – 357 с.

148. Флорин, В.А. Основы механики грунтов. Деформация и устойчивость оснований сооружений / В.А. Флорин. –Л.: Госстройиздат, 1961. – Т 2. – 543 с.

149. Форсблад, Л. Вибрационное уплотнение грунтов и оснований/ Л. Форсблад; пер. с англ. И. В. Гагариной. – М.: Транспорт, 1987. – 188 с.

150. Харари, Ф. Теория графов. / Ф. Харари –М.:Мир, 1973.

151. Хархута, Н. Я. Уплотнение грунтов дорожных насыпей/ Н. Я. Хархута, Ю. М. Васильев, Р. К. Охраменко. – М.: Автотрансиздат, 1958. – 144 с.

152. Хархута, Н. Я. Влияние давлений в шинах катков на уплотнение грунтов/ Н. Я. Хархута//Строительство и дорожное машиностроение. – 1959. – №11. – С. 23 – 25.

153. Хархута, Н. Я. Требования к машинам для уплотнения грунтов в связи с повышением норм плотности/ Н. Я. Хархута // Механизированное уплотнение грунтов в строительстве. – М.: Госстройиздат, 1962. – С. 34 – 35.

154. Хархута, Н. Я. Влияние физико–механических свойств грунтов естественных оснований на их устойчивость и уплотнение/ Н. Я. Хархута, Ю. М. Васильев, В. М. Иевлев// Материалы Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов: Научно–исследовательская лаборатория гидрогеологич. и инженерно–геологич. проблем Грузинск. политехнич. ин–та им. В. И. Ленина. – Тбилиси, 1964. – С. 67 – 69.

155. Хархута, Н. Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог/ Н. Я. Хархута, Ю. М. Васильев. – М: Транспорт, 1975 – 285 с.

156. Цытович, Н. А. Методы уплотнения грунтов/ Н. А. Цытович// Материалы Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов: Научно–исследовательская лаборатория гидрогеологич. и инженерно–геологич. проблем Грузинск. политехнич. ин–та им. В.И. Ленина. – Тбилиси, 1964. – С. 81 – 82.

157. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1983. – 288 с.

158. Чабуткин, Е. К. Рекомендации по выбору дорожных катков и

назначению режимов работы под условия строительства / Е. К. Чабуткин, Н. Е. Тарасова // Дороги и мосты. – 2017. – № 1(37). – С. 4.

159. Шевцов, С. Н. Моделирование динамики гранулированных сред при вибрационной отделочно–упрочняющей обработке : диссертация ... доктора технических наук : 01.02.06, 05.02.08./С.Н. Шевцов, Ростов–на–Дону, 2001.– 322 с.: ил. РГБ ОД, 71 01–5/517–7

160. Патент на полезную модель № 169573 U1 Российская Федерация, МПК E01C 19/26. Дорожный каток : № 2016135163 : заявл. 29.08.2016 : опубл. 23.03.2017 / А. А. Шестопапов, Э. И. Деникин, Т. И. Габдрахманов.

161. Щербаков, В. С. Составление структурных схем землеройно–транспортных машин как объектов автоматизации учеб. пособие/ В. С. Щербаков. – Омск: Изд–во СибАДИ, 2001. –47 с.

162. Яблонский, А. А. Курс теории колебаний: учеб. пособие для студентов вузов/ А. А. Яблонский, С. С. Нореико. – Изд. 3–е, испр. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – 248 с.

163. Bai, Jianyu Analysis and Simulations of Inertia Force in Ultra High Speed Stamping Machine / Jianyu Bai, Senlin Tong, Zaihe Yu, Di Zheng //Information Engineering (ICIE), WASE International Conference. –2010. –Vol. 3, –P. 238–243. DOI: 10.1109/ICIE. 2010.234

164. Bideau, D. Disorder and Granular Media. / D. Bideau, A.Hansen. Elsevier.–1993. 178 P.

165. Bjerrum, L. Shear strength of fine sand./L. Bjerrum et al . // Proc . 5th . Int. Conf . Soil. Mech. Found. Engg. –1961. –Vol. 1, P. 29–39 .

166. Brandl, H. Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials. /H.Brandl, D.Adam//14th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – Hamburg. –1997 P. 31–36.

167. Brown, R.L., Richards J.C. Principles of powder mechanics./R.L.Brown, J.C.Richards–Oxford: Pergamon Press. –1970. –420 P.

168. Coulomb, C. A. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemesde statique relatifs, a la architecture. / C. A.Coulomb //Mem. Acad. Roy. Div. Sav. –1776. –Vol. 7, –P. 343–387

169. Diestel, R. Graph Theory. / R. Diestel, –Berlin:Springer, 1997. –2016.
170. Drucker, D.C. Relations of experiments to mathematical theories of plasticity. /D.C. Drucker//Journal of Applied Mechanics. –1949. –Vol. 16, –PP. 349–357.
171. Drucker, D.C Soil mechanics and plastic analysis of limit design. / D.C.Drucker, W. Prager //Quarterly of applied mechanics. –1952. –Vol. 10. –№2. PP. 157 – 165.
172. Dobrescu, C.–F. Highlighting the Change of the Dynamic Response to Discrete Variation of Soil Stiffness in the Process of Dynamic Compaction with Roller Compactors Based on Linear Rheological Modeling. / C.–F. Dobrescu //Applied Mechanics and Materials. –2015.–801. PP.242–248. 10.4028/www.scientific.net/AMM.801.242.
173. Dobrescu, C.–F. Optimization of Vibro–Compaction Technological Process Considering Rheological Properties./ C.–F. Dobrescu, E. Brăguță. // Acoustics and Vibration of Mechanical Structures–AVMS–2017. Springer Proceedings in Physics,–Vol. 198. –Cham.: Springer. –PP 287–293. DOI:10.1007/978–3–319–69823–6\_34.
174. Fervers, C.W. Improved FEM simulation model for tire–soil interaction./ C.W. Fervers // Journal of Terramechanics. –2004. –Vol. 41.–PP 87–100.
175. Forssblad, L. Vibratory Compaction in the Construction of Roads, Airfields, Dams, and Other Project. Research Report No. 8222. /L. Forssblad//–Sweden: Dynapac, 1977. –171 P.
176. Forssblad, L. Investigations of soil compaction by vibration/ L. Forssblad. Royal Swedish Academy of Engineering Sciences.– Stockholm, 1965.
177. Fratta, D. Effective Depth of Soil Compaction in Relation to Applied Compactive Energy, /D. Fratta, K.–S. Kim.University of Wisconsin–Madison, WisDOT ID no. 0092–08–11 February 2015
178. Grigorian, S.S. One–dimensional quasi–statical motions of soil. / S.S. Grigorian , F.L. Chernous'ko //Journal of Applied Mathematics and Mechanics. –1961. –Vol. 25. –№ 1. –PP. 119–137.
179. Hedekel, R. Some notes of pneumatic tyres/ R. Hedekel// Aircraft Engeneering. – 1944. – Vol. XVI.– № 179.

180. Kézdi, A. Erddrucktheorien./ A. Kézdi. –Berlin–Göttingen–Heidelberg: Springer Verlag. –1962.
181. Kloubert, H.J. New intelligent compaction system for vibratory rollers. Report for IRF. / H.J. Kloubert. –Paris: IRF. –2001.
182. Kopf, F. Modelling and simulation of heavy tamping dynamic response of the ground./ F. Kopf, I. Paulmichl, D. Adam // From Research to Design in European Practice, Bratislava, Slovak Republic, June 2–4. –2010.
183. Patent 6044710 A USA. Elliptical vibratory apparatus./ Y. Kurita, Y. Muragish, H. Yasuda. –1998.
184. Masayuki, S. Laboratory Investigation into Control of Soil Compaction by Resistivity/S.Masayuki, M.Tamotsu, // Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka, Japan, June 21–26, –2009.
185. Massarsch, K.R. Vibratory compaction of coarse–grained soils. /K.R. Massarsch, B.H. Fellenius, //Canadian Geotechnical Journal, –N39(3). –PP.695–709.
186. Massarsch, K. R. Determination of Shear Modulus of Soil from Static and Seismic Penetration Testing. / K. R. Massarsch, G. Tekn, //Jubilee Volume TU of Athens. –2015.
187. 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. Hong Kong CRC Press, –PP. 155–161. DOI: 10.1201/b18415–36.
188. 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.
189. 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. – PP. 102–104. – DOI 10.3103/S1068798X15020203.
190. 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. – PP. 149–154. – DOI 10.1007/s42417–018–0025–4.

191. 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

192. Mikheyev, V. V. Complex approach to the optimal energy efficient work pattern for vibratory roller / V. V. Mikheev, S. V. Saveliev, V.B.Permakov // 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.

193. 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.

194. Mooney, M.A. Field Monitoring of Roller Vibration during Compaction of Subgrade Soil / M.A.Mooney, R.V. Rinehart // J. Geotech. & Geoenvironmental Engineering/ ASCE.–2007.–№133(2).– PP. 257–265.

195. Mooney, M.A. In–Situ Soil Response to Vibratory Loading and Its Relationship to Roller–Measured Soil Stiffness/ M.A.Mooney, R.V. Rinehart // ASCE J. of the Geotechnical and Geonvironmental Engineering.–2009.– №135(8).– PP. 1022–1031.

196. Mooney, M. A. Intelligent Soil Compaction Systems/ Mooney M. A., R/ V. Rinehart, N. W. Facas, O.M. Musimbi // NCHRP Report 676 .–Washington, D. C., 2010.– 166 P.

197. Odemark, N. Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements according to the Theory of Elasticity. Ph.D. thesis.–Stockholm, Sweden:

Statens Väginstytut. –Mitteilung No. 77. –1949.

198. Odebrecht, E. Energy Efficiency for Standard Penetration Tests. / E. Odebrecht, F.Schnaid, M.Rocha, G. Bernardes //Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. –2005.–Vol. 131, –Is. 10. DOI: 10.1061/(ASCE)1090–0241(2005)131:10(1252).

199. Nakashima, H Algorithm and implementation of soil–tire contact analysis code based on dynamic FE–DE method. / H.Nakashima, A. Oida, //Journal of Terramechanics. 41. 127–137. 10.1016/j.jterra.2004.02.002.

200. Ott, E. Chaos in Dynamical Systems./ E. Ott. –Cambridge: Cambridge University Press. –1993. –178 P.

201. Ott, E. Continuum coupled maps: A model for patterns in vibrated granular media. / E. Ott., S.C. Venkataramani // Proceedings of the 5th Experimental Chaos Conference,–2001, PP. 143–153.

202. Pietzsch, D. Simulation of soil–compaction with vibratory rollers/ D. Pietzsch, W. Poppy // Journal of Terramechanics, 1992.– №29(6).– PP. 585 – 597.

203. Pottinger, M.G. The Three–Dimensional Contact Patch Stress Field of Solid and Pneumatic Tires / M. G. Pottinger//Tire Science and Technology. –1992, –Vol. 20, No. 1. PP. 3–32.

204. Powders and Grains 97. Ed. by R.P.Behringer, J.Jenkins/ –Rotterdam. –Balkema. –1997, –324 p.

205. Pluta, J. Bi–axial exciter of mechanical vibrations / J. Pluta, P. Orkisz. // 13th International Carpathian Control Conference (ICCC). –2012, PP. 568–572, DOI: 10.1109/ CarpathianCC.2012.6228709

206. Poulos, S.J. The steady state of deformation. / S.J. Poulos// of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. –1981. –Vol.107. –PP. 553–562.

207. Poulos, S.J. Compaction Control and the Index Unit Weight. / S.J. Poulos// Geotechnical Testing Journal. –1988. –Vol. 11, –No. 2. –PP. 100–108. <https://doi.org/10.1520/GTJ10955J>.

208. Rinehart, R.V. Measurement depth of vibratory roller–measured soil stiffness / R.V.Rinehart // Geotechnique. – 2009. – №59(7)., – PP. 609–619.

209. Seed, H.B. Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays./

H.B. Seed, C.K. Chan.//Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. –1959. –Vol.85, –No. SM5, –PP. 87–128.

210. Schmertmann, J.H. Measurement of In-situ Shear Strength. / J.H. Schmertmann.// Proceedings of American Society of Civil Engineers, ASCE, Geotechnical Division, Specialty Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties, June 1 – 4, 1974, Raleigh, NC, –Vol. 2.–PP. 57–138.

211. Schmertmann, J.H. Measure and use of the in-situ lateral stress./J.H. Schmertmann //Practice of Foundation Engineering, A Volume Honoring Jorj O. Osterberg. Edited by R.J. Krizek, C.H. Dowding, and F. Somogyi. Department of Civil Engineering, The Technological Institute, Northwestern University, Evanston, –PP. 189 – 213.

212. Shishkin, E.V. Dynamic analysis of a vibratory jaw crusher with inclined crushing chamber / E. V. Shishkin //Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading, 2015 International Conference, 2015, –PP. 1 – 3, 10.1109/POLYAKHOV.2015.7106775

213. Smith, W. Modeling of wheel–soil interaction over rough terrain using the discrete element method./ W.Smith, H. Peng // Journal of Terramechanics, –Vol. 50. – Issue 5–6. –2013. –PP. 277–287

214. Tamura, T. Measurement of the degree of compaction by the impedance method. / T. Tamura, T. Sakai, //Journal of Terramechanics. –Vol. 29. –PP. 125–135. DOI: 10.1016/0022–4898(92)90020–K.

215. Ter–Martirsyán, Z.G Vibration of Embedded Foundation at Multi–layered Base Taking into Account Non–linear and Rheological Properties of Soils. / Z.G.Ter–Martirsyán, A.Z. Ter–Martirsyán, E.S. Sobolev //Procedia Engineering. –Vol. 153. –PP. 747–753. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.237.

216. Terzaghi, K. Soil mechanics in engineering practice/ K. Terzaghi, R. Peck. – New York: John Wiley and Sons. –1969.

217. Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics. / K. Terzaghi //– New York:John Wiley and Sons. – 1943.

218. Tielking, J.T. A Note on Tire Carcass Mechanical Properties/ J.T. Tielking, R. E. Martin and R. A. Schapery //Tire Science and Technology .–1978. –Vol. 6. –No. 4. –PP. 248–262



219. Townsend, F.C. Compendium of Ground Modification Techniques. / F.C.Townsend, B. A. Anderson, //—Miami: FDOT.—2004.—Research Report BC—354, — PP. 16—60.

220. Ueshita, K. Surface Displacement of an Elastic Layer under Uniformly Distributed Loads. / K. Ueshita, G.G. Meyerhof. // Highway Research Board Record. — 1968. — No. 228. — PP. 1—10.

221. Ullidtz, P. Normal Stresses in a Granular Material under Falling Weight Deflectometer Loading./ P. Ullidtz, V.Askegaard, F.O. Sjolin, // Transportation Research Record 1540, National Research Council, Washington, D.C. — 1996. — PP. 24—29.

222. Westergaard, H. M. Theory of elasticity and plasticity. / H. M. Westergaard.—New York: Dover Publications. —1964.

223. Young, R.N. Prediction of wheel—soil interaction and performance using finite element method/R.N.Young, E.A.Fattah.//Journal of Terramechanics. —1976, — Vol. 13(4). —PP. 227—240.

224. Yoo, T.S. A Theory for Vibratory Compaction of Soil, The Dissertation for Degree of Doctor of Philosophy to University of New York at Buffalo, —1975.

225. Yoo, T—S Dynamics of Vibratory—Roller Compaction/ T—S Yoo, E.T. Selig // ASCE J. of the Geotechnical Engineering Division.—1979.— № 105 (GT10).— PP.1211—1231.

## АКТЫ ИСПЫТАНИЙ

УТВЕРЖДАЮ

«17» июля 2017 г.

Проректор по НР

Корчагин П.А.

**АКТ**

Экспериментальных исследований закономерностей неупругого деформирования грунтовых сред при вибрационном уплотнении гладковальцовым катком.

**Объект исследований**

Накопление пластических деформаций слоем суглинистого грунта при вибрационном уплотнении, обеспечиваемое различными скоростными и частотными режимами работы гладковальцового вибрационного катка.

**Цель исследований**

Выявление зависимостей неупругого деформирования среды для различных областей залегания по глубине слоя при работе вибрационных катков по уплотнению грунтовых сред (на примере суглинистого грунта) при различных комбинациях режимных параметров. Результаты служат для проверки адекватности физико-механической модели взаимодействия активной области грунтовой среды с рабочим органом уплотняющей машины.

**Условия проведения исследований**

Исследования были проведены на базе кафедры «ЭСМиК» СибАДИ с 12,07,17 по 17,07,17. Рассматривалось уплотнение суглинистого грунта катком ДУ-107 полной массой 1500 кг. Для измерения смещения использовался комплексный восьмиканальный анализатор спектра ZETLAB 017-T8 (Изготовитель ООО «ОТМС», г, Зеленоград). Измерения проводились при частоте колебаний вибровозбудителя катка 30-60 Гц и поступательной скорости движения 1-3 км/ч.

Технические характеристики вибрационного катка ДУ-107	
Эксплуатационная масса, кг	1500
Вынуждающая сила, кН	6,2
Ширина рабочая, мм	700,00
Диаметр барабана, мм	550,00
Частота вибрации макс., мин <sup>-1</sup> , (Гц)	3768 (60)

### Результаты испытаний

Датчики, измеряющие нормальные смещения, располагались на оси вальца вибрационного катка (1 шт) и на различной глубине по отношению к поверхности слоя (4 шт., закрепленные на общем основании). Измерительный комплекс позволял фиксировать амплитуды вибраций, и значения виброускорений в направлении оси, перпендикулярной к поверхности. Полученные результаты приведены в таблицах для различных состояний грунтового слоя по ходу процесса уплотнения. Приведены амплитуды смещений поверхности грунта и на различных глубинах относительно поверхности слоя суглинистого грунта толщиной 250 и 350 мм. Измерения проводились для суглинистого грунта влажностью, составлявшей  $0,9 \pm 0,08$  от оптимальной. Измерения проводились на скоростях поступательного движения катка 1 км/ч, 1,7 км/ч, 2,4 км/ч и 3 км/ч. Частоты воздействия составляли 30, 45 и 60 Гц.

Таблица 1, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1 км/ч), частота воздействия 60 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	50					150					200				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,240	156,196	7,528	0,599	78,945	2,479	0,117	16,330	0,680						
3	1,157	148,611	6,335	0,573	73,460	2,160	0,110	15,005	0,609						
5	1,075	142,438	5,264	0,545	69,533	1,775	0,097	12,512	0,496						
7	0,992	123,560	4,310	0,475	61,468	1,422	0,096	12,622	0,407						
9	0,909	121,274	3,467	0,466	59,242	1,106	0,082	10,599	0,313						
11	0,827	115,443	2,732	0,423	57,269	0,871	0,079	10,957	0,246						

Таблица 2, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1,7 км/ч), частота воздействия 60 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	50					150					200				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,221	152,107	4,524	0,642	82,292	2,049	0,118	15,620	0,644						
3	1,104	142,761	3,866	0,578	73,009	1,893	0,106	14,627	0,511						
5	1,110	137,374	3,050	0,525	73,312	1,536	0,100	13,518	0,420						
7	0,985	129,458	2,525	0,486	66,690	1,212	0,095	12,210	0,347						
9	0,954	124,259	2,134	0,439	57,585	0,983	0,085	11,022	0,282						
11	0,826	106,721	1,544	0,430	55,507	0,773	0,074	9,504	0,233						

Таблица 3, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 2,4 км/ч), частота воздействия 60 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	50					150					200				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>				
1	1,198	167,784	4,721	0,638	89,182	1,709	0,116	15,658	0,449						
3	1,102	154,249	4,098	0,605	76,859	1,273	0,110	14,382	0,371						
5	1,107	154,967	3,437	0,556	72,289	1,082	0,102	13,387	0,293						
7	0,953	133,464	2,681	0,486	61,351	0,890	0,092	12,186	0,249						
9	0,872	122,087	2,233	0,458	58,388	0,767	0,085	10,759	0,194						
11	0,791	110,757	1,694	0,411	52,829	0,584	0,073	9,380	0,151						

Таблица 4, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 3 км/ч), частота воздействия 60 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	50					150					200				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>				
1	1,238	156,526	3,617	0,589	74,913	1,325	0,110	15,105	0,362						
3	1,201	160,202	3,264	0,556	76,297	1,014	0,104	14,260	0,306						
5	1,078	142,605	2,573	0,523	69,023	0,890	0,099	13,263	0,237						
7	0,950	128,057	2,214	0,494	62,560	0,664	0,088	11,944	0,199						
9	0,917	115,807	1,811	0,447	59,503	0,623	0,085	11,178	0,161						
11	0,786	99,884	1,356	0,398	50,596	0,476	0,073	9,250	0,120						

Таблица 5, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1 км/ч), частота воздействия 60 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100			200			300					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм			
1	1,276	166,200	8,816	0,784	104,128	5,310	0,167	23,042	1,263			
3	1,178	154,178	7,197	0,719	94,609	4,872	0,163	20,984	0,984			
5	1,167	149,656	6,240	0,695	95,115	3,928	0,150	20,848	0,849			
7	1,028	134,505	5,069	0,640	81,226	3,114	0,131	18,332	0,711			
9	0,924	119,206	3,968	0,579	76,329	2,429	0,122	16,077	0,532			
11	0,867	114,564	3,297	0,502	64,395	1,980	0,114	14,462	0,435			

Таблица 6, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1,7 км/ч), частота воздействия 60 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100			200			300					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм			
1	1,362	189,880	6,571	0,760	99,213	4,466	0,165	21,821	0,922			
3	1,209	152,630	5,729	0,746	102,758	3,708	0,154	20,614	0,757			
5	1,130	150,419	4,718	0,712	91,447	3,004	0,148	19,507	0,640			
7	1,071	138,448	3,765	0,613	77,454	2,434	0,140	18,179	0,512			
9	0,937	119,383	3,094	0,553	76,482	1,925	0,122	15,654	0,410			
11	0,867	114,564	4,324	0,554	76,621	1,510	0,119	15,108	0,354			

Таблица 7, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 2,4 км/ч), частота воздействия 60 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	100					200					300				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,294	178,671	4,709	0,775	106,820	2,934	0,169	22,203	0,672						
3	1,187	165,527	4,170	0,752	104,678	3,719	0,161	22,519	0,540						
5	1,159	158,363	3,269	0,675	93,666	3,053	0,145	18,229	0,480						
7	1,068	136,991	2,679	0,643	89,235	2,394	0,144	19,614	0,369						
9	0,969	129,697	2,197	0,583	80,176	1,934	0,124	16,325	0,294						
11	0,878	116,634	1,647	0,507	68,695	1,598	0,114	15,836	0,234						

Таблица 8, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 3 км/ч), частота воздействия 60 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	100					200					300				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,327	184,068	3,746	0,782	103,260	2,508	0,168	23,289	0,552						
3	1,276	169,157	3,212	0,769	106,241	2,114	0,154	19,721	0,428						
5	1,105	144,435	2,731	0,708	97,104	1,664	0,154	21,162	0,354						
7	1,029	134,500	2,226	0,637	83,449	1,381	0,133	17,956	0,298						
9	0,946	123,936	1,709	0,577	72,953	1,167	0,121	16,061	0,249						
11	0,912	122,416	1,426	0,547	68,864	0,841	0,109	14,502	0,191						

Таблица 9, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1 км/ч), частота воздействия 45 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	50					150					200				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм			
1	1,132	87,392	5,799	0,351	25,288	1,837	0,182	13,061	0,958						
3	0,984	76,235	4,782	0,339	24,644	1,612	0,167	12,992	0,837						
5	0,894	65,465	4,138	0,321	25,082	1,278	0,152	11,717	0,680						
7	0,869	64,068	3,312	0,277	20,449	1,106	0,143	10,394	0,526						
9	0,826	65,018	2,612	0,273	19,739	0,898	0,134	10,339	0,441						
11	0,710	50,875	2,112	0,250	18,196	0,710	0,116	8,459	0,333						

Таблица 10, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1,7 км/ч), частота воздействия 45 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	50					150					200				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм			
1	1,113	85,494	4,183	0,344	26,214	1,422	0,180	13,983	0,728						
3	0,975	74,957	3,847	0,344	25,104	1,264	0,172	12,430	0,603						
5	0,933	70,696	3,097	0,299	21,801	0,981	0,163	11,706	0,511						
7	0,902	65,777	2,541	0,301	22,022	0,849	0,146	11,073	0,416						
9	0,806	62,286	2,088	0,269	20,699	0,693	0,139	9,890	0,327						
11	0,742	54,073	1,513	0,237	17,878	0,527	0,122	9,034	0,260						



Таблица 11, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 2,4 км/ч), частота воздействия 45 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	50			150			200					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , $M/c^2$	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , $M/c^2$	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , $M/c^2$	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , $M/c^2$	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	1,130	88,073	2,989	0,347	26,886	1,038	0,172	12,545	0,521			
3	1,012	74,480	2,503	0,339	24,802	0,866	0,172	13,468	0,448			
5	0,916	67,760	2,206	0,324	23,680	0,726	0,164	12,090	0,362			
7	0,863	61,688	1,814	0,294	22,557	0,607	0,138	10,572	0,285			
9	0,756	58,401	1,421	0,254	19,285	0,499	0,135	10,296	0,243			
11	0,725	55,099	1,161	0,231	17,895	0,375	0,123	9,367	0,181			

Таблица 12, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 3 км/ч), частота воздействия 45 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	50			150			200					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , $M/c^2$	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , $M/c^2$	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , $M/c^2$	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , $M/c^2$	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	1,117	83,849	2,435	0,362	28,135	0,792	0,182	13,722	0,407			
3	0,986	72,122	2,685	0,349	25,349	0,691	0,164	11,930	0,354			
5	0,976	72,036	2,124	0,307	23,122	0,574	0,164	12,587	0,302			
7	0,874	65,795	1,684	0,284	20,738	0,459	0,146	10,896	0,230			
9	0,759	56,464	1,446	0,254	18,246	0,371	0,132	10,140	0,195			
11	0,703	53,042	1,136	0,229	16,672	0,309	0,118	9,176	0,146			

Таблица 13, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1 км/ч), частота воздействия 45 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100			200			300					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,427	102,149	7,449	0,604	46,672	3,049	0,191	14,263	1,026			
3	1,363	101,544	6,349	0,543	42,447	2,695	0,169	12,573	0,843			
5	1,188	89,845	5,068	0,524	37,906	2,128	0,163	11,989	0,716			
7	1,063	75,928	4,220	0,458	36,061	1,742	0,148	11,594	0,558			
9	0,981	71,234	3,345	0,440	34,302	1,393	0,135	10,096	0,454			
11	0,951	72,709	2,690	0,391	28,118	1,104	0,122	8,849	0,339			

Таблица 14, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1,7 км/ч), частота воздействия 45 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100			200			300					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,362	97,463	5,569	0,567	44,363	2,460	0,194	14,829	0,741			
3	1,330	94,885	4,675	0,562	40,686	1,988	0,181	14,012	0,633			
5	1,204	89,135	4,048	0,493	38,530	1,663	0,158	11,499	0,503			
7	1,126	86,721	3,159	0,464	34,719	1,336	0,144	11,283	0,448			
9	0,991	76,854	2,658	0,438	32,909	1,140	0,141	11,007	0,343			
11	0,882	65,926	2,102	0,383	28,937	0,901	0,127	9,750	0,267			



Таблица 17, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1 км/ч), частота воздействия 30 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	50					150					200	
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	
1	1,054	34,551	4,951	0,552	17,858	2,560	0,180	6,202	0,846			
3	0,973	35,752	4,267	0,494	16,034	2,044	0,165	5,600	0,668			
5	0,959	30,772	3,296	0,491	16,056	1,760	0,162	5,485	0,556			
7	0,873	28,523	2,848	0,413	13,227	1,405	0,147	5,038	0,480			
9	0,757	25,016	2,233	0,385	13,256	1,170	0,137	4,352	0,374			
11	0,729	23,655	1,851	0,352	12,150	0,890	0,123	3,888	0,294			

Таблица 18, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1,7 км/ч), частота воздействия 30 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	50					150					200	
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	
1	1,074	35,163	2,856	0,556	17,814	1,487	0,175	5,902	0,485			
3	0,974	32,297	2,529	0,502	16,418	1,286	0,168	5,671	0,408			
5	0,906	29,205	2,091	0,484	15,379	1,055	0,152	4,825	0,337			
7	0,871	28,892	1,669	0,433	13,679	0,836	0,150	4,921	0,278			
9	0,771	25,605	1,407	0,391	12,502	0,658	0,136	4,771	0,229			
11	0,692	22,906	1,086	0,346	11,243	0,536	0,119	3,929	0,178			

Таблица 19, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 2,4 км/ч), частота воздействия 30 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	50					150					200				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,058	37,687	1,987	0,534	16,887	1,083	0,190	6,426	0,349						
3	0,989	33,349	1,735	0,508	17,452	0,834	0,166	5,460	0,280						
5	0,978	31,350	1,505	0,458	15,523	0,756	0,156	5,441	0,251						
7	0,851	29,072	1,221	0,446	15,269	0,595	0,146	4,850	0,201						
9	0,822	27,319	0,996	0,400	12,905	0,497	0,134	4,381	0,161						
11	0,738	24,186	0,769	0,348	11,721	0,374	0,118	4,058	0,119						

Таблица 20, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 250 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 3 км/ч), частота воздействия 30 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм														
	50					150					200				
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,049	35,195	1,598	0,541	18,227	0,812	0,174	6,024	0,289						
3	0,979	34,337	1,354	0,499	16,975	0,679	0,164	5,408	0,223						
5	0,943	30,069	1,110	0,465	14,742	0,586	0,152	5,126	0,187						
7	0,879	28,895	0,974	0,446	14,761	0,466	0,139	4,673	0,163						
9	0,773	27,939	0,761	0,396	13,715	0,379	0,133	4,566	0,126						
11	0,746	23,547	0,571	0,368	12,813	0,307	0,123	3,986	0,096						

Таблица 21, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1 км/ч), частота воздействия 30 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100			200			300					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,355	44,536	6,052	0,528	18,171	2,261	0,170	5,698	0,764			
3	1,294	41,705	5,185	0,491	16,557	2,049	0,155	5,360	0,221			
5	1,146	38,478	4,348	0,442	15,177	1,574	0,148	5,059	0,191			
7	1,069	35,592	3,416	0,412	13,057	1,364	0,143	4,630	0,153			
9	0,927	29,732	2,667	0,375	12,638	1,051	0,128	4,333	0,126			
11	0,844	27,752	2,295	0,347	11,699	0,863	0,120	3,943	0,092			

Таблица 22, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 1,7 км/ч), частота воздействия 30 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100			200			300					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	1,361	47,304	3,720	0,518	16,445	1,382	0,177	5,773	0,448			
3	1,251	40,858	3,024	0,478	15,282	1,136	0,161	5,188	0,394			
5	1,097	35,904	2,492	0,440	15,024	0,977	0,144	4,556	0,317			
7	1,066	34,611	2,123	0,418	13,547	0,798	0,138	4,647	0,271			
9	0,928	31,566	1,562	0,381	13,323	0,664	0,125	4,107	0,209			
11	0,914	30,951	1,298	0,361	11,537	0,489	0,115	3,700	0,173			

Таблица 23, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 2,4 км/ч), частота воздействия 30 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм								
	100			200			300		
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	1,325	42,631	2,532	0,527	18,328	1,028	0,176	5,934	0,314
3	1,290	43,346	2,132	0,470	16,310	0,840	0,156	5,385	0,287
5	1,114	38,786	1,790	0,431	15,065	0,660	0,142	4,718	0,236
7	1,015	31,985	1,484	0,430	13,545	0,590	0,139	4,564	0,180
9	0,960	31,142	1,123	0,375	12,159	0,437	0,130	4,463	0,149
11	0,891	28,211	0,871	0,361	11,739	0,369	0,113	3,662	0,121

Таблица 24, Характеристики деформирования слоя суглинистого грунта толщиной 350 мм при вибрационном уплотнении катком ДУ-107 (скорость движения катка 3 км/ч), частота воздействия 30 Гц

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм								
	100			200			300		
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	1,370	44,966	2,119	0,530	16,823	0,781	0,169	5,451	0,261
3	1,209	40,569	1,648	0,465	15,052	0,665	0,168	5,830	0,232
5	1,169	40,046	1,399	0,449	15,306	0,570	0,156	5,190	0,185
7	1,029	32,617	1,173	0,410	13,815	0,457	0,133	4,477	0,144
9	0,939	29,612	0,910	0,369	11,938	0,367	0,132	4,591	0,117
11	0,851	27,075	0,722	0,343	11,943	0,281	0,118	4,004	0,095

Полученные результаты позволили определить величину смещения частиц среды грунтовой насыпи на известной глубине при виброуплотнении и выявить закономерности распределения вибрационных смещений и виброускорений по толщине уплотняемого слоя.

К.ф.-м.н., доц. каф. соискатель СибАДИ



В.В. Михеев

Д.т.н., проф каф, «ЭСМиК» СибАДИ



С. В. Савельев

Зав. кафедрой «ЭСМиК»

СибАДИ, к.т.н.



В.С. Серебренников



УТВЕРЖДАЮ

«15» июня 2017г.

Проректор по НР

Корчагин П.А.



## АКТ

Экспериментальных исследований закономерностей неупругого деформирования грунтовых сред при вибрационном уплотнении гладковальцовым катком.

### Объект исследований

Накопление пластических деформаций слоем суглинистого грунта при вибрационном уплотнении, обеспечиваемое различными скоростными режимами работы гладковальцового вибрационного катка.

### Цель исследований

Выявление зависимостей неупругого деформирования среды для различных областей залегания по глубине слоя при работе вибрационных катков по уплотнению грунтовых сред (на примере супесчаного грунта) при различных скоростях поступательного движения катка. Результаты служат для проверки адекватности физико-механической модели взаимодействия активной области грунтовой среды с рабочим органом уплотняющей машины.

### Условия проведения исследований

Исследования были проведены на базе предприятия «ИдеалСтрой» в период с 15.05.2017 по 20.05.2017. Рассматривалось уплотнение супесчаного грунта катком Stavostroj STA VHS 102K полной массой 10276 кг. Для измерения смещения использовался комплексный восьмиканальный анализатор спектра ZETLAB 017-T8 (Изготовитель ООО «ОТМС», г. Зеленоград). Измерения проводились при частоте колебаний вибровозбудителя катка 42 Гц и поступательной скорости движения 2-7 км/ч. Полученные данные позволили определить величину смещения частиц среды грунтовой насыпи и виброускорений на известной глубине при виброуплотнении и выявить характер их изменения в зависимости от этапа уплотнения.

Технические характеристики вибрационного катка Stavostroj STA VHS 102K	
Эксплуатационная масса, кг	10276
Вынуждающая сила, кН	2x50
Ширина рабочая, мм	1 800,00
Диаметр барабана, мм	1 200,00
Частота вибрации, мин <sup>-1</sup> , (Гц)	2 520,00 (42)

### Результаты испытаний

Датчики, измеряющие нормальные смещения, располагались на оси барабана вальца вибрационного катка (1 шт) и на различной глубине по отношению к поверхности слоя (4 шт., закрепленные на общем основании). Измерительный комплекс позволял фиксировать амплитуды вибраций, и значения виброускорений в направлении ос, перпендикулярной к поверхности. Полученные результаты приведены в таблицах для различных состояний грунтового слоя по ходу процесса уплотнения. Приведены амплитуды смещений поверхности грунта и на различных глубинах относительно поверхности слоя супесчаного грунта толщиной 650 мм и 450 мм. Измерения проводились для супесчаного грунта влажностью, составлявшей  $0.9 \pm 0.08$  от оптимальной. Скорость поступательного движения катка принимала значения 2 км/ч, 3.5 км/ч, 5 км/ч и 6.5 км/ч.

Таблица 1. Характеристики деформирования слоя супесчаного грунта толщиной 650 мм при вибрационном уплотнении катком Stavostroj STA VHS 102K (скорость движения катка 2 км/ч)

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	150				300				450			
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	2,95	40,85	13,31	0,9	12,30	4,01	0,265	3,706	1,207			
2	2,85	39,85	12,98	0,85	12,00	3,91	0,26	3,615	1,177			
3	2,65	36,97	12,04	0,8	11,13	3,63	0,24	3,354	1,092			
4	2,35	32,62	10,62	0,7	9,83	3,20	0,21	2,959	0,964			
5	1,95	27,39	8,92	0,6	8,25	2,69	0,18	2,484	0,809			
6	1,55	21,87	7,12	0,45	6,59	2,15	0,14	1,984	0,646			

Таблица 2. Характеристики деформирования слоя супесчаного грунта толщиной 650 мм при вибрационном уплотнении катком Stavostroj STA VHS 102K (скорость движения катка 3,5 км/ч)

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	150				300				450			
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	2,7	37,588	6,995	0,815	11,321	2,107	0,245	3,410	0,635			
2	2,63	36,659	6,822	0,795	11,042	2,055	0,24	3,326	0,619			
3	2,44	34,011	6,329	0,735	10,244	1,906	0,22	3,085	0,574			
4	2,155	30,014	5,586	0,65	9,040	1,682	0,195	2,723	0,507			
5	1,81	25,196	4,689	0,545	7,589	1,412	0,165	2,286	0,425			
6	1,445	20,119	3,744	0,435	6,060	1,128	0,13	1,825	0,340			

Таблица 3. Характеристики деформирования слоя супесчаного грунта толщиной 650 мм при вибрационном уплотнении катком Stavostroj STA VHS 102K (скорость движения катка 5 км/ч)

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	150			300			450					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	2,625	36,558	4,762	0,158	11,011	1,434	0,048	3,316	0,432			
2	2,56	35,655	4,645	0,154	10,739	1,399	0,046	3,235	0,421			
3	2,375	33,079	4,309	0,143	9,963	1,298	0,043	3,001	0,391			
4	2,095	29,192	3,803	0,126	8,792	1,145	0,038	2,648	0,345			
5	1,76	24,505	3,192	0,106	7,381	0,962	0,032	2,223	0,290			
6	1,405	19,568	2,549	0,085	5,894	0,768	0,025	1,775	0,231			

Таблица 4. Характеристики деформирования слоя супесчаного грунта толщиной 650 мм при вибрационном уплотнении катком Stavostroj STA VHS 102K (скорость движения катка 6.5 км/ч)

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	150			300			450					
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм			
1	2,59	36,054	3,613	0,78	10,859	1,088	0,26	3,271	0,328			
2	2,525	35,163	3,524	0,76	10,591	1,061	0,23	3,190	0,320			
3	2,34	32,623	3,269	0,705	9,826	0,985	0,21	2,959	0,297			
4	2,065	28,789	2,885	0,625	8,671	0,869	0,19	2,612	0,262			
5	1,735	24,167	2,422	0,525	7,279	0,729	0,155	2,192	0,220			
6	1,385	19,298	1,934	0,415	5,812	0,582	0,125	1,751	0,175			

Таблица 5. Характеристики деформирования слоя супесчаного грунта толщиной 450 мм при вибрационном уплотнении катком Stavostroj STA VHS 102K (скорость движения катка 2 км/ч)

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100				200				300			
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	3,685	51,300	16,707	1,795	24,972	8,133	0,845	11,758	3,829			
2	3,84	53,511	17,427	1,945	27,124	8,834	0,655	9,093	2,962			
3	3,685	51,308	16,710	1,79	24,900	8,109	0,655	9,103	2,965			
4	2,97	41,356	13,469	1,255	17,489	5,696	0,62	8,662	2,821			
5	2,655	36,995	12,048	1,11	15,475	5,040	0,44	6,125	1,995			
6	2,15	29,956	9,756	0,75	10,449	3,403	0,355	4,923	1,603			

Таблица 6. Характеристики деформирования слоя супесчаного грунта толщиной 450 мм при вибрационном уплотнении катком Stavostroj STA VHS 102K (скорость движения катка 3.5 км/ч)

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100				200				300			
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	3,42	47,633	8,864	1,56	21,718	4,042	0,68	9,440	1,757			
2	3,38	47,048	8,756	1,545	21,524	4,006	0,69	9,587	1,784			
3	3,015	41,997	7,816	1,44	20,041	3,730	0,66	9,225	1,717			
4	2,765	38,505	7,166	1,24	17,270	3,214	0,535	7,451	1,387			
5	2,36	32,873	6,118	1,02	14,174	2,638	0,45	6,255	1,164			
6	1,9	26,476	4,927	0,875	12,219	2,274	0,37	5,176	0,963			

Таблица 7. Характеристики деформирования слоя супесчаного грунта толщиной 450 мм при вибрационном уплотнении катком Stavostroj STA VHS 102K (скорость движения катка 5 км/ч)

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100				200				300			
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	3,435	47,856	6,234	1,565	21,771	2,836	0,68	9,182	1,196			
2	3,450	48,053	6,260	1,440	20,051	2,612	0,69	9,324	1,215			
3	3,190	44,450	5,790	1,360	18,934	2,467	0,66	8,972	1,169			
4	2,655	36,993	4,819	1,220	17,022	2,218	0,535	7,247	0,944			
5	2,260	31,450	4,097	0,985	13,719	1,787	0,45	6,084	0,793			
6	1,735	24,163	3,148	0,790	10,971	1,429	0,37	5,034	0,656			

Таблица 8. Характеристики деформирования слоя супесчаного грунта толщиной 450 мм при вибрационном уплотнении катком Stavostroj STA VHS 102K (скорость движения катка 6.5 км/ч)

Номер прохода	Глубина залегания датчиков, мм											
	100				200				300			
	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного перемещения, $Z_{max}$ , мм	Величина амплитуды вибрационного ускорения, $\ddot{z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	Величина накопленной пластической деформации, $Z_{plastic}$ , мм
1	3,320	46,253	4,635	1,490	20,745	2,079	0,670	9,346	0,937			
2	3,295	45,878	4,597	1,420	19,782	1,982	0,650	9,021	0,904			
3	3,080	42,930	4,302	1,420	19,812	1,985	0,600	8,360	0,838			
4	2,660	37,020	3,710	1,175	16,397	1,643	0,515	7,193	0,721			
5	2,265	31,580	3,165	0,970	13,488	1,352	0,455	6,353	0,637			
6	1,815	25,308	2,536	0,830	11,568	1,159	0,370	5,160	0,517			

Полученные результаты позволили определить величину смещения частиц среды грунтовой насыпи на известной глубине при виброуплотнении и выявить закономерности распределения вибрационных смещений и виброускорений по толщине уплотняемого слоя, а также закономерности накопления пластических деформаций.

К.ф.-м.н., доц. каф. соискатель СибАДИ



В.В. Михеев

Д.т.н., проф каф, «ЭСМиК» СибАДИ



С. В. Савельев

Зав. кафедрой «ЭСМиК»

СибАДИ, к.т.н.



В.С. Серебренников





Исследования были проведены на базе Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) в грунтовом канале кафедры «ЭСМиК».

Для проведения испытаний была использована установка на основе резистивного датчика смещений «Мегатрон». Сброс груза (гири массы 8 кг и 16 кг) осуществлялся с помощью специальной конструкции (Рис.1).

Датчик «Мегатрон» жестко крепился выдвижной частью к штампу, подвергаемого удару падающего груза. Кабель передачи данных осуществлял соединение измерительного датчика с аналогово-цифровым преобразователем и ЭВМ с установленным программным обеспечением для обработки информационного сигнала при деформировании.

Характеристики грунта слоя определялись стандартными способами. Плотность определялась – методом режущих колец, влажность – методом высушивания до постоянной массы по ГОСТ 5180-84.



Рис.1 Измерительный комплекс и устройство для сброса груза в грунтовом канале  
СибАДИ

### Результаты испытаний плоским штампом

Высота сброса груза  $0.25 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $0.45 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $0.65 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $0.85 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $1.00 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$

Масса сбрасываемого груза 8 кг

Диаметр плоского штампа  $0.21 \pm 0.5 \text{ см}$

Масса плоского штампа 0.785 кг

Глубина грунтового слоя  $h = 0.34 \pm 0.01 \text{ м}$

Плотность грунта  $\rho = 1720 \text{ кг/м}^3$

Доверительная вероятность  $p = 0.9$

Коэффициент Стьюдента  $t_{p,n} = 2,13$

Таблица 1. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h = 0,34 \pm 0.01 \text{ м}$

Высота сброса груза, $h$ , м 0.25	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{\text{нос}} \rangle = 1.93 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{нос}} = 0,41 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{нос}}} = 21,5\%$	Масса груза
	$x_{\text{нос}}$ , мм	1,81	1,67	2,15	2,08	1,95				$m$ , кг
	№ опыта	1	2	3	4	5				8
	$\Delta x_{\text{нос}}$ , мм	3,38	3,22	3,18	2,96	3,62				$\langle \Delta x_{\text{нос}} \rangle = 3,272 \text{ мм}$
Высота сброса груза, $h$ , м 0.45	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{\text{нос}} \rangle = 2,7 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{нос}} = 0,46 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{нос}}} = 17,2\%$	Масса груза
	$x_{\text{нос}}$ , мм	2,41	2,55	2,82	2,96	2,75				$m$ , кг
	№ опыта	1	2	3	4	5				8
	$\Delta x_{\text{нос}}$ , мм	4,1	4,23	4,32	4,16	3,91				$\langle \Delta x_{\text{нос}} \rangle = 4,14 \text{ мм}$
Высота сброса груза, $x_{\text{нос}}$ , м 0.65	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{\text{нос}} \rangle = 3,3 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{нос}} = 0,37 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{нос}}} = 11,2\%$	Масса груза
	$x_{\text{нос}}$ , мм	3,22	3,08	3,42	3,26	3,52				$m$ , кг
	№ опыта	1	2	3	4	5				8
	$\Delta x_{\text{нос}}$ , мм	5,06	4,77	4,82	4,93	4,45				$\langle \Delta x_{\text{нос}} \rangle = 4,806 \text{ мм}$
Высота сброса груза, $x_{\text{нос}}$ , м 0.85	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{\text{нос}} \rangle = 3,76 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{нос}} = 0,31 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{нос}}} = 8,12\%$	Масса груза
	$x_{\text{нос}}$ , мм	3,82	3,24	3,68	4,41	3,68				$m$ , кг
	№ опыта	1	2	3	4	5				8
	$\Delta x_{\text{нос}}$ , мм	5,29	4,85	5,44	6,47	5,74				$\langle \Delta x_{\text{нос}} \rangle = 5,56 \text{ мм}$
Высота сброса груза, $x_{\text{нос}}$ , м 1.00	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{\text{нос}} \rangle = 4,10 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{нос}} = 0,29 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{нос}}} = 9,19\%$	Масса груза
	$x_{\text{нос}}$ , мм	4,16	3,67	3,92	4,77	4,00				$m$ , кг
	№ опыта	1	2	3	4	5				8
	$\Delta x_{\text{нос}}$ , мм	5,86	5,18	5,85	7,08	5,86				$\langle \Delta x_{\text{нос}} \rangle = 6,07 \text{ мм}$

Таблица 2. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h=0,28\pm 0.01$  м

Высота сброса груза, $h$ , м 0.25	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 1,682$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,22$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 13,1\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{ное}$ , мм	1,715	1,762	1,730	1,501	1,700				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 2,305$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,17$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 7,5\%$	Масса груза $m$ , кг
	$\Delta x_{ное}$ , мм	2,302	2,365	2,321	2,174	2,361				16
Высота сброса груза, $h$ , м 0.45	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 2,25$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,244$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 10,9\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{ное}$ , мм	2,341	2,246	2,321	2,055	2,282				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 2,97$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,31$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 10,8\%$	Масса груза $m$ , кг
	$\Delta x_{ное}$ , мм	2,879	3,017	3,119	2,761	3,065				16
Высота сброса груза, $x_{ное}$ , м 0.65	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 2,64$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,33$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 12,4\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{ное}$ , мм	2,530	2,846	2,602	2,473	2,745				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 3,62$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,26$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 7,1\%$	Масса груза $m$ , кг
	$\Delta x_{ное}$ , мм	3,780	3,626	3,491	3,510	3,684				16
Высота сброса груза, $x_{ное}$ , м 0.85	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 3,04$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,7$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 23,1\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{ное}$ , мм	2,890	2,649	2,972	3,534	3,135				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 4,97$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,436$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 8,8\%$	Масса груза $m$ , кг
	$\Delta x_{ное}$ , мм	4,709	5,207	4,842	4,869	5,109				16
Высота сброса груза, $x_{ное}$ , м 1.00	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 3,33$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,27$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 8,25\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{ное}$ , мм	3,24	2,91	3,15	3,98	3,35				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 5,45$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,23$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 4,8\%$	Масса груза $m$ , кг
	$\Delta x_{ное}$ , мм	5,11	5,87	5,44	5,49	5,36				16

Таблица 3. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h=0,20\pm 0.01$  м

Высота сброса груза, $h$ , м 0.25	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 1,26$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,205$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 16,3\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{ное}$ , мм	1,221	1,166	1,186	1,355	1,371				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 1,72$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,268$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 15,6\%$	Масса груза $m$ , кг
	$\Delta x_{ное}$ , мм	1,662	1,587	1,646	1,844	1,866				16
Высота сброса груза, $h$ , м	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{ное} \rangle = 1,74$ мм	$\Delta x_{ное} = 0,256$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{ное}} = 14,8\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{ное}$ , мм	1,628	1,831	1,582	1,807	1,828				8

м 0.45	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{\text{ное}} \rangle = 2,35 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{ное}} = 0,31 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{ное}}} = 13\%$	16
	$\Delta x_{\text{ное}}, \text{мм}$	2,238	2,264	2,217	2,484	2,513				
Высота сброса груза, $x_{\text{ное}}, \text{м}$ 0.65	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{\text{ное}} \rangle = 2,19 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{ное}} = 0,223 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{ное}}} = 10,1\%$	Масса груза
	$x_{\text{ное}}, \text{мм}$	2,001	2,251	2,209	2,220	2,247				$m, \text{кг}$
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{\text{ное}} \rangle = 2,74 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{ное}} = 0,332 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{ное}}} = 12,1\%$	8
	$\Delta x_{\text{ное}}, \text{мм}$	2,713	2,641	2,688	3,011	2,636				
Высота сброса груза, $x_{\text{ное}}, \text{м}$ 0.85	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{\text{ное}} \rangle = 2,41 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{ное}} = 0,246 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{ное}}} = 10,6\%$	Масса груза
	$x_{\text{ное}}, \text{мм}$	2,208	2,483	2,438	2,450	2,479				$m, \text{кг}$
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{\text{ное}} \rangle = 3,2 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{ное}} = 0,256 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{ное}}} = 8\%$	16
	$\Delta x_{\text{ное}}, \text{мм}$	3,198	3,113	3,167	3,125	3,409				
Высота сброса груза, $x_{\text{ное}}, \text{м}$ 1.00	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle x_{\text{ное}} \rangle = 2,61 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{ное}} = 0,25 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{ное}}} = 9,6\%$	Масса груза
	$x_{\text{ное}}, \text{мм}$	2,40	2,56	2,75	2,55	2,78				$m, \text{кг}$
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{\text{ное}} \rangle = 3,43 \text{ мм}$	$\Delta x_{\text{ное}} = 0,05 \text{ мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{\text{ное}}} = 1,38\%$	8
	$\Delta x_{\text{ное}}, \text{мм}$	3,32	3,35	3,40	3,34	3,72				

Соискатель СибАДИ

В.В.Михеев

Д.т.н., проф. каф. «ЭСМиК» СибАДИ

С.В.Савельев

Зав. лабораторией

«Грунтовый канал» СибАДИ

В.Володарец

Зав.кафедрой «ЭСМиК» СибАДИ, к.т.н.

В.С.Серебрянников

УТВЕРЖДАЮ

« 25 » сентября 20 18 г.

Проректор по НР

Корчагин П.А.

**АКТ**

Экспериментальных исследований величины поверхностной деформации грунтового слоя при ударном нагружении плоского штампа.

**Объект исследований**

Закономерности поверхностного деформирования грунтового слоя при воздействии плоским штампом, подвергаемым ударному воздействию падающего груза.

**Цель исследований**

Определение величины поверхностной деформации грунтового слоя и выявление ее неупругой части при деформировании слоя под воздействием ударного нагружения плоского штампа в форме участка плоской поверхности в виде круга для проверки степени адекватности математического моделирования процесса взаимодействия рабочего органа катка с активной областью уплотняемого слоя.

**Условия проведения исследований**

Исследования в натуральных условиях на супесчаных грунтах естественного залегания, в рамках выполнения работ по гранту РФФИ совместно с правительством Омской области РФФИ ОО 18-48-550005 р\_а.

Для проведения испытаний была использована установка на основе резистивного датчика смещений «Мегатрон». Сброс груза (гири массы 8 кг и 16 кг) осуществлялся с помощью специальной конструкции (Рис.1).

Датчик «Мегатрон» жестко крепился выдвижной частью к штампу, подвергаемого удару падающего груза. Кабель передачи данных осуществлял соединение измерительного датчика с аналогово-цифровым преобразователем и ЭВМ с установленным программным обеспечением для обработки информационного сигнала при деформировании.

Характеристики грунта слоя определялись стандартными способами. Плотность определялась – методом режущих колец, влажность – методом высушивания до постоянной массы по ГОСТ 5180-84.



Рис.1 Измерительный комплекс и устройство для сброса груза

## Результаты испытаний плоским штампом

Высота сброса груза  $0.25 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $0.45 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $0.65 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  $0.85 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$ ,  
 $1.00 \text{ м} \pm 0.01 \text{ м}$

Масса сбрасываемого груза 8 кг

Диаметр плоского штампа  $0.21 \pm 0.5 \text{ см}$

Масса плоского штампа 0.785 кг

Глубина грунтового слоя  $h = 0.34 \pm 0.01 \text{ м}$

Плотность грунта  $\rho = 1720 \text{ кг/м}^3$

Доверительная вероятность  $p = 0.9$

Коэффициент Стьюдента  $t_{p,n} = 2,13$

Таблица 1. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h = 0,35 \pm 0.01 \text{ м}$

							$\langle x_{нов} \rangle, \text{мм}$	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}}, \%$	
Высота сброса груза, $h$ , м 0.25	№ опыта	1	2	3	4	5	1,233	0,100	8,080	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	1,153	1,075	1,330	1,349	1,257				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	2,010	0,147	7,315	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	2,083	2,018	1,918	1,785	2,244				
Высота сброса груза, $h$ , м 0.45	№ опыта	1	2	3	4	5	1,734	0,139	7,994	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	1,521	1,639	1,754	1,945	1,813				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	2,599	0,083	3,209	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	2,567	2,703	2,693	2,558	2,473				
Высота сброса груза, $x_{нов}$ , м 0.65	№ опыта	1	2	3	4	5	2,069	0,154	7,446	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	1,906	1,922	2,224	1,995	2,300				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	3,085	0,276	8,939	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	3,382	2,857	3,245	3,309	2,634				
Высота сброса груза, $x_{нов}$ , м 0.85	№ опыта	1	2	3	4	5	2,295	0,218	9,497	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	2,248	2,121	2,194	2,746	2,169				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	3,480	0,376	10,803	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	3,483	2,877	3,245	3,978	3,815				
Высота сброса	№ опыта	1	2	3	4	5	2,530	0,238	9,397	Масса груза $m$





груза, $h$ , м 0.45	$x_{нов}$ , мм	1,056	1,243	0,924	1,231	1,220	1,514	0,148	9,761	8
	№ опыта	1	2	3	4	5				16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	1,492	1,408	1,295	1,699	1,677				
Высота сброса груза, $x_{нов}$ , м 0.65	№ опыта	1	2	3	4	5	1,376	0,104	7,521	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	1,239	1,564	1,311	1,398	1,369				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	1,721	0,163	9,458	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	1,731	1,613	1,674	2,040	1,547				
Высота сброса груза, $x_{нов}$ , м 0.85	№ опыта	1	2	3	4	5	1,519	0,131	8,627	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	1,313	1,696	1,565	1,416	1,608				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	2,008	0,194	9,660	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	1,831	1,913	1,804	2,169	2,323				
Высота сброса груза, $x_{нов}$ , м 1.00	№ опыта	1	2	3	4	5	1,603	0,135	8,450	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	1,386	1,518	1,793	1,609	1,707				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	2,126	0,195	9,183	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	1,890	1,911	2,280	2,132	2,417				

Соискатель СибАДИ



В.В.Михеев

д.т.н., проф. каф. «ЭСМиК» СибАДИ



С.В.Савельев

Зав.кафедрой «ЭСМиК» СибАДИ, к.т.н.



В.С.Серебрянников

УТВЕРЖДАЮ

20 17 г.

Проректор по НР

Корчагин П.А.

**АКТ**

Экспериментальных исследований параметров пятна контакта рабочего органа легкого универсального катка с поверхностью суглинистого грунта.

**Объект исследований**

Геометрические характеристики пятна контакта рабочего органа катка с поверхностью грунтового слоя на различных этапах процесса уплотнения.

**Цель исследований**

Выявление параметров пятна контакта жесткого цилиндрического вальца с уплотняемой грунтовой средой для использования в расчетах деформативных характеристик активной области уплотняемого грунтового слоя при моделировании процесса взаимодействия грунтового слоя с рабочим органом катка.

**Условия проведения исследований**

Исследования были проведены на базе кафедры «ЭСМиК» СибАДИВ период с 15.07.17 по 20.07.17. Рассматривалось уплотнение суглинистого грунта влажности  $0.92 \pm 0.03$  оптимальной катком ДУ-107 полной массой 1500 кг.

Технические характеристики вибрационного катка ДУ-107	
Эксплуатационная масса, кг	1500
Вынуждающая сила, кН	6.2
Ширина рабочая, мм	700,00
Диаметр барабана, мм	550,00
Частота вибрации, мин <sup>-1</sup> , (Гц)	3768 (60)

### Результаты испытаний

№ прохода	Длина дуги пятна контакта, мм	Угол $\alpha_1$ , рад	Угол $\alpha_1$ , рад
1	163±12.5	0.269	0.324
3	137±10,24	0.222	0.275
5	121±11,32	0.2	0.24
7	110±9,65	0.182	0.218
9	98±10,43	0.159	0.198
11	90±8.77	0.148	0.179

К.ф.-м.н., доц. каф. соискатель СибАДИ



В.В. Михеев

Д.т.н., проф каф, «ЭСМиК» СибАДИ



С. В. Савельев

Зав. кафедрой «ЭСМиК»

СибАДИ, к.т.н.



В.С. Серебренников

УТВЕРЖДАЮ

« 17 » сентя 20 17 г.

Проректор по НР

Корчагин П.А.

**АКТ**

Экспериментальных исследований параметров пятна контакта рабочего органа среднего вибрационного катка с поверхностью супесчаного грунта.

**Объект исследований**

Размеры пятна контакта рабочего органа катка с поверхностью грунтового слоя на различных этапах процесса уплотнения.

**Цель исследований**

Выявление параметров пятна контакта жесткого цилиндрического вальца с уплотняемой грунтовой средой для использования в расчетах деформативных характеристик активной области уплотняемого грунтового слоя.

**Условия проведения исследований**

Исследования были проведены на базе предприятия

Рассматривалось уплотнение супесчаного грунта влажности  $(0.92 \pm 0.06)W_0$  катком StavostrojSTAVHS 102K полной массой 10276 кг.

Технические характеристики вибрационного катка StavostrojSTAVHS 102K	
Эксплуатационная масса, кг	10276
Вынуждающая сила, кН	2x50
Ширина рабочая, мм	1 800,00
Диаметр барабана, мм	1 200,00
Частота вибрации, мин <sup>-1</sup> , (Гц)	2 520,00 (42)

### Результаты испытаний

№ прохода	Длина дуги пятна контакта, мм	Угол $\alpha_1$ , рад	Угол $\alpha_1$ , рад
1	315±22.5	0.228	0.297
2	285±20,17	0.207	0.27
3	260±21,45	0.189	0.244
4	238±19,22	0.165	0.23
5	218±20,18	0.154	0.21
6	200±18.79	0.146	0.204

К.ф.-м.н., доц. каф. соискатель СибАДИ



В.В. Михеев

Д.т.н., проф каф, «ЭСМиК» СибАДИ



С. В. Савельев

Зав. кафедрой «ЭСМиК»

СибАДИ, к.т.н.



В.С. Серебренников

УТВЕРЖДАЮ

« 15 » декабря 2017 г.

Проректор по НР

Корчагин П.А.



## АКТ

Экспериментальных исследований величины поверхностной деформации грунтового слоя при ударном нагружении штампа в виде участка цилиндрической поверхности.

### Объект исследований

Закономерности поверхностного деформирования грунтового слоя при воздействии штампом в виде участка цилиндрической поверхности, подвергаемым ударному воздействию падающего груза.

### Цель исследований

Определение величины поверхностной деформации грунтового слоя и выявление ее неупругой части при деформировании под воздействием ударного нагружения штампа в виде участка цилиндрической поверхности для проверки степени адекватности математического моделирования процесса взаимодействия рабочего органа катка с активной областью уплотняемого слоя в случае отличия формы пятна контакта от плоской.

### Условия проведения исследований

Исследования были проведены на базе Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) в грунтовом канале кафедры «ЭСМиК».

Для проведения испытаний была использована установка на основе резистивного датчика смещений «Мегатрон». Сброс груза (гири массы 8 кг и 16 кг) осуществлялся с помощью специальной конструкции (Рис.1).

Датчик «Мегатрон» жестко крепился выдвижной частью к штампу, подвергаемого удару падающего груза. Кабель передачи данных осуществлял соединение измерительного датчика с аналогово-цифровым преобразователем и ЭВМ с установленным программным обеспечением для обработки информационного сигнала.

Характеристики грунта слоя определялись стандартными способами. Плотность определялась – методом режущих колец, влажность – методом высушивания до постоянной массы по ГОСТ 5180-84.



Рис.1 Измерительный комплекс и устройство для сброса груза в грунтовом канале СибАДИ

## Результаты испытаний

Случай штампа в виде участка цилиндрической поверхности.

Параметры проведения эксперимента -

Высота сброса груза 0.25 м ±0.01 м, 0.45 м ±0.01 м, 0.65 м ±0.01 м, 0.85 м ±0.01 м, 1.00 м ±0.01 м

Масса сбрасываемого груза 8 кг, 16 кг

Масса цилиндрического штампа 6.5 кг

Доверительная вероятность  $p=0.9$

Коэффициент Стьюдента  $t_{p,n}=2,13$

Радиус кривизны цилиндрического штампа 0.3±0.02 м

Угол раствора штампа 45±3°

Модуль деформации грунтовой среды был принят  $E_d=9МПа$ , жесткость среды, согласно расчетам.

Таблица 1. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h=0,38±0.01$  м

Высота сброса груза, м 0,25	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нос} \rangle = 7,39$ мм	$\Delta x_{нос} = 0,65$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нос}} = 8,8\%$	Масса груза $m$ , кг 8
	$x_{нос}$ , мм	7,69	7,72	7,12	7,33	7,08				
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нос} \rangle = 9,3$ мм	$\Delta x_{нос} = 0,92$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нос}} = 9,95\%$	16
	$\Delta x_{нос}$ , мм	8,69	9,22	9,18	9,83	9,58				
Высота сброса груза, м 0,45	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нос} \rangle = 9,35$ мм	$\Delta x_{нос} = 1,76$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нос}} = 12,6\%$	Масса груза $m$ , кг 8
	$x_{нос}$ , мм	8,52	9,28	9,23	9,83	9,88				
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нос} \rangle = 12,09$ мм	$\Delta x_{нос} = 1,52$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нос}} = 12,58\%$	16
	$\Delta x_{нос}$ , мм	13,15	12,28	11,21	12,03	11,77				
Высота сброса груза, м 0,65	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нос} \rangle = 10,76$ мм	$\Delta x_{нос} = 1,88$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нос}} = 17,47\%$	Масса груза $m$ , кг 8
	$x_{нос}$ , мм	11,65	11,28	10,01	11,22	9,63				
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нос} \rangle = 15,13$ мм	$\Delta x_{нос} = 1,61$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нос}} = 10,6\%$	16
	$\Delta x_{нос}$ , мм	15,95	14,82	14,01	15,22	15,63				
Высота сброса	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нос} \rangle = 11,97$ мм	$\Delta x_{нос} = 1,67$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нос}} = 13,94\%$	Масса груза $m$ , кг



груза, м 0,85	$x_{нов}, мм$	12,50	11,91	10,29	12,79	12,35				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 17,59$ мм	$\Delta x_{нов} = 2,17$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 12,32\%$	16
	$\Delta x_{нов}, мм$	17,21	16,32	18,09	19,26	17,06				
Высота сброса груза, м 1,00	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 13,31$ мм	$\Delta x_{нов} = 1,85$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 13,93\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, мм$	14,04	12,86	11,68	14,13	13,84				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 19,03$ мм	$\Delta x_{нов} = 2,46$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 12,92\%$	16
	$\Delta x_{нов}, мм$	18,40	17,53	19,86	20,57	18,81				

Таблица 2. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h=0,29 \pm 0,01$  м

Высота сброса груза, м 0,25	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 4,87$ мм	$\Delta x_{нов} = 0,82$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 17\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, мм$	4,600	4,364	5,316	5,116	4,940				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 6,7$ мм	$\Delta x_{нов} = 1,73$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 14\%$	16
$\Delta x_{нов}, мм$	7,00	7,79	5,76	6,04	6,92					
Высота сброса груза, м 0,45	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 6,22$ мм	$\Delta x_{нов} = 0,94$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 15\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, мм$	6,73	6,41	5,54	6,34	6,11				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 9,01$ мм	$\Delta x_{нов} = 1,52$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 17,5\%$	16
$\Delta x_{нов}, мм$	9,41	8,97	7,75	9,63	9,30					
Высота сброса груза, м 0,65	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 7,87$ мм	$\Delta x_{нов} = 1,03$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 13\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, мм$	8,09	7,71	8,60	7,63	7,34				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 11,2$ мм	$\Delta x_{нов} = 1,2$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 11\%$	16
$\Delta x_{нов}, мм$	11,31	11,68	11,12	11,57	10,27					
Высота сброса груза, м 0,85	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 9,00$ мм	$\Delta x_{нов} = 1,13$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 13\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, мм$	8,51	8,81	9,09	8,72	9,88				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 12,4$ мм	$\Delta x_{нов} = 2,17$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 12,32\%$	16
$\Delta x_{нов}, мм$	12,94	12,33	10,65	13,24	12,78					
Высота сброса груза, м 1,00	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 9,88$ мм	$\Delta x_{нов} = 0,59$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 6\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, мм$	9,51	9,54	10,23	9,37	10,76				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 13,45$ мм	$\Delta x_{нов} = 2,1$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 16\%$	16
$\Delta x_{нов}, мм$	13,58	13,37	11,42	14,39	14,49					

Таблица 3. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h=0,20 \pm 0,01$  м

Высота сброса	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 3,16$ мм	$\Delta x_{нов} = 0,50$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 16\%$	Масса груза $m$ , кг
---------------	---------	---	---	---	---	---	--	----------------------------	---------------------------------------	----------------------

груза, м 0,25	$x_{nos}$ , мм	3,30	3,14	2,72	3,38	3,26				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 4,8$ мм	$\Delta x_{nos} = 0,48$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 10\%$	16
	$\Delta x_{nos}$ , мм	4,63	4,78	4,92	5,10	4,57				
Высота сброса груза, м 0,45	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 4,43$ мм	$\Delta x_{nos} = 0,58$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 13\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{nos}$ , мм	4,55	4,34	4,84	4,29	4,13				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 6,15$ мм	$\Delta x_{nos} = 1,03$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 17\%$	16
$\Delta x_{nos}$ , мм	6,21	6,91	6,11	5,86	5,64					
Высота сброса груза, м 0,65	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 5,1$ мм	$\Delta x_{nos} = 0,9$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 18\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{nos}$ , мм	5,31	5,06	4,37	5,44	5,25				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 7,14$ мм	$\Delta x_{nos} = 0,78$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 11\%$	16
$\Delta x_{nos}$ , мм	6,87	7,11	6,74	7,64	7,37					
Высота сброса груза, м 0,85	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 5,82$ мм	$\Delta x_{nos} = 0,56$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 9,5\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{nos}$ , мм	5,88	5,79	5,68	6,22	5,52				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 8,17$ мм	$\Delta x_{nos} = 1,2$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 14\%$	16
$\Delta x_{nos}$ , мм	8,54	8,13	7,03	8,74	8,44					
Высота сброса груза, м 0,85	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 5,82$ мм	$\Delta x_{nos} = 0,56$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 9,5\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{nos}$ , мм	5,88	5,79	5,68	6,22	5,52				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 8,17$ мм	$\Delta x_{nos} = 1,2$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 14\%$	16
$\Delta x_{nos}$ , мм	8,54	8,13	7,03	8,74	8,44					
Высота сброса груза, м 1,00	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 6,35$ мм	$\Delta x_{nos} = 0,35$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 5\%$	Масса груза $m$ , кг
	$x_{nos}$ , мм	6,63	6,07	6,18	6,93	5,92				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{nos} \rangle = 8,78$ мм	$\Delta x_{nos} = 1,02$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{nos}} = 11,58\%$	16
$\Delta x_{nos}$ , мм	9,06	9,07	7,46	9,46	8,88					

Соискатель СибАДИ

В.В.Михеев

Д.т.н., проф. каф. «ЭСМиК» СибАДИ

С.В.Савельев

Зав. лабораторией

«Грунтовый канал» СибАДИ

В.Володарец

Зав.кафедрой «ЭСМиК» СибАДИ, к.т.н.

В.С.Серебренников

УТВЕРЖДАЮ

« 25 » сентября 20 18 г.

Проректор по НР

Корчагин П.А.

**АКТ**

Экспериментальных исследований величины поверхностной деформации грунтового слоя при ударном нагружении штампа в виде участка цилиндрической поверхности.

**Объект исследований**

Закономерности поверхностного деформирования грунтового слоя при воздействии штампом в виде участка цилиндрической поверхности, подвергаемым ударному воздействию падающего груза.

**Цель исследований**

Определение величины поверхностной деформации грунтового слоя и выявление ее неупругой части при деформировании под воздействием ударного нагружения штампа в виде участка цилиндрической поверхности для проверки степени адекватности математического моделирования процесса взаимодействия рабочего органа катка с активной областью уплотняемого слоя в случае отличия формы пятна контакта от плоской.

**Условия проведения исследований**

Исследования в натуральных условиях на супесчаных грунтах естественного залегания, в рамках выполнения работ по гранту РФФИ совместно с правительством Омской области РФФИ ОО 18-48-550005 р\_а.

Для проведения испытаний была использована установка на основе резистивного датчика смещений «Мегатрон». Сброс груза (гири массы 8 кг и 16 кг) осуществлялся с помощью специальной конструкции (Рис.1).

Датчик «Мегатрон» жестко крепился выдвижной частью к штампу, подвергаемого удару падающего груза. Кабель передачи данных осуществлял соединение измерительного датчика с аналогово-цифровым преобразователем и ЭВМ с установленным программным обеспечением для обработки информационного сигнала при деформировании.

Характеристики грунта слоя определялись стандартными способами. Плотность определялась – методом режущих колец, влажность – методом высушивания до постоянной массы по ГОСТ 5180-84.



Рис.1 Измерительный комплекс и устройство для сброса груза

## Результаты испытаний

Случай штампа в виде участка цилиндрической поверхности.

Параметры проведения эксперимента:

Высота сброса груза 0.25 м ±0.01 м, 0.45 м ±0.01 м, 0.65 м ±0.01 м, 0.85 м ±0.01 м, 1.00 м ±0.01 м

Масса сбрасываемого груза 8 кг, 16 кг

Масса цилиндрического штампа 6.5 кг

Доверительная вероятность  $p=0.9$

Коэффициент Стьюдента  $t_{p,n}=2,13$

Радиус кривизны цилиндрического штампа 0.3±0.02 м

Угол раствора штампа 45±3°

Модуль деформации грунтовой среды был принят  $E_d = 24 \text{ МПа}$ .

Таблица 1. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h=0,36\pm 0.01$  м

							$\langle \Delta x_{нов} \rangle$ , мм	$\Delta x_{нов}$ , мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}}$ , %	
Высота сброса груза, м 0,25	№ опыта	1	2	3	4	5	4,509	0,340	7,538	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	5,080	4,626	4,070	4,575	4,193				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	5,860	0,518	8,838	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	5,048	6,350	5,369	6,326	6,206				
Высота сброса груза, м 0,45	№ опыта	1	2	3	4	5	6,014	0,509	8,460	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	5,165	5,698	6,122	6,409	6,677				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	7,682	0,690	8,981	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	8,807	7,662	6,596	7,374	7,968				
Высота сброса груза, м 0,65	№ опыта	1	2	3	4	5	6,741	0,759	11,262	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	7,525	7,067	6,005	7,514	5,594				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	9,546	0,863	9,038	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	10,928	9,844	8,119	9,556	9,286				
Высота	№ опыта	1	2	3	4	5	7,246	8,088	6,536	Масса груза $m$ ,

сброса груза, м 0,85										кг
	$x_{нов}$ , мм	12,50	11,91	10,29	12,79	12,35				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	11,467	1,030	8,978	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	11,810	11,124	10,439	13,39 9	10,564				
Высота сброса груза, м 1,00	№ опыта	1	2	3	4	5	8,443	0,989	11,717	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	9,460	7,926	6,687	9,402	8,738				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	11,972	1,171	9,782	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	11,214	10,056	13,410	13,08	12,102				

Таблица 2. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h=0,27\pm 0,01$  м

							$\langle \Delta x_{нов} \rangle$ , мм	$\Delta x_{нов}$ , мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}}$ , %	
Высота сброса груза, м 0,25	№ опыта	1	2	3	4	5	3,018	0,296	9,813	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	2,719	2,847	3,600	3,060	2,862				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	4,292	0,532	12,403	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	4,615	5,238	3,741	3,898	3,970				
Высота сброса груза, м 0,45	№ опыта	1	2	3	4	5	4,019	0,292	7,268	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	4,382	4,367	3,702	3,683	3,961				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	5,783	0,486	8,408	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	5,797	5,888	4,833	6,052	6,347				
Высота сброса груза, м 0,65	№ опыта	1	2	3	4	5	4,893	0,381	7,778	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	4,840	5,082	5,396	4,963	4,185				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	7,049	0,632	8,964	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	7,602	7,167	6,359	7,895	6,219				
Высота сброса груза, м 0,85	№ опыта	1	2	3	4	5	5,638	0,583	10,332	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	5,045	5,756	5,705	5,001	6,684				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	7,885	0,902	11,434	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	8,445	8,445	8,445	8,445	8,445				
Высота сброса груза, м 1,00	№ опыта	1	2	3	4	5	6,296	0,670	10,647	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}$ , мм	6,100	5,828	6,636	5,445	7,470				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	$\langle \Delta x_{нов} \rangle = 13,45$ мм	$\Delta x_{нов} = 2,1$ мм	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}} = 16\%$	16
	$\Delta x_{нов}$ , мм	13,58	13,37	11,42	14,39	14,49				

Таблица 3. Результаты опыта при глубине грунтового слоя  $h=0,18\pm 0,01$  м

							$\langle \Delta x_{нов} \rangle, \text{мм}$	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	$\varepsilon_{\Delta x_{нов}}, \%$	
Высота сброса груза, м 0,25	№ опыта	1	2	3	4	5	2,010	0,204	10,150	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	2,229	1,790	1,721	2,092	2,216				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	2,975	0,240	8,072	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	2,795	3,185	3,311	2,965	2,617				
Высота сброса груза, м 0,45	№ опыта	1	2	3	4	5	2,728	0,262	9,605	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	3,145	2,747	2,877	2,505	2,365				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	4,013	0,370	9,224	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	3,741	4,664	4,214	3,877	3,567				
Высота сброса груза, м 0,65	№ опыта	1	2	3	4	5	3,320	0,366	11,031	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	3,653	3,396	2,602	3,647	3,301				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	4,525	0,382	8,452	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	3,982	4,879	4,128	4,651	4,985				
Высота сброса груза, м 0,85	№ опыта	1	2	3	4	5	3,623	0,359	9,909	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	3,932	3,409	3,238	4,203	3,333				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	5,139	0,544	10,590	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	5,718	5,512	4,102	5,380	4,981				
Высота сброса груза, м 0,85	№ опыта	1	2	3	4	5	3,701	0,315	8,520	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	3,398	3,800	3,898	4,157	3,254				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	5,313	0,530	9,971	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	5,859	5,013	4,547	6,040	5,106				
Высота сброса груза, м 1,00	№ опыта	1	2	3	4	5	4,346	3,459	3,606	Масса груза $m$ , кг
	$x_{нов}, \text{мм}$	6,63	6,07	6,18	6,93	5,92				8
	№ опыта	1	2	3	4	5	5,474	0,614	11,225	16
	$\Delta x_{нов}, \text{мм}$	5,440	5,705	4,317	6,291	5,617				

Соискатель СибАДИ



В.В.Михеев

д.т.н., проф. каф. «ЭСМиК» СибАДИ



С.В.Савельев

Зав.кафедрой «ЭСМиК» СибАДИ, к.т.н.



В.С.Серебренников

## ЛИСТИНГИ ПРОГРАММ

## ▼ Ввод исходных данных

```

> rho :=proc( flag, k_0)
  if flag = 1 then do return( 1450·k_0) : od end if
  if flag = 2 then do return( 1800·k_0) : od end if
end proc:

```

## ▼ Процедура вычисления механических характеристик грунта

```

> E_pl :=proc( flag, x)
  if flag = 1 then do return( 0.3857·x2 - 0.8543·x + 6.56) · 106 : od end if
  if flag = 2 then do return( x3 - 5.3571·x2 + 16.643·x - 2.2) · 106 : od end if
end proc:
> E_el :=proc( flag, x)
  if flag = 1 then do return( 0.5429·x2 - 1.3371·x + 14.96) · 106 : od end if
  if flag = 2 then do return( 1.4286 - 4.5714·x + 18.6) · 106 : od end if
end proc:
> E_def :=proc( flag, x)
  if flag = 1 then do return( 0.2284·x2 - 0.505·x + 4.5342) · 106 : od end if
  if flag = 2 then do return( 0.8579·x2 + 1.3083·x + 6.8509) · 106 : od end if
end proc:
> S_d :=proc( flag, x)
  if flag = 1 then do return( 0.0169·x2 + 0.0643·x + 0.3182) · 106 : od end if
  if flag = 2 then do return( 0.008·x2 + 0.0862·x + 0.306) · 106 : od end if
end proc:
> Eta :=proc( flag, x)
  if flag = 1 then do return( 0.0833·x3 - 0.0857·x2 + 1.131·x + 0.06) · 108 : od end if
  if flag = 2 then do return( 0.075·x3 - 0.3893·x2 + 1.1357·x - 0.32) · 108 : od end if
end proc:

```

## ▼ Процедура вычисления жесткости участка активной зоны (конечная глубина)

```

> C_act_prizm :=proc( l, b, h, t_x, t_y, E)
  return  $\left( E \cdot \frac{\ln\left(\frac{b \cdot (2 \cdot t_y \cdot h + l)}{l \cdot (2 \cdot t_x \cdot h + b)}\right)}{2 \cdot b \cdot t_y - 2 \cdot l \cdot t_x} \right)$ ;
end proc:

```

## ▼ Процедура вычисления жесткости участка активной зоны (малый размер приповерхностной области)

```

> C_act_z :=proc( flag, k_0, l, b, S_1, S_2, S_0)
  return  $\left( \text{rho}( \text{flag}, k_0) \cdot 552.13 \cdot l \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2 \cdot \text{abs}\left(\exp\left(\frac{S_1}{S_0}\right) - \exp\left(\frac{S_2}{S_1}\right)\right)\right)$ ;
end proc:

```

## ▼ Процедура вычисления массы участка активной зоны

```

> M_act_z :=proc( flag, k_0, l, b, S_1, S_2, S_0)
  return  $\left( \text{rho}( \text{flag}, k_0) \cdot 552.13 \cdot l \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2 \cdot \text{abs}\left(\exp\left(\frac{S_1}{S_0}\right) - \exp\left(\frac{S_2}{S_1}\right)\right)\right)$ ;
end proc:

```



## Процедура записи и решения уравнений движения активной зоны

```

> restart;
> d2 := proc(x2, x1, x0, t)
  return  $\left( \frac{(x2 - 2 \cdot x1 - x0)}{t^2} \right)$ 
end proc;
> d1 := proc(x1, x0, t)
  return  $\left( \frac{(x1 - x0)}{t} \right)$ 
end proc;
> d0 := proc(x1, x0, t)
  return (x1 - x0)
end proc;
> EQ := proc(m, m_0, b, c, x2, x1, x0, F_f, f_t, t)
  return (m · d2(x2, x1, x0, t) + d1(m, m_0, t) · d1(x1, x0, t) + b · d1(x1, x0, t) + c · x0 + F_f + f_t)
end proc;
> for p from 1 to N
  k := 3;
  for i from 1 to k do
    eq[i] := EQ(M[i], M_0[i], b[i], c[i], x[i][p+2], x[i][p+1], x[i][p], F_f[i], 0, t)
      - EQ(0, 0, b[i], c[i], x[i+1][p+2], x[i+1][p+1], x[i+1][p], F_f[i+1], 0, t)
      -  $\left( EQ(0, 0, 0, c[i-1], x[i][p+2], x[i][p+1], x[i][p], 0, 0, t) \right.$ 
      -  $\left. EQ(0, 0, 0, c[i-1], x[i-1][p+2], x[i-1][p+1], x[i-1][p], 0, 0, t) \right)$ ;
    if i = 1 then
      eq[i] = 0;
      eq[i] := EQ(M, M, b[i], c[i], x[i][p+2], x[i][p+1], x[i][p], 0, f_t, t)
      - EQ(0, 0, b[i], c[i], x[i+1][p+2], x[i+1][p+1], x[i+1][p], F_f[i+1], 0, t);
    end if;
    if i = k then
      eq[i] = 0;
      eq[i] := EQ(M[i], M_0[i], b[i], c[i], x[i][p+2], x[i][p+1], x[i][p], 0, F_f[i], t)
      -  $\left( EQ(0, 0, 0, c[i-1], x[i][p+2], x[i][p+1], x[i][p], 0, 0, t) - EQ(0, 0, 0, c[i-1], x[i-1][p+2], x[i-1][p+1], x[i-1][p] \right.$ 
      -  $\left. + 1, x[i-1][p], 0, 0, t) \right)$ ;
    end if;
  end do;

  for i from 1 to k do
    z[i][p+2] := evalf(solve(eq[i], x[i][p+2])); z_pl[i][p+2] := zeta[i] · z[i][p+2]; if zeta[i] < 1 then
      W[i][p+2] :=  $\frac{c[i] \cdot (z\_pl[i][p+2])^2}{2}$ 
    elif zeta[i] = 1 then
      W[i][p+2] := F_f[i] · z_pl[i][p+2]
    end if;
  end do;
  W_t[p+2] := sum(W[n][p+2], n = 1 .. k);
end do;

```

## АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

Утверждаю  
Генеральный директор  
ООО «Стройсервис»  
Вагнер Я. А.



Акт внедрения технологических рекомендаций  
уплотнения грунтовых насыпей

ООО «Стройсервис», рассмотрело рекомендации по энергоэффективной методике уплотнения грунтовых слоёв вибрационными катками, разработанные в ФГБОУ ВО «СибАДИ» Михеевым В.В и Савельевым С.В.

Анализ предложенной методики позволяет считать целесообразной её использование при проведении дорожно-строительных работ.

Заместитель генерального директора  
по качеству ООО «Стройсервис», к.т.н.

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to G.B. Starikov.

Старков Г.Б.

Утверждаю  
директор  
ООО «Завод дорожных машин»  
Кузнецов  
« 02 » 2019 г.



#### Акт приёмки методики к внедрению

Завод дорожных машин (г. Рыбинск) рассмотрел методику определения энергоэффективных параметров вибрационных дорожных катков, разработанную в ФГБОУ ВО «СибАДИ» С. В. Савельевым и В. В. Михеевым.

Результаты проведённых исследований авторами исследований являются актуальными для отрасли дорожного машиностроения. Положения методики рекомендуется использовать при конструировании дорожных катков в рамках производственной программы

Главный инженер

Начальник  
производственного отдела



Утверждаю

директор

ООО «Завод дорожных машин»

П. А. Кузнецов

2019 г.

### Акт внедрения

Завод дорожных машин (г. Рыбинск) рассмотрел новые конструкции рабочих органов дорожных катков: гидрошинный с регулируемой жёсткостью и рабочий орган с двойной обечайкой, регулирующий контактные давления.

Конструкции, разработанные в ФГБОУ ВО «СибАДИ» В. В. Михеевым и С. В. Савельевым, способны повысить эффективность уплотнения грунтовых насыпей в дорожном строительстве и могут быть рекомендованы к внедрению в производственную программу.

Главный инженер

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to the Chief Engineer.

Начальник  
производственного отдела

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to the Head of the Production Department.

## ПАТЕНТЫ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2572478

**САМОХОДНЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ КАТОК**

Патентообладатель(ли): **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ" (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

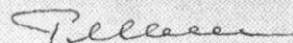
Заявка № 2014130611

Приоритет изобретения 22 июля 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации 10 декабря 2015 г.

Срок действия патента истекает 22 июля 2034 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2522364

**ВАЛЕЦ ДОРОЖНОГО КАТКА**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013107580

Приоритет изобретения 20 февраля 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 16 мая 2014 г.

Срок действия патента истекает 20 февраля 2033 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 180102

**ПЛАНЕТАРНЫЙ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЬ С  
РЕГУЛИРУЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ЦЕПНОЙ  
ПЕРЕДАЧЕЙ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Сибирский государственный автомобильно-дорожный  
университет (СибАДИ)" (RU)*

Авторы: *Савельев Сергей Валерьевич (RU), Михеев Виталий  
Викторович (RU), Шушубаева Мадина Каиргельдиновна (RU)*

Заявка № 2017130066

Приоритет полезной модели 24 августа 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 04 июня 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 24 августа 2027 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2631011

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАПРАВЛЕННОЙ  
СИЛЫ ИНЕРЦИИ**

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "ОМСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"  
(RU)**

Авторы: **Михеев Виталий Викторович (RU), Савельев Сергей  
Валерьевич (RU), Белодед Александр Сергеевич (RU)**

Заявка № 2016128385

Приоритет изобретения 12 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 15 сентября 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 12 июля 2036 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 184799

## ГИДРОШИНА ВИБРАЦИОННОГО КАТКА

Патентообладатели: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (RU), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет" (СИБАДИ) (RU)*

Авторы: *Михеев Виталий Викторович (RU), Савельев Сергей Валерьевич (RU)*

Заявка № 2018120986

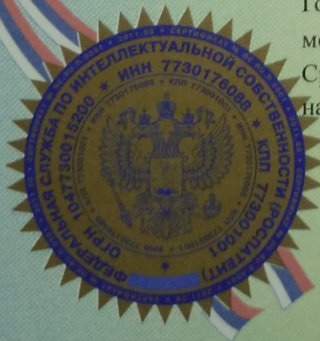
Приоритет полезной модели 06 июня 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 09 ноября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 06 июня 2028 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 162483

**ДОРОЖНЫЙ КАТОК**

Патентообладатель(ли): **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ "ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ" (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

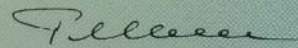
Заявка № 2015157015

Приоритет полезной модели 29 декабря 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 24 мая 2016 г.

Срок действия патента истекает 29 декабря 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

