

Федеральное государственное  
автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт

Кафедра Строительных материалов и технологий строительства

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ И.Г. Енджиевская

подпись \_\_\_\_\_ инициалы,  
фамилия « \_\_\_\_\_ »

\_\_\_\_\_ 2021 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема: Непрерывный неразрушающий контроль уплотнения дорожных покрытий

08.04.01 Строительство

код и наименование направления

08.04.01.00.07 Комплексная механизация и автоматизация строительства

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель \_\_\_\_\_ доц., канд. техн. наук А.П. Прокопьев  
подпись, дата \_\_\_\_\_ должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник \_\_\_\_\_ А.И. Шведов  
подпись, дата \_\_\_\_\_ инициалы, фамилия

Рецензент \_\_\_\_\_ проф., д-р техн. наук В. И. Иванчура  
подпись, дата \_\_\_\_\_ должность, ученая степень инициалы, фамилия

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ доц., канд. техн. наук Е.С. Турышева

Красноярск 2021

## **РЕФЕРАТ**

На 78 с., 41 рисунок, 5 таблиц

**АСФАЛЬТОБЕТОН, ВИБРАЦИОННЫЕ КАТКИ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА, ПОКАЗАТЕЛИ УПЛОТНЕНИЯ, НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ УПЛОТНЕНИЯ, СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНА, КОЛЕБАНИЯ ВИБРОВАЛЬЦА, ХАРАКТЕР КОЛЕБАНИЙ**

В данной работе проводится анализ методов контроля качества уплотнения асфальтобетонной смеси, в частности, системами непрерывного контроля при уплотнении виброкатками. Разработана математическая модель, описывающая процесс уплотнения. С её помощью изучен характер колебаний вибровальца, рассчитаны показатели уплотнения для систем непрерывного контроля качества уплотнения и выбран наиболее эффективный показатель, рекомендуемый для использования на отечественных виброкатках.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Основные методы контроля уплотнения дорожно-строительных материалов .....	7
2. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения вибрационными катками .....	15
2.1. Показатели уплотнения, используемые в системах непрерывного контроля уплотнения дорожно-строительных материалов .....	15
2.2. Сравнение показателей уплотнения для систем непрерывного контроля уплотнения вибрационными катками .....	27
2.3. Состав оборудования для систем непрерывного контроля.....	30
2.4. Выводы по главе .....	32
3. Анализ теоретических исследований взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым материалом.....	33
4. Разработка математической модели системы «вибрационный валец - уплотняемый асфальтобетон» .....	51
4.1. Описание математической модели .....	51
4.2. Обоснование параметров математической модели.....	55
и проведение вычислений .....	55
4.3. Выводы по главе .....	65
5. Исследование показателей непрерывного контроля уплотнения асфальтобетона для отечественных вибрационных катков.....	66
5.1. Показатель CCV (Compaction Control Value).....	69
5.2. Показатель RMV (Resonance Meter Value).....	70
5.3. Показатель CMV (Compaction Meter Value).....	71
5.4. Выводы по главе .....	72
Заключение .....	74
Список литературы .....	75

## Введение

В современном дорожном строительстве технологии производства техники и материалов, применяемые при уплотнении дорожного полотна, быстро развиваются и с каждым годом совершенствуются. Однако стоит уделить особое внимание контролю качества выполнения работ по уплотнению строительного-дорожных материалов. Недоуплотнение является одной из основных причин нарушения ровности и преждевременного разрушения автодорог.

Главная проблема состоит в том, что на протяжении достаточно продолжительного периода времени все модели катков создавались и продолжают создаваться не на основе теоретического осмысления самого процесса уплотнения, а эмпирическим путем, методом проб и ошибок через практический эксперимент. Функционально-технологическая оценка виброкатков производится приблизительно и интуитивно по значениям отдельных показателей и параметров (общий вес, амплитуда и частота колебаний вальца, центробежная сила). Но чаще всего такая оценка строится на доверии к фирме-производителю виброкатка.

В настоящее время в России проверка качества уплотнения проводится в соответствии с СП 78.13330.2012 «Свод правил. Автомобильные дороги» и проверка проводится лишь выборочно, затрагивая менее 1% от всей площади уплотненного участка. У операторов вибрационных катков отечественного производства отсутствует информация о состоянии уплотняемого материала во время производства работ, что, в свою очередь, не позволяет своевременно обнаруживать и устранять недоуплотнённые участки и обеспечивать длительную прочность автомобильных дорог с учётом изменяющихся погодноклиматических условий.

Данную проблему можно решить за счет установки на вибрационные катки систем непрерывного контроля уплотнения. В зарубежной практике данные

системы уже достаточно давно включаются в базовую комплектацию большинства моделей вибрационных катков. Таким образом, актуальной является разработка системы непрерывного контроля уплотнения асфальтобетона для вибрационных катков российского производства.

Целью работы является исследование существующих методов контроля качества уплотнения асфальтобетона, в частности, с использованием систем непрерывного контроля плотности и разработка рекомендаций для применения на отечественных вибрационных катках наиболее эффективной и универсальной системы, позволяющей повысить качество работ при строительстве автомобильных дорог.

Для достижения поставленной цели в выпускной квалификационной работе решались следующие задачи:

- анализ функциональных возможностей и применимости в отечественной практике существующих зарубежных систем непрерывного контроля уплотнения асфальтобетонных смесей вибрационными катками;
- разработка математической модели системы «вибрационный валец - уплотняемый асфальтобетон», применимую для компьютерных вычислений;
- проведение вычислительного эксперимента для сравнения эффективности существующих показателей уплотнения асфальтобетонных смесей;
- выбор наиболее эффективной системы непрерывного контроля (показателя) качества уплотнения асфальтобетонных смесей для использования на отечественных виброкатках.

## **1. Основные методы контроля уплотнения дорожно-строительных материалов**

В основу оценки качества уплотнения грунта земляного полотна и асфальтобетонного дорожного покрытия в России, как известно, положен принцип сравнения плотности, полученной в насыпи или выемке, с плотностью того же материала в лабораторном приборе стандартного уплотнения, которая приравнивается к 100% степени уплотнения.

Стандартный метод оценки качества уплотнения обязательно предусматривает взятие проб и вырубков (кернов) и их проверку в лабораторных условиях. В итоге интересующий коэффициент уплотнения, влажность материала и другие показатели могут быть предоставлены производителю дорожных работ минимум через двое суток, когда поправить качество уплотнения бывает сложно, а в случае асфальтобетона невозможно.

На практике часто используют метод контроля не самой плотности покрытия, а технологии его уплотнения выбранным средством, установленной при пробном уплотнении. Точное соблюдение технологических режимов выполнения этой операции, как правило, обеспечивает высокую вероятность получения требуемого результата по качеству. Поэтому обязательный отбор пробы или выемки вместе с лабораторными процедурами можно рассматривать как проверочный, без острой необходимости выдачи результата. Однако при возможном изменении типа и разновидности дорожного покрытия или его состояния такой метод контроля может давать сбой.

В таких случаях дорожники широко используют право проводить контроль плотности с обязательным отбором проб материала в объеме, составляющем не менее 10% от всех положенных измерений. В остальных 90% допускается применять косвенные методы и экспресс-приборы, в том числе и упрощенные, но обеспечивающие соответствующую достоверность результа-

тов. Подобные приборы и устройства, порой достаточно простые и легкие, удобные и дающие быстрый результат.

Оперативный контроль является важнейшим видом контроля, так как даёт возможность осуществлять коррекцию технологического процесса. Особенно это важно при устройстве асфальтобетонных слоёв в процессе их уплотнения.

Из имеющегося многообразия приборов и методов наиболее распространёнными и применяемыми во многих странах оказались так называемые плотномеры-пенетрометры статического и динамического типа (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Динамический плотномер-пенетромметр ДПА

Одним из первых подобных плотномеров-пенетрометров, использовавшихся проф. Зелениным А. Н., был плотномер ДорНИИ, более известный под названием «ударник ДорНИИ». Привлекательность его состояла в простоте конструкции, удобстве применения и скорости получения результата.

Да и сам критерий оценки плотности был прост и понятен: количество ударов груза 2,5 кгс, падающего с высоты 40 см, необходимое для погружения на глубину 10 см цилиндрического стержня с площадью основания плоского наконечника 1 см<sup>2</sup> (для слабых и рыхлых грунтов был второй наконечник с площадью 2 см<sup>2</sup>).

По количеству таких ударов и заранее построенному тарировочному графику с учетом типа материала и его влажности можно было быстро найти коэффициент уплотнения и решать вопрос о качестве уплотнения земляного полотна.

Современные плотномеры-пенетрометры, несмотря на солидность подведенной научной базы, усложнение методологии измерений отдельными их образцами (двойная пенетрация, совмещение тарировки по  $K_y$  и влажности и др.) и накопленный практический опыт использования, мало отличаются по своей сути от «ударника ДорНИИ» и друг от друга. Это отличие состоит в основном в форме и размерах наконечника (чаще всего конус с углом при вершине 30, 45 или 60°), способе погружения наконечника (статическое задавливание или серия ударов) и измеряемой величине, служащей критерием оценки качества уплотнения.

В Санкт-Петербургском политехническом университете разработан прибор-пористомер (Рисунок 1.2) для оперативного контроля качества уплотнения асфальтобетона. Принцип работы прибора основан на продувании воздуха через слой асфальтобетона.

При работе прибор устанавливают на поверхность контролируемого покрытия. Резиновые кольца гидрозатвора создают между корпусом прибора и покрытием замкнутый объём, который вместе с ресивером образует рабочую камеру. Для полной герметизации рабочей камеры от окружающей атмосферы в зазор между резиновыми кольцами выдавливается консистентная смазка путём вращения гайки-поршня.



С помощью ручного насоса в рабочей камере создаётся разрежение, которое фиксируется вакууметром. Воздух, проходя через поры в дорожном покрытии, попадает в рабочую камеру. Первоначально созданное в ней разрежение падает. В зависимости от пористости покрытия расход воздуха, поступающего через него в камеру, будет различным. По скорости изменения разрежения в рабочей камере судят о плотности и пористости асфальтобетонного покрытия. Имеются научные и конструкторские проработки по установке подобного автоматизированного устройства на дорожных катках [9].

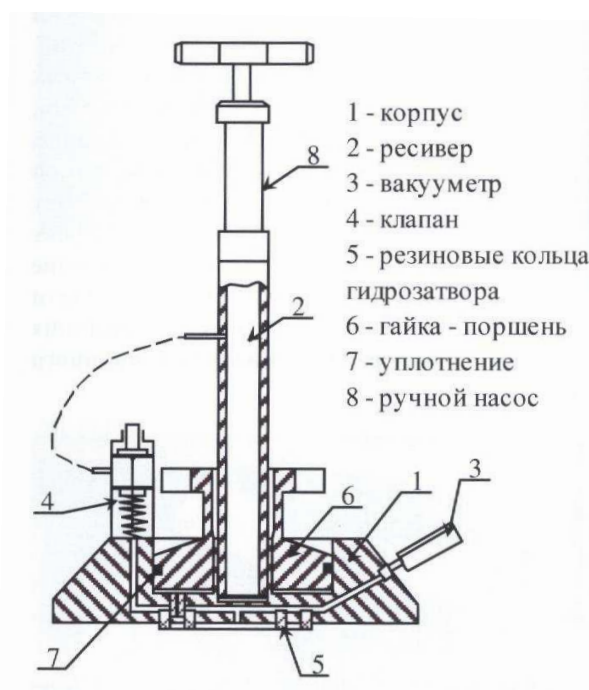


Рисунок 1.2 – Схема прибора-пористомера [10]

В настоящее время за рубежом широкое распространение получил радиометрический контроль плотности асфальтобетонных покрытий. Метод основан на применении радиоактивных изотопов, излучающих при распаде  $\gamma$ -лучи, которые представляют собой одну из форм электромагнитного излучения. Проходя через слой асфальтобетона, последний ослабляет (фотоадсорбция) или рассеивает (эффект Комптона) поток этого излучения. Это явление позволяет определять изменение плотности исследуемого материала. Этот метод измерения плотности часто называют методом вторичного рассеяния.

Метод вторичного рассеяния чаще всего применяется при контроле асфальтобетонных дорожных покрытий. При измерениях по этому методу источник излучения и детектор находятся в определенных позициях вблизи поверхности контролируемого слоя. Проникающие в испытываемую среду  $\gamma$ -кванты рассеиваются и возвращаются к детектору, который воспринимает определенное количество  $\gamma$ -квантов.

Эти кванты преобразуются в электрические импульсы, поступающие в измерительный прибор (Рисунок 1.3). С увеличением количества единичных измерений возрастает и число подсчитанных импульсов. Поэтому точность измерения радиоактивного излучения возрастает с увеличением количества подсчитываемых импульсов и зависит от длительности времени измерения, толщины слоя, плотности прилегания прибора к поверхности контролируемого покрытия и т.п. Имеются разработки, предусматривающие установку таких радиоизотопных приборов на катке для непрерывного контроля плотности в процессе укатки.



Рисунок 1.3 – Прибор радиометрического контроля уплотнения асфальтобетона

Особым преимуществом изотопных методов измерений является их нечувствительность к высоким температурам, с которыми приходится сталкиваться при укладке асфальта. Это даёт возможность производить замеры на горячем асфальтобетоне непосредственно возле асфальтоукладчика или катка.

Данные приборы менее подходят для грунтов, так как нуждаются в тарировке по каждому виду материала и очень чувствительны на включения в грунте камней. Для контроля качества уплотнения скально-крупнообломочных насыпей возможен другой косвенный способ – геодезический. Их качество будет приемлемым, если общая осадка поверхности уплотнения, полученная по результатам работы уплотняющей машины, составит 8–10% ( $K_y=0,95$ ) и 11–12% ( $K_y=0,98$ ) от начальной толщины отсыпанного слоя или всей насыпи.

Получил широкое распространение на дорожных работах прибор ПАБ (измеритель плотности асфальтобетона). Принцип действия прибора базируется на установленной корреляционной зависимости плотности асфальтобетона от его диэлектрической проницаемости. Датчик специальной конструкции выдаёт сигнал пропорциональный диэлектрической проницаемости контролируемого асфальтобетонного покрытия.

На точность измерений оказывают влияние следующие факторы:

- толщина и температура асфальтобетонного покрытия;
- наличие поверхностной и структурной влаги;
- геометрия и однородность поверхности покрытия.

Влияние толщины контролируемого покрытия учитывается введением ее значения в память прибора. Для автоматической компенсации влияния температуры асфальтобетонной смеси на точность измерения её плотности, прибор оснащен бесконтактным пирометром. В приборе применены методы компенсации влияния влажности покрытия, однако, при наличии поверхностной влаги, ее необходимо удалять перед измерениями.

Конструктивно прибор (Рисунок 1.4) состоит из электронного блока 1 и преобразователя 2, связанных между собой посредством кронштейна 3, и ручки 4. На лицевой панели электронного блока 1 расположена клавиатура и графический дисплей, в правой боковой части его корпуса установлен разъём 5 для связи с компьютером. В нижней части корпуса расположен датчик с измерительными электродами. Под корпусом электронного блока 1 в кронштейне 3 расположен пирометр, предназначенный для измерения температуры покрытия и компенсации температурных погрешностей, крышка 6 батарейного отсека с литиевым источником питания (извлечение и замена литиевой батареи потребителем не допускается). На боковом торце корпуса электронного блока расположена кнопка сброса питания на микроконтроллере 7.



Рисунок 1.4 – Внешний вид прибора ПАБ [29]

Поиск и разработка новых методов и средств контроля качества уплотнения грунта и асфальтобетона велись всегда и во многих странах [34, 47]. Особенно заманчивыми и многообещающими были идеи и предложения по установке контролирующих устройств непосредственно на катках с перспек-

тивной осуществлять непрерывный, а может быть, и автоматический контроль.

В основе всех таких устройств и разработок лежал один принцип – зависимость либо сопротивления качению вальца или шины (по изменению крутящего момента), либо осадки поверхности качения (по копирному устройству), либо ее модуля деформации или упругости, либо амплитуды колебаний рамы или вальца виброкатка от плотности грунта или другого уплотняемого материала.

В настоящее время более 80% катков, используемых для уплотнения дорожно-строительных материалов, являются вибрационными. Применение вибрационных катков дало возможность осуществить динамический непрерывный контроль качества уплотнения. В состав такого устройства входят измеритель ускорения (акселерометр), смонтированный на вибрирующем вальце катка; микропроцессор, обрабатывающий результаты измерения ускорения; индикатор; печатающее или записывающее устройство, либо экран для вывода обработанных данных.

Принцип работы такой системы заключен в замере и сопоставлении значений величин энергии, передаваемой виброкатком на поверхность уплотняемого слоя и отраженной от него на корпус вальца. В зависимости от степени плотности материала величина поглощаемой им энергии будет различной. С увеличением плотности материала величина поглощаемой им энергии снижается, и большая часть её будет передаваться на корпус вальца. Число проходов виброкатка для достижения требуемой степени уплотнения, её приращения за каждый проход катка определяются на опытном участке.

## **2. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения вибрационными катками**

### **2.1. Показатели уплотнения, используемые в системах непрерывного контроля уплотнения дорожно-строительных материалов**

Непрерывное измерение характеристик уплотняемого материала в процессе уплотнения его вибрационным катком за рубежом получило определение «непрерывный контроль уплотнения» (Continues Compaction Control). Ведущие зарубежные производители вибрационных катков (CAT, AMMANN, BOMAG, DYNAPAC, SAKAI) уже достаточно давно включают в базовую комплектацию своих машин системы, позволяющие непрерывно контролировать плотность дорожно-строительных материалов во время производства работ. В России же такие системы не производятся, что не позволяет на должном уровне конкурировать отечественному производителю на рынке уплотняющей техники. Таким образом, возникает необходимость соответствующих исследований процесса уплотнения вибрационными катками.

При уплотнении виброкатками в большом диапазоне могут изменяться свойства уплотняемого материала (температура, плотность, влажность, жесткость, вязкость и др.), а также режимы работы катка (частота и характер колебаний, вынуждающее усилие вибровозбудителя, скорость катка). На работу систем непрерывного контроля уплотнения оказывают влияние неравномерность распределения характеристик уплотняемого материала и наличие переходных процессов при изменении режима работы вибровозбудителя катка.

Исследователи и производители виброкатков выделяют следующие режимы колебаний вибрационного вальца катка [30]: безотрывный режим колебаний («Continuouscontact»), режим частичного отрыва («Partialuplift»), «двойной прыжок» («Doublejump»), раскачивание вибровальца («Rockingmotion») и хаотический режим колебаний («Chaoticmotion») (Рисунок 2.1.1).

При работе вибрационного катка в режиме постоянного контакта с поверхностью, колебания вибрационного вальца имеют синусоидальный характер с равными амплитудами колебаний рабочего органа.

Режим частичного отрыва вальца от уплотняемого материала – основной рабочий режим работы виброкатка. В каждом цикле колебаний рабочий орган отрывается от поверхности, но при этом сохраняется синусоидальный характер колебаний и равенство амплитуд колебаний вальца.

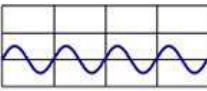
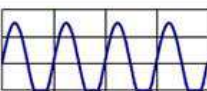
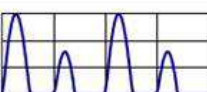
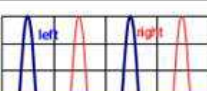
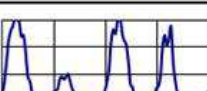
Движение вальца	Контакт	Режим работы	Характер колебаний	Работа с ССС	Плотность	Скорость катка	Амплитуда
Периодическое	Постоянный контакт	Постоянный контакт		Да	Низкая ↓	Быстро ↑	Низкая ↓
	Периодический отрыв	Периодический отрыв		Да			
		«Двойной прыжок»		Да			
		Раскачивание		Нет			
Хаотическое	Непериодический отрыв	Хаотическое движение		Нет	Высокая	Медленно	Высокая

Рисунок 2.1.1 – Влияние свойств уплотняемого материала и режима работы вибрационного катка на реализуемый режим колебаний вальца [23]

При переходе из режима частичного отрыва в режим «двойного прыжка» характер колебаний вибрационного вальца изменяется на субгармонический. Амплитуды смежных колебаний вальца не одинаковы, что приводит к потере управляемости вибрационного катка, повреждению подшипниковых узлов и креплений вальца к раме, а также негативно сказывается на эффективности процесса уплотнения. Поэтому, важно отслеживать переход в нежелательный режим работы вибрационного вальца (режим «двойного прыжка»).

Первые исследования измерений состояния грунта с использованием вибрационного катка датируется 1974 годом, когда доктор Heinz Thurner из шведской дорожной администрации выполнял полевые исследования с пяти-тонным вибрационным катком DYNAPAC с тракторным приводом [38]. На грунтовый вибрационный каток был установлен акселерометр для измерения вертикальной составляющей ускорения вибрационного вальца во время уплотнения грунта. В процессе уплотнения данные с акселерометра записывались, затем по этим данным составлялся спектр вертикальных ускорений вибрационного вальца катка. Испытания показали, что в частотной области отношение амплитуды гармоники спектра ускорения вибрационного вальца на удвоенной рабочей частоте и амплитуды гармоники спектра ускорения вибрационного вальца на рабочей частоте может быть связано с состоянием уплотняемого грунта, что подтверждено при полевых тестах с использованием статически нагруженной пластины. При изменении режима работы вибрационного катка изменяется характер колебаний и, следовательно, спектр ускорений вибрационного вальца. При увеличении степени уплотнения грунта увеличивается амплитуда колебаний вибрационного вальца и в спектре ускорения появляются дополнительные гармоники и субгармоники. В 1975 году Heinz Thurner основал фирму GEODYNAMIK с партнером Åke Sandström, чтобы продолжить развитие устанавливаемых на вибрационные катки систем непрерывного контроля уплотнения грунта, а в дальнейшем и асфальтобетонных смесей. В сотрудничестве с доктором Lars Forssblad из фирмы DYNAPAC, фирма GEODYNAMIK разработала и внедрила показатель уплотнения «Compaction Meter Value» (CMV) в 1978 году.

Определение CMV основано на анализе спектра вертикальных ускорений (данные с акселерометра) вибрационного вальца катка за два цикла вибрации. Показатель уплотнения CMV рассчитывается по формуле [34]

$$CMV = C \cdot \frac{A_{2f}}{A_f} ,$$



где  $A_f$  – амплитуда вертикальных ускорений вибрационного вальца с частотой изменения вынуждающего усилия  $f$  (номинальная частота вибрационного вальца),  $\text{м/с}^2$ ;  $A_{2f}$  – амплитуда вертикальных ускорений вибрационного вальца на удвоенной частоте  $2f$  (амплитуда второй гармоники спектра ускорения вибрационного вальца),  $\text{м/с}^2$ ;  $C$  – коэффициент калибровки (по [39] чаще всего равный 300). Изменение спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца по мере уплотнения показано на Рисунке 2.1.2.

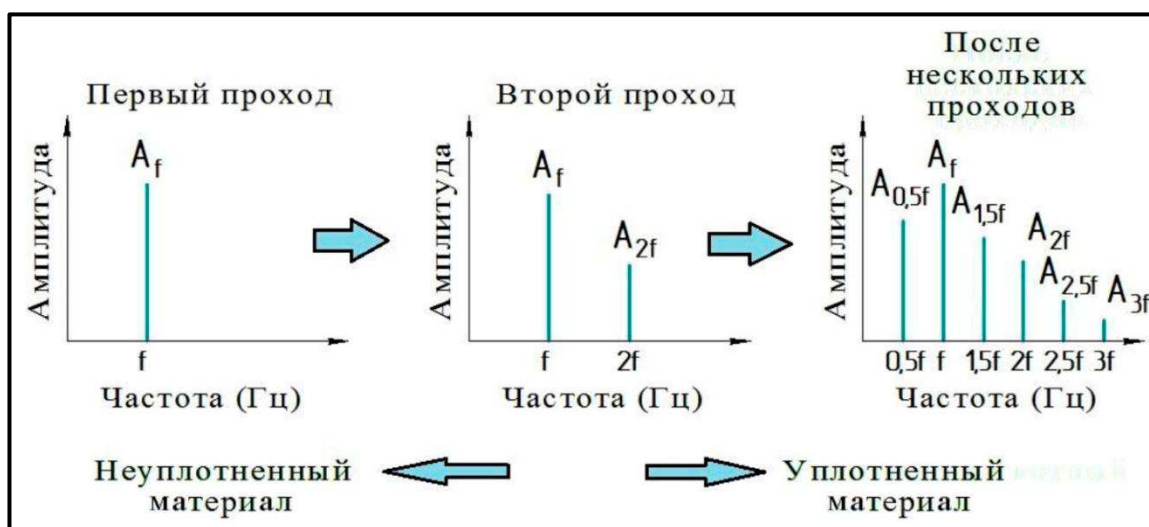


Рисунок 2.1.2 – Изменение спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца катка с ростом степени уплотнения [21]

Новый метод был представлен техническому сообществу на первой Международной конференции по уплотнению, которая состоялась в Париже во Франции в 1980 (Thurner и Sandström 1980, Forssblad 1980). Компания DYNAPAC начала коммерциализацию систем непрерывного контроля уплотнения на основе показателя уплотнения  $CMV$  в 1980 году. Величина показателя  $CMV$  зависит от плотности материала, модели вибрационного катка, значения вынуждающего усилия, частоты колебаний, а также скорости движения катка и др. Поэтому при определении показателя  $CMV$  необходимо проводить тарировку на определенный материал и для определенного вибрационного катка.

Тарировочная величина  $CMV$  определяется при движении катка по специальной образцовой полосе материала, уже уплотненной до заданной в про-

ектной документации плотности и измеренной другими средствами. Тарировочную величину  $CMV$  оператор затем использует в качестве образцовой при уплотнении материала. Для того чтобы правильно использовать показатель  $CMV$ , оператор должен поддерживать условия работы, максимально близкие к тем, при которых была получена тарировочная величина. Компаниям, использующим катки с электронным управлением при укладке асфальта, следует помнить, что соотношение  $CMV$  и плотности должно определяться при одинаковых условиях: толщине уплотняемого слоя и постоянной определенной температуре, нижний подстилающий слой также должен быть одинаковым. Если хотя бы один из параметров изменится, изменятся и все условия работы, которые определяют заданную величину  $CMV$ , т.е. образцовая величина будет уже некорректной.

Анализ спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца положен также в основу расчёта резонансного показателя уплотнения  $RMV$ , называемого ещё также «BouncingValue» (BV) [34]

$$RMV = BV = C \cdot \frac{A_{0.5f}}{A_f},$$

где  $A_{0.5f}$  – амплитуда субгармоники спектра ускорения вибрационного вальца вибрационного катка с частотой изменения вынуждающего усилия  $0.5f$  м/с<sup>2</sup> (см. Рисунок 2.1.2).

Показатель уплотнения  $RMV$  основывается на отслеживании перехода вальца вибрационного катка из режима «частичный отрыв» («partialuplift») в режим «двойной прыжок» («doublejump»). Режим «двойной прыжок» характеризуется субгармоническим режимом колебаний с кратностью колебаний вибрационного катка, равной 2.

В 2004 году японский производитель строительной техники SAKAI предложил свой показатель уплотнения для своих систем непрерывного контроля - «Compaction Control Value» (CCV) [40]. Данный показатель используется в настоящее время на системах непрерывного контроля уплотнения SAKAI. Пока-

затель уплотнения  $CCV$  также основывается на анализе спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца катка. При определении  $CCV$  помимо амплитуд гармоник спектра ускорения вибрационного вальца с частотами изменения вынуждающего усилия  $f$  и  $2f$  (см. Рисунок 2.1.2), учитываются еще и дополнительные субгармоники:

$$CCV = \frac{A_{0.5f} + A_{1.5f} + A_{2f} + A_{2.5f} + A_{3f}}{A_{0.5f} + A_f} \cdot 100\% ,$$

где  $A_{1.5f}$  – амплитуда субгармоники спектра ускорения вибрационного вальца с частотой изменения вынуждающего усилия  $1.5f$ ,  $м/с^2$ ;  $A_{2.5f}$  – амплитуда субгармоники спектра ускорения вибрационного вальца с частотой  $2.5f$ ,  $м/с^2$ ;  $A_{3f}$  – амплитуда гармоники спектра ускорения вибрационного вальца с частотой изменения вынуждающего усилия  $3f$ ,  $м/с^2$ .

Для осцилляторных катков применяются системы непрерывного контроля уплотнения на основе показателя  $OMV$  (Oscillo Meter Value), являющимся аналогом  $CMV$ . Показатель  $OMV$  анализирует горизонтальное ускорение оси вибровальца. Причем алгоритм расчета  $OMV$  изменяется в зависимости от наличия проскальзывания между вибровальцом и поверхностью.

Собственный показатель величины уплотнения  $NMV$  (аналог  $CMV$ ) для своих осцилляторных катков также разработала компания Hamn.

Одними из самых распространенных на данный момент времени систем непрерывного контроля уплотнения являются системы, работа которых основана на расчёте показателей уплотнения  $CMV$  и  $RMV$ . Однако системы на базе показателей  $CMV$  и  $RMV$  имеют существенный недостаток: на основе обработки спектра вертикальных ускорений вибровальца катка они измеряют не прочностные свойства материала, а косвенные показатели, в то время как главной задачей уплотнения является обеспечение прочности, то есть способности сопротивляться действию нагрузок от транспорта и вышележащих слоев дороги. Поэтому после появления показателей  $CMV$  и  $RMV$  практически сразу начался

поиск альтернативных подходов к реализации непрерывного контроля качества уплотнения.

Одним из показателей уплотнения, для определения которого не используется акселерометр, является показатель уплотнения «Machine Drive Power» (далее MDP), который используется на системах непрерывного контроля уплотнения на вибрационных катках фирмы CATERPILLAR. Данный показатель уплотнения основан на анализе изменения потребляемой мощности катком при уплотнении. Применение показателя уплотнения MDP для контроля процесса уплотнения основано на уменьшении глубины погружения вибрационного вальца в уплотняемый материал и снижении сопротивления передвижению катка при увеличении плотности покрытия [34]

$$MDP = P_g - W \cdot V \cdot \left( \sin Q + \frac{a}{g} \right) - (b_1 \cdot V + b_2),$$

где  $P_g$  – мощность, требуемая для движения вибрационного катка, Вт;  $W$  – вес вибрационного катка, Н;  $V$  – скорость движения вибрационного катка, м/с;  $Q$  – продольный уклон, рад;  $a$  – ускорение движения вибрационного катка, м/с<sup>2</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $b_1, b_2$  – коэффициенты внутренних потерь (у каждого катка различное значение коэффициентов);  $(b_1 \cdot V + b_2)$  – слагаемое, характеризующее затраты мощности, связанные с внутренними потерями;  $W \cdot V \cdot \left( \sin Q + \frac{a}{g} \right)$  – слагаемое, характеризующее затраты мощности, связанные с продольным уклоном.

В процессе уплотнения участка вибрационным катком значение MDP сравнивается со значением, полученным при движении катка по тестовой поверхности (уплотненной до требуемого состояния). Показатель уплотнения MDP применяется в системах непрерывного контроля уплотнения для вибрационных катков CATERPILLAR совместно с показателями уплотнения CMV и RMV.

Крупный немецкий производитель уплотняющей техники BOMAG в 1982 году разработал показатель уплотнения *Omega* для обеспечения работы системы непрерывного контроля уплотнения Terrameter. Значение показателя уплотнения *Omega* характеризует энергию, передаваемую в уплотняемый материал при работе вибрационного катка на уплотняемом участке (на момент появления первых систем непрерывного контроля уплотнения был единственной альтернативой показателю CMV). Сила реакции поверхности  $F_s$ , возникающая при деформировании, изменяется в процессе уплотнения в зависимости от глубины погружения вибрационного вальца в материал (вертикального перемещения вибрационного вальца  $Z_d$ ), режима работы дебалансного узла и характеристик материала (Рисунок 2.1.3).

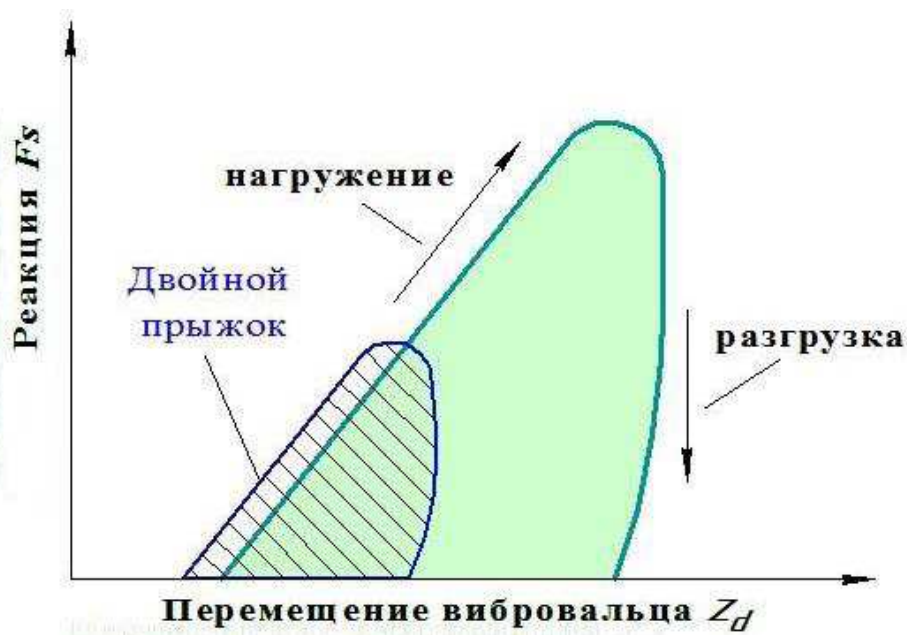


Рисунок 2.1.3 – Схема для расчёта показателя уплотнения *Omega* [22]

В конце 1990-х годов компания BOMAG представила новый показатель уплотнения «вибрационный модуль  $E_{vib}$ », который позволяет непрерывно контролировать качество уплотнения материала в величинах силы на единицу площади ( $\text{MN}/\text{m}^2$ ). Поскольку вибровозбудители катков Bomag используют направленные колебания с возможностью изменения угла наклона вектора вынуждающей силы к вертикали в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , то измерение ускорений

вальца осуществляется двумя акселерометрами, установленными под углом  $\pm 45^\circ$  к вертикали. После расчёта перемещения вибрационного вальца  $z_d$  составляются диаграммы  $F_s - z_d$  для каждого цикла колебаний и измеряется тангенс угла наклона определенного участка кривой  $F_s - z_d$  к оси  $z_d$  (Рисунок 2.1.4).

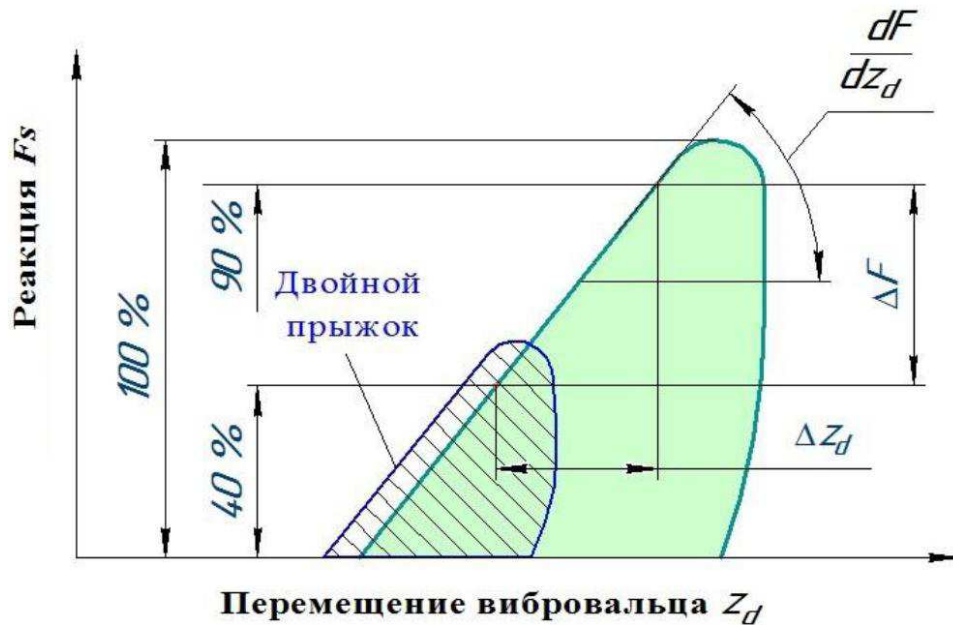


Рисунок 2.1.4 – Схема для определения вибрационного модуля  $E_{vib}$  [22]

Для определения показателя уплотнения «вибрационного модуля»  $E_{vib}$  используется номограмма, представленная на рисунке (Рисунок 2.1.6).

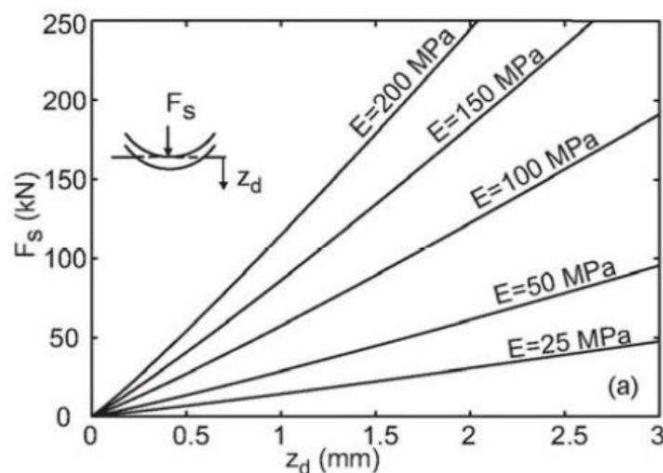


Рисунок 2.1.5 – Номограмма для определения вибрационного модуля  $E_{vib}$  (E) [38]

На основе определения вибрационного модуля  $E_{vib}$  работают современные системы непрерывного контроля уплотнения *Terrameter BTM* и *E<sub>vib</sub>-meter*

(различаются составом используемого оборудования), устанавливающиеся на вибрационные катки фирмы BOMAG и входящие в состав системы автоматического регулирования амплитуды колебаний вибрационного вальца Variocontrol [44]. Система Variocontrol позволяет регулировать вынуждающее усилие с целью предотвращения переуплотнения участка и перехода в режим двойного прыжка.

Caterpillar Paving Products выпустила систему непрерывного контроля уплотнения Auto Adjustable Compaction (AAC) для тандемных асфальтовых катков Caterpillar серии В. Система измеряет величину уплотнения, температуру верхнего слоя асфальтобетонной смеси и регулирует амплитуду вибрации, оптимизируя величину энергии воздействия на покрытие, по мере уплотнения асфальтобетонной смеси амплитуда уменьшается. На катках Caterpillar также используются системы Cat Compaction Control и Accu Grade Compaction. В своих системах Caterpillar использует три показателя – CMV, RMV и MDP. Использование нескольких показателей повышает точность работы катков.

Компания Volvo CE разработала электронную систему Density Direct, которая может устанавливаться на определенные асфальтовые катки Volvo. Ее показания плотности имеют точность в пределах 1,5% относительно значений, полученных путем взятия проб-кernов. Компания утверждает, что ее система определяет непосредственно величину плотности материала, тогда как конкурирующие системы работают на основе относительных показателей наподобие CMV. Однако подробных данных об этой системе не было найдено.

Российский Завод «Дорожных машин» (г.Рыбинск), специализирующийся на выпуске дорожных катков, ведет разработку собственной автоматической системы контроля уплотнения DMControl. Планируется, что система будет считывать данные, поступающие от датчиков ускорения вальца и выдавать относительную величину, характеризующую текущее уплотнение слоя. На основе полученных данных амплитуда и направление колебаний будут регулироваться автоматически. Это позволит оптимизировать уплотняющее воздействие вальца

на поверхность. Для данной системы Моревым А.С. [11] было предложено использовать новый показатель «Compaction Value» ( $CV$ )

$$CV = K \cdot \frac{K_{0.5f} \cdot A_{0.5f} + K_{1.5f} \cdot A_{1.5f} + K_{2.0f} \cdot A_{2.0f} + K_{2.5f} \cdot A_{2.5f} + K_{3.0f} \cdot A_{3.0f}}{K_{0.5f} \cdot A_{0.5f} + K_{1.0f} \cdot A_{1.0f}},$$

где  $K$  – общий тарифовочный коэффициент;  $K_{0.5f}$ ,  $K_{1.0f}$ ,  $K_{1.5f}$ ,  $K_{2.0f}$ ,  $K_{2.5f}$ ,  $K_{3.0f}$  – коэффициенты значимости амплитуд гармоник спектра ускорения вибрационного вальца с частотами изменения вынуждающего усилия  $0.5f$ ,  $1.0f$ ,  $1.5f$ ,  $2.0f$ ,  $2.5f$ ,  $3.0f$  соответственно.

Использование коэффициентов значимости амплитуд гармоник спектра ускорения вибрационного вальца при расчёте значений показателя  $CV$  позволяет более тонко настраивать системы непрерывного контроля уплотнения на определенный вид материала. Также это позволяет повысить чувствительность данного показателя к изменению характеристик уплотняемого материала. Однако наличие большого количества тарифовочных коэффициентов значительно осложняет применение данного показателя.

Кроме производителей катков системы непрерывного контроля уплотнения выпускают и компании, специализирующиеся на производстве оборудования для контроля качества работ в строительстве. Компания Geodinamik предлагает целый спектр оборудования для дооснащения вибрационных катков. Система Geodinamik (Рисунок 2.1.6) изменяет амплитуду и частоту вибраций вальца, а также скорость движения машины по мере повышения жесткости уплотняемого материала. Имея унифицированную измерительную часть, содержащую акселерометр 2, датчик частоты вибрации (на рисунке не указан) и процессор 1, информация о результатах уплотнения выводится на указатели стрелочного типа 3-5 (либо жидкокристаллическую панель). По кабелям 6 посылается сигнал в блок управления вибровальцем.



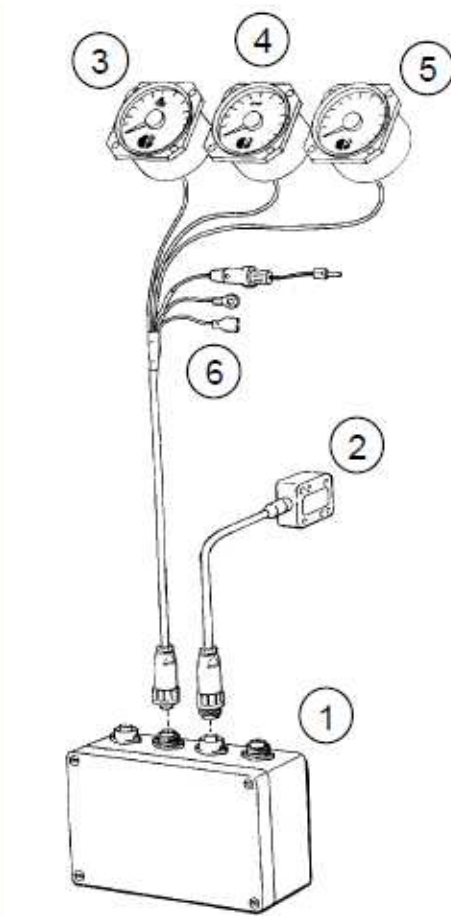


Рисунок 2.1.6 – Система дооснащения Geodinamik (Compactometer ALFA-022R)  
[49]

На вторичном рынке предлагаются также для дооснащения обычных катков электронные системы Topcon C-63 Compaction Management System и Trimble CCS900 Compaction Control System и CCSFlex, функционирующие на основе показателя CMV.

Электронные системы управления уплотнением, такие как Topcon C-63, обладают существенными преимуществами. Система Topcon C-63 может работать как в связке с существующей системой электронного уплотнения катков, так и как полностью независимая система контроля уплотнения. В первом случае происходит полная интеграция данных и соответственно вывод информации оператору на дисплей системы Topcon GX-60 по всем параметрам с привязкой к плановой позиции машины, что позволит оценить не только момен-

тальные значения уплотнения, но и получить всю важную информацию с привязкой к плановому положению.

Во втором случае система Topcon C-63 может быть индивидуально сконфигурирована под любой грунтовой или асфальтовый каток. Независимо от режима работы система контроля уплотнения может использовать сервис Topcon SiteLink, позволяющий операторам катков видеть информацию о работе всех катков, используемых на участке, и соответственно карту общего выполнения задания по уплотнению. Вся эта же информация в комплексе с различной отчетностью может быть в любой момент доступна всем лицам, ответственным за общее выполнение работ.

## **2.2. Сравнение показателей уплотнения для систем непрерывного контроля уплотнения вибрационными катками**

По результатам обзора систем непрерывного контроля уплотнения была составлена сводная таблица 1, в которой указаны производители систем и показатели уплотнения, на основе которых они работают.

В процессе уплотнения вибрационным катком асфальтобетона от рыхлого до плотного состояния режим колебаний вибрационного вальца будет изменяться. Системы непрерывного контроля уплотнения должны реагировать на изменения плотности при оптимальных режимах работы вибрационного катка (режимах постоянного контакта и частичного отрыва) и сигнализировать о достижении опасных режимов (режима «двойного прыжка», раскачивания вибрационного вальца и хаотического режима).

Таблица 1 - Системы непрерывного контроля уплотнения для вибрационных катков различных производителей

Производитель	Система непрерывного контроля	Показатель уплотнения	Автоматическое управление вибрацией	GPS
AMMANN/Case	ACE (Ammann Compaction Expert)	$k_s$	+	+
Bomag	Terrameter	Omega	-	-
	VarioControl	$E_{vib}$	+ (VarioControl)	+
Caterpillar	AccuGrade Compaction	CMV, RMV, MDP	-	+
Atlas Copco	DCA (Dynapac Compaction Analyzer)	CMV, RMV	+ (Dynapac Compaction Optimizator)	+
Hamm Wirtgen	HCQ (Hamm Compaction Quality)	HMV (аналог CMV)	-	+
JCB	COMPATRONIC	н. д.	+	+
Sakai	Sakai	CCV	-	+
Volvo CE	CompAnalyzer, CompGauge	CMV, RMV	-	+
	Density Direct	н. д.	+	+

Исследования функционирования систем непрерывного контроля уплотнения для вибрационных катков, работа которых основана на расчёте различных показателей уплотнения, были проведены М. Моoney и D. Adam [38]. Данные исследования показывают, что чувствительность к изменению плотности уплотняемого материала для систем непрерывного контроля уплотнения различна и существенно зависит от режима колебаний (Рисунок 2.2.1).

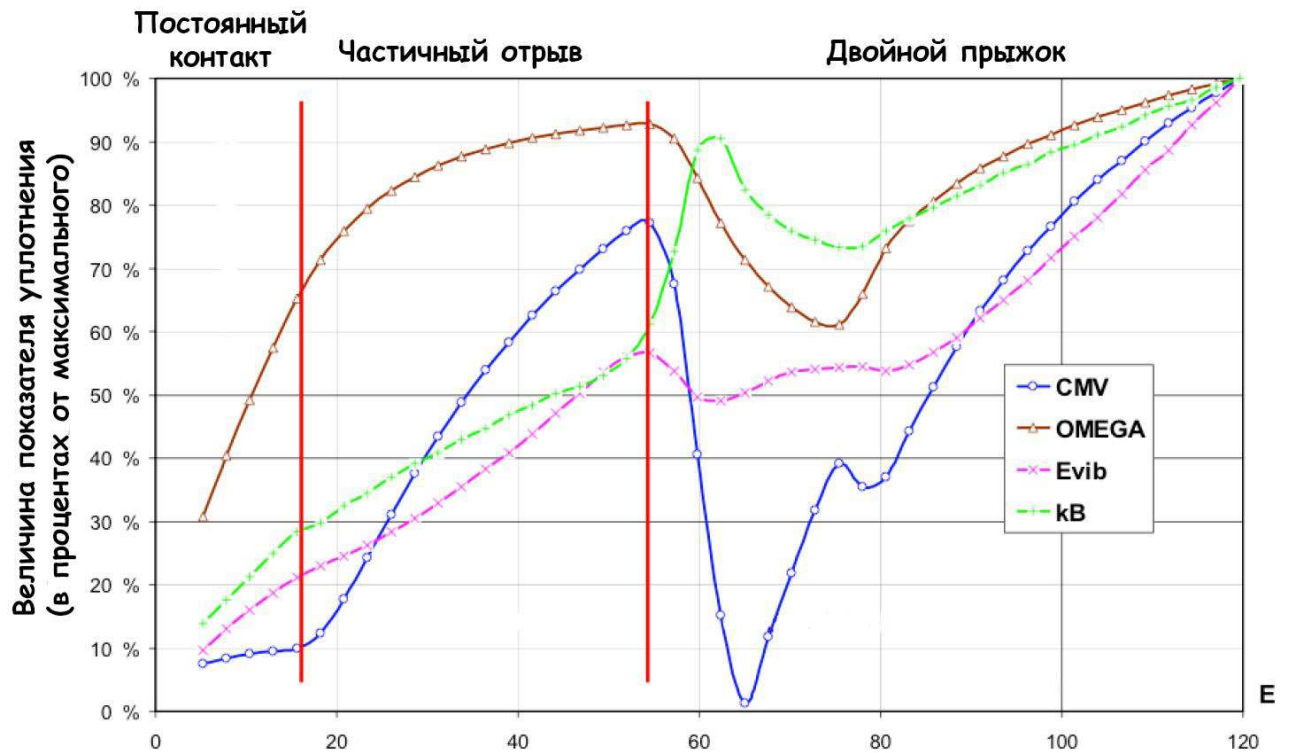


Рисунок 2.2.1 – Изменение численных значений показателей уплотнения при различных режимах колебаний вибрационного вальца вибрационного катка [39]

Как видно на графике (Рисунок 2.2.1), показатель уплотнения CMV в режиме постоянного контакта вибрационного вальца с поверхностью наименее чувствителен к изменению модуля деформации материала. Однако, при режиме частичного отрыва, показатель уплотнения CMV демонстрирует максимальную чувствительность в сравнении с другими показателям уплотнения.

Показатель уплотнения *Omega* имеет максимальную чувствительность по мере роста модуля деформации материала в режиме постоянного контакта вибрационного вальца с поверхностью. При работе вибрационного вальца в режиме частичного отрыва показатель уплотнения *Omega* изменяется нелинейно и имеет минимальную чувствительность, по сравнению с остальными показателями. По всей вероятности, компания BOMAG отказалась от использования показателя уплотнения *Omega* именно по причине минимальной чувствительности его в режиме частичного отрыва. Альтернативный показатель «вибрационный модуль»  $E_{vib}$ , который пришел на замену показателю уплотне-

ния *Omega* и использующийся в настоящее время на катках фирмы BOMAG, изменяется практически линейно при работе вибрационного вальца в режимах постоянного контакта и частичного отрыва, а также обладает хорошей чувствительностью к изменению свойств уплотняемого материала. Показатель уплотнения  $k_s$ , применяемый в системах непрерывного контроля уплотнения на вибрационных катках AMMANN, ведет себя аналогично показателю  $E_{vib}$ .

Показатели CMV и *Omega* наиболее чувствительно реагируют на переход работы вибрационного вальца в нежелательный режим «двойного прыжка». Изменение показателя уплотнения  $E_{vib}$  при переходе в режим «двойного прыжка» менее значимо, что снижает вероятность своевременного определения смены режима колебаний по мере увеличения модуля деформации. Значение показателя уплотнения  $k_s$  увеличивается при переходе в режим «двойного прыжка», при этом меняется тангенс угла наклона кривой  $k_s$  к оси абсцисс, что может являться идентификационным признаком для системы управления режимом работы вибровозбудителя [23].

Современная технология «интеллектуального уплотнения» («Intelligent compaction»), позволяющая избежать переход работы вибрационных катков в опасный режим колебаний, включает в себя автоматическое управление с обратной связью амплитудой вынуждающего усилия (AMMANN, BOMAG, DYNAPAC) и, в некоторых случаях, частотой работы вибровозбудителя (AMMANN).

### **2.3. Состав оборудования для систем непрерывного контроля**

Системы непрерывного контроля уплотнения материала и управления этим процессом состоят из силовой (гидравлической) и электронной частей. Объемный гидропривод приводит в действие вибровозбудители катка.

В зависимости от устройства конкретной системы измеренные исходные данные могут поступать от блока, рассчитывающего мощность двигателя (системы на базе показателя MDP), а в катках с вибровозбудителем на вибровальце

устанавливается акселерометр, измеряющий ускорение вибрирующего вальца. От него сигналы поступают по кабелю в блок управления и оттуда подаются в исполнительные органы. Блок управления корректирует работу вибровозбудителей в зависимости от сравнения результатов измерений с заданным значением параметров уплотнения. Обработанная информация выводится на приборы оператора катка. На сегодняшний день предлагаются различные варианты представления информации (Рисунок 2.3.1): на указатели стрелочного типа, вывод на печать, на жидкокристаллическую панель, а также в систему документирования уплотнения с поддержкой GPS. В некоторых случаях в состав системы непрерывного контроля также входят датчик температуры, датчик частоты вибрации и т.д. При этом вся аппаратура надежно защищена от воздействия вибрации, перепадов температур, пыли и влаги.

Система регулирует затрачиваемую энергию уплотнения, автоматически понижая её при возрастании плотности поверхности укатки. Места с пониженным значением несущей способности уплотняются с более высокой, а очень твердые (жесткие) поверхности – с более низкой рабочей амплитудой. Вибрация на заднем вальце может включаться с задержкой на 2–3 сек после включения ее на переднем вальце, чтобы задний валец, находящийся на более остывшем асфальтобетоне, не повредил поверхность последнего. Для предотвращения образования наплывов грунта, и в особенности асфальтобетона, при изменении направления движения или при остановке катка вибровозбудители автоматически отключаются (в связи с уменьшением скорости катка ниже допустимой), а при достижении заданной скорости они вновь включаются в работу. Возможно также переключение на ручное управление.

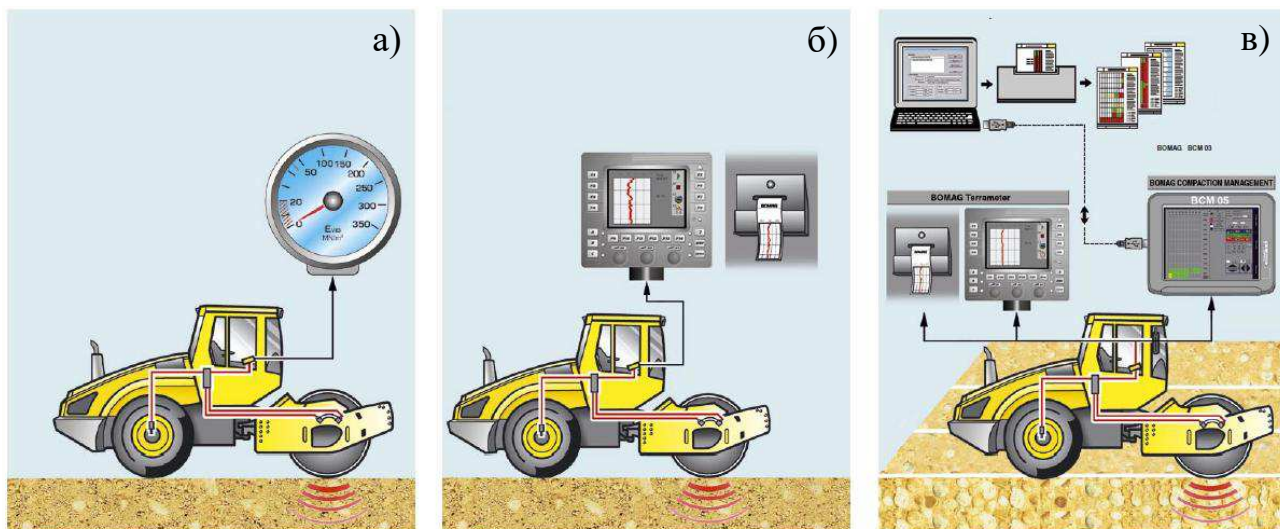


Рисунок 2.3.1 – Способы вывода данных о степени уплотнения (а – стрелочного типа, б – печать на бумажный носитель, в – полная система документирования)

## 2.4. Выводы по главе

Системы непрерывного контроля уплотнения позволяют значительно повысить производительность и качество работы катков прежде всего за счет предоставления возможности оператору постоянно в реальном времени контролировать ход процесса уплотнения и все важнейшие показатели работы катка. Обеспечивается сплошной, а не выборочный контроль результатов уплотнения по всей площади участка. Автоматизация управления рабочим процессом позволяет оптимизировать этот процесс с учетом физико-механических свойств уплотняемого материала, а также улучшает условия работы оператора – ошибки оператора исключаются, так как параметры укатки контролирует автоматика. Исключаются лишние проходы катка, что ведет к уменьшению времени уплотнения и расхода топлива. Уплотнение выполняется равномерно и последовательно, отсутствуют места с избыточным и недостаточным уплотнением, потому что энергия уплотнения виброкатка всегда приводится в соответствие с потребностями материала, а места со слабым грунтом вследствие некачественного проведения подготовительных работ или отклонения в составе асфальтовой смеси своевременно выявляются, и там обеспечивается должное качество

уплотнения, дорожное покрытие гарантированно получается гладким, высококачественным и долговечным.

Также, повышается срок службы машин, поскольку при электронном управлении агрегаты работают в оптимальном режиме, а оператор своевременно предупреждается о вхождении вибровальца катка в опасные режимы работы.

Отечественные производители вибрационных катков не имеют в своем распоряжении подобных систем непрерывного контроля уплотнения, что приводит к повышению вероятности возникновения недоуплотнённых участков в конструктивных слоях автодорог; снижению прочности, устойчивости и несущей способности; повышению затрат на ремонт и содержание автомобильных дорог в РФ и износ автотранспорта.

Большинство ведущих производителей вибрационных катков (DYNAPAC, CATERPILLAR, HAMM, SAKAI, VOLVO) в своих системах непрерывного контроля используют показатели уплотнения, расчет которых основан на анализе спектра ускорений вибрационного вальца катка. Данные показатели уплотнения являются косвенными, поскольку не отображают напрямую изменения прочностных характеристик уплотняемого материала, но в то же время обладают сравнительной простотой определения. Таким образом, областью применения данных систем является непрерывный экспресс-контроль, который не заменяет существующий выборочный контроль качества уплотнения по методу вырубков, но позволяет в реальном времени осуществлять мониторинг процесса уплотнения покрытия.

### **3. Анализ теоретических исследований взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым материалом**

Для успешного решения задач анализа функционирования системы «вибрационный валец – уплотняемый асфальтобетон» необходимо разработать математическую модель, позволяющую учитывать влияние изменяющихся в процессе уплотнения свойств асфальтобетона на характеристики колебаний вибра-



ционного вальца, регистрируемые акселерометром. А.А. Ляпунов давал следующее определение математической модели: «Математическая модель – это опосредованное практическое или теоретическое исследование объекта, при котором непосредственно изучается не сам интересующий нас объект, а некоторая вспомогательная искусственная или естественная система, которая в процессе исследования дает информацию о самом моделируемом объекте, замещает объект в определенных отношениях, а также находится в некотором объективном соответствии с познаваемым объектом» [5].

Неоценимый вклад в изучение процесса уплотнения с применением вибрации внёс Н.Я. Хархута [25, 26, 27]. В своих работах Н.Я. Хархута рассматривал вопросы, связанные с распределением напряжений в грунтах при воздействии вибрационных нагрузок, а также с определением характеристик и параметров уплотняющей техники и уплотняемого материала.

Вопросы по контролю качества уплотнения и практике функционирования систем непрерывного контроля качества уплотнения грунта и асфальтобетона освещались в работах отечественных ученых: М.П. Костельова [6], Г.В. Кустарева [8], А.В. Телушкина [20], И.С. Тюремнова [21, 22, 23, 24], А.А. Шестопалова [28], В.П. Ложечко [9, 10], В.Б. Пермякова [15, 16], С.В. Носова [12, 13], С.В. Савельева [17, 18], а также иностранных ученых: J.L. Briaud [32], G. Chang [33], B. Horan [36], T. Scullion [41], P.R. Vennapusa [45], D. J. White [47, 48].

Для описания процесса взаимодействия вибрационного вальца с уплотняемым материалом можно использовать различные методы. Первый метод основан на использовании реологических моделей, что позволяет описать математическую модель процесса уплотнения с помощью дифференциальных уравнений.

Второй метод – метод конечных элементов. Данный метод не нашел широкого применения в России, так как для реализации метода требуется знание

точных физико-механических свойств материала. Более широко метод конечных элементов применяется за рубежом.

Третий метод – применение аналитических зависимостей.

В настоящее время, отказ от использования модели системы приводит к неизбежным потерям материальных ресурсов, а также к потерям времени. Метод проб и ошибок при испытании объектов (машин, механизмов, систем и т.д.) уходит в прошлое, так как считается достаточно затратным. Целесообразнее испытывать объекты на моделях, так как этот метод является более простым и позволяет отразить большинство влияющих на объект факторов, не прибегая к испытаниям. Таким образом, при исследовании объекта или при его разработке, начальным этапом является создание математической модели.

Уплотнение асфальтобетона вибрационными катками – сложный для исследования процесс, так как при воздействии вибрационного вальца катка на поверхность, свойства уплотненного асфальта сильно меняются в сравнении с неуплотненным.

С.А. Осмаков и О.А. Савинов в работе [14] исследовали движение вибратора, свободно опирающегося на упругий ограничитель. Расчетная схема представлена на рисунке (Рисунок 3.1). Авторы отмечали, что при различных параметрах системы вибратор может совершать безотрывные движения и с отрывом от пружины, а также составили уравнения движения вибратора для обоих режимов.

Для безотрывного режима движения вибратора дифференциальное уравнение имеет вид

$$M\ddot{x} = P + F_0 \sin(\omega t - \varphi_0) - Cx ,$$

где  $P$  – постоянная сила, действующая на вибратор массы  $M$ ;  $C$  – жесткость пружины;  $\varphi_0$  – начальный фазовый угол.

Авторы принимали новые безразмерные переменные:

$$\tau = \omega t, y = \frac{x}{A_\infty}, A_\infty = \frac{F_0}{M\omega^2} .$$

При этих принятых переменных уравнение движения вибратора в режиме контакта с поверхностью приняло вид

$$\ddot{y} + \varepsilon^2 y = P_0 + \sin(\tau + \varphi_0), \text{ при } P_0 = \frac{P}{F_0}, \varepsilon = \sqrt{\frac{C}{M\omega^2}}.$$

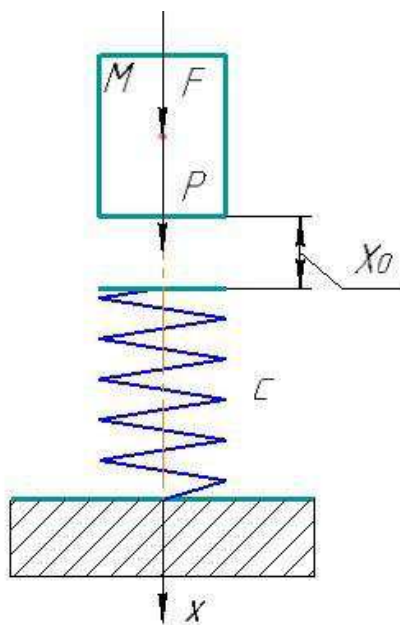


Рисунок 3.1 – Расчетная схема вибратора, свободно опирающегося на упругий ограничитель [3]

Авторы, также, представили в работе дифференциальное уравнение режима движения вибратора в состоянии отрыва

$$\ddot{y} = P_0 + \sin(\tau + \varphi_0), \text{ при } \tau_1 \leq \tau \leq 2\pi i,$$

где  $\tau_1$  – «момент нарушения контакта вибратора с пружиной,  $2\pi i$  – «момент» восстановления контакта вибратора с пружиной.

В предложенной С.А. Осмаковым и О.А. Савиновым схеме не учитывается пластическая деформация уплотняемого материала, в связи с чем, применение такой схемы ограничено.

В работе [4] В.М. Дудин и Н.Н. Попова рассматривали случай, когда на поведение колеблющейся массы оказывают влияние вязкостные свойства ограничителя. Для оценки влияния вязкостных свойств ограничителя авторы приводят схему, представленную на рисунке (Рисунок 3.2). На вибратор массы  $M$  действует постоянная сила  $G$  и гармоническое возмущающее усилие, изменяю-

щееся по синусоидальному закону. Жесткость  $c$  и вязкость  $b$  представлены на схеме пружинным элементом и демпфером соответственно.

В зависимости от параметров системы, вибратор может работать как в режиме постоянного контакта с упруго-вязким ограничителем, так и в режиме отрыва от ограничителя.

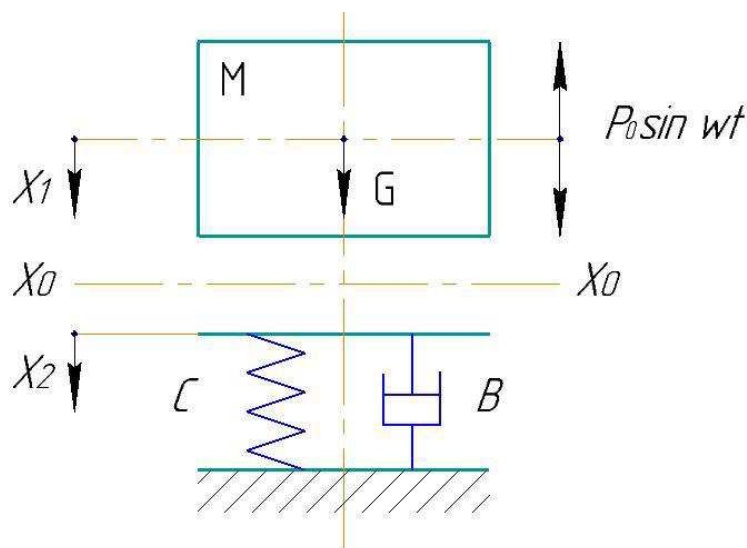


Рисунок 3.2 – Расчетная схема вибратора, опирающегося на упруго-вязкий ограничитель [4]

Авторы представили дифференциальное уравнение, которое описывает движение вибратора в режиме постоянного контакта с ограничителем

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 + b\dot{x}_1 + cx_1 = G + P_0 \sin(\omega t) \\ \dot{x}_2 = \dot{x}_1 \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x_1 \geq x_2 \\ b\dot{x}_1 + cx_1 \geq 0 \end{cases} ,$$

где  $M$  – масса вибратора;  $G$  – постоянная сила, действующая на вибратор;  $c$  – коэффициент упругого сопротивления ограничителя;  $b$  – коэффициент вязкого сопротивления ограничителя;  $P_0$  – амплитудное значение вынуждающего усилия;  $\omega$  – частота колебаний вибровозбудителя.

Уравнение движения вибратора в режиме отрыва от ограничителя

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 = G + P_0 \sin(\omega t) \\ b\dot{x}_2 + cx_2 = 0 \end{cases} \text{ при } x_1 < x_2 .$$

Исследования проводились с целью определения границ областей устойчивых одноударных периодических колебаний с периодом вынуждающего уси-

лия. Моделирование проводилось на электронной аналоговой машине МН-7. При этом приводилось понятие относительного вынуждающего усилия

$$Q_0 = \frac{P_0}{G}.$$

В результате моделирования было показано, что с изменением относительного вынуждающего усилия меняется также характер движения вибратора. При определенном значении  $Q_0$  вибратор работает в режиме постоянного контакта с ограничителем (безотрывный режим). При росте  $Q_0$  вибратор переходит в ударный режим с периодом вынуждающего усилия  $T$ . При дальнейшем увеличении  $Q_0$  наблюдаются субгармонические колебания вибратора.

Анализируя полученные результаты, авторы делают следующие выводы:

– введение диссипативного сопротивления в значительной мере изменяет область существования устойчивых одноударных колебаний вибратора с периодом вынуждающего усилия, увеличение относительной вязкости приводит к расширению области одноударных колебаний;

– повышение диссипативного сопротивления ограничителя снижает скорость в момент удара вибратора об ограничитель при постоянном вынуждающем усилии. Однако, вследствие расширения границ области одноударных колебаний, можно добиться повышения значения ее за счет увеличения вынуждающего усилия до граничного значения.

Представленная схема вибратора, опирающегося на упруго-вязкий ограничитель, в значительной мере лучше отражает процесс уплотнения вибрационными машинами (удар об упруго-вязкий ограничитель), чем схема, представленная в предыдущей работе. Дифференциальные уравнения, описывающие работу вибратора при различных режимах работы, имеют простой и понятный вид. Однако в своих исследованиях авторы не рассматривают влияние режимов колебаний вибратора на распространение напряжений в более глубокие слои, исследуя лишь напряженное состояние на поверхности.

В работе [31] авторы Anderegg, Von Felten и Kaufmann рассматривают од-номассную нелинейную динамическую модель функционирования системы «вибрационный валец – уплотняемый материал» для вибрационных катков и плит (Рисунок 3.3).

По данной динамической модели вычисляется вынуждающее усилие

$$F_s = (m_f + m_d)g + m_e r_e \cdot \Omega^2 \cos(\Omega t) - m_d \ddot{x},$$

где  $m_d$  – масса вибрационного вальца, кг;  $m_f$  – масса рамы вибрационного вальца, кг;  $x$  – вертикальное перемещение вибрационного вальца, м;  $m_e r_e$  – момент эксцентриковых масс, кг·м;  $\Omega$  – круговая частота колебаний, Гц.

Также вынуждающее усилие может быть записано как

$$F_s = k_s x_d + c_s \dot{x}_d,$$

где  $k_s$  – коэффициент упругого сопротивления, Н/м;  $c_s$  – коэффициент вязкого сопротивления, Н·с/м.

Перемещение вибрационного вальца может быть записано в виде уравнения

$$x_d = \sum_i A_i \cos(i \cdot \Omega \cdot t - \varphi_i),$$

где  $\varphi_i$  – фазовое отставание между зарождающейся динамической силой и частотой вальца, смещенной на частоту  $if$ , град.

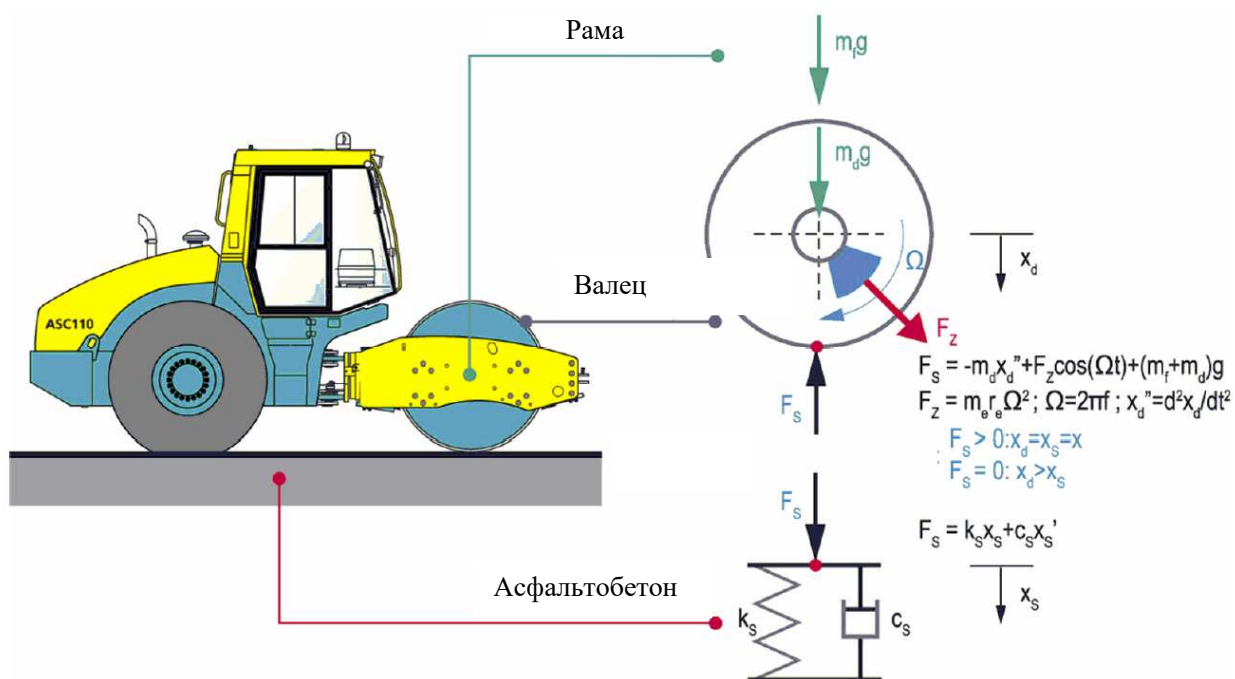


Рисунок 3.3 – Одномассная динамическая модель функционирования системы «вибрационный валец - уплотняемый асфальтобетон» [31]

Представленная авторами модель действует при условии, что частота возбуждения намного выше, чем резонансная частота элементов подвески. В этом случае статический вес рамы может рассматриваться как сила, действующая статически на вибрирующую массу. Более продвинутые модели учитывают горизонтальные и поворотные ускорения, а также вибрации рамы для вибрационных катков, осцилляторных катков и катков с направленным возбуждением. Данная модель прошла множество проверок на практике, не только на тандемном катке при уплотнении асфальта, но также и на одновальцовом вибрационном грунтовом катке. Использование простой пружинно-амортизационной модели адекватно для описания взаимодействия между вибрирующей массой и асфальтобетоном.

В работе [6] Г.Г. Закирзаков и М.И. Капустин вводят понятие «присоединённой массы», которая как бы жестко присоединена к рабочему органу и колеблется с его амплитудой. Авторы предлагают рассматривать двухмассную колебательную систему с двумя степенями свободы (Рисунок 3.4), которая име-

ет более широкое применение при расчёте вибрационных строительных и дорожных машин, чем одномассная колебательная система.

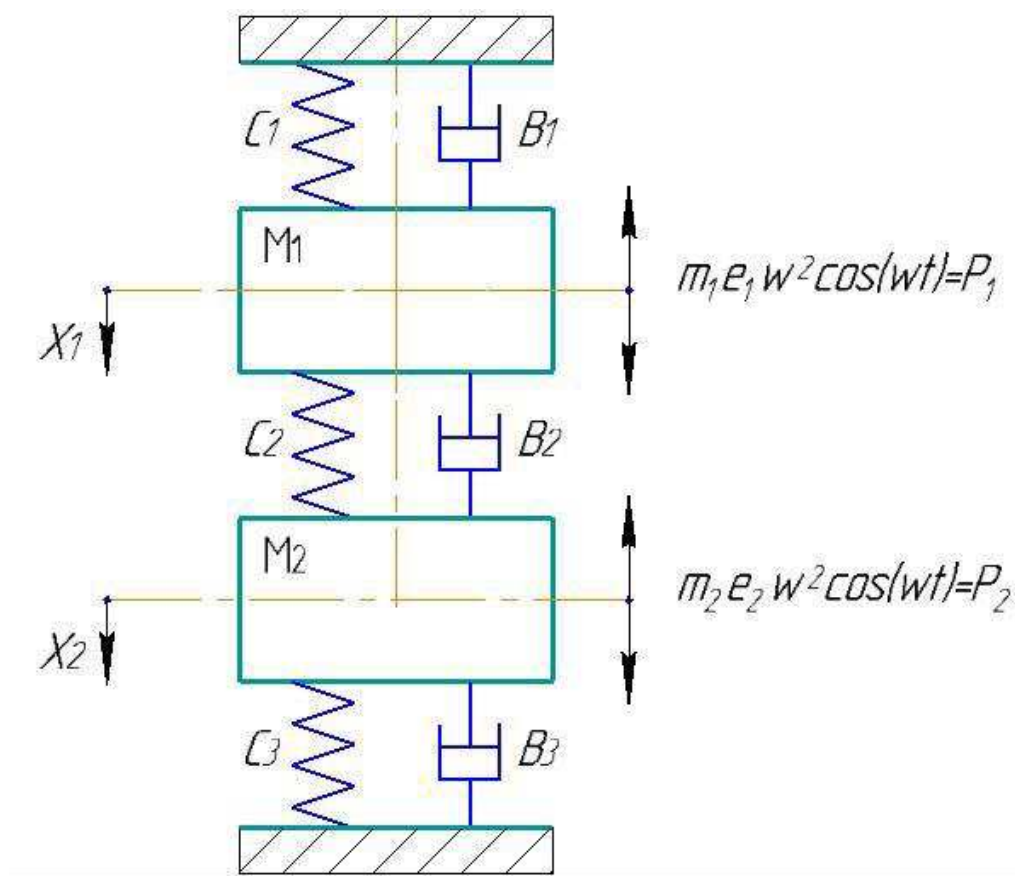


Рисунок 3.4 – Динамическая модель системы [2]

Уравнения движения масс представленной двухмассной модели при инерционном вибровозбуждении имеют вид:

$$M_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) = m_1 e_1 \omega^2 \cos(\omega t); \quad (3.1)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + b_3 \dot{x}_2 + b_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_3 x_2 + c_2 (x_2 - x_1) = m_2 e_2 \omega^2 \cos(\omega t), \quad (3.2)$$

где  $m_i$  – массы дебалансных частей вибровозбудителей, кг;  $e_i$  – эксцентриситет неуравновешенных масс вибровозбудителя, м;  $\omega$  – угловая частота вынужденных колебаний, 1/с.

Собственные колебания системы зависят от начальных условий и с течением времени быстро затухают, поэтому авторы рассматривают только установившиеся вынужденные колебания. Они также учитывают, что во всех вибрационных машинах присутствует только одно вынуждающее усилие.



Частное решение уравнений движения масс следует искать в следующем виде:

$$x_1 = a_1 \cos \varphi_1 \cos(\omega t) + a_1 \sin \varphi_1 \sin(\omega t) ;$$

$$x_2 = a_2 \cos \varphi_2 \cos(\omega t) + a_2 \sin \varphi_2 \sin(\omega t) ,$$

где  $a_i$  – амплитуды колебаний масс, м;  $\varphi_i$  – углы сдвига фаз перемещений относительно вынуждающего усилия, рад.

Далее, авторы взяли первые и вторые производные от  $x_1$  и  $x_2$  по времени, подставили их в уравнения (3.1) и (3.2), приняли сначала  $\omega t = 0$ , а затем  $\omega t = \frac{\pi}{2}$ . В итоге авторы получили систему из восьми алгебраических уравнений для двух частот колебаний  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Решение полученной системы уравнений позволяет определить все усредненные значения динамических параметров колебательной системы с интервалом частот  $\omega_1 - \omega_2$ . Авторы провели проверку предложенной методики на динамической модели с заданными параметрами.

Несомненно, положительной стороной данной модели является ее универсальность для применения к различным вибрационным строительным и дорожным машинам. Однако для решения полученной авторами системы уравнений необходимо иметь осциллограмму записи колебаний на двух частотах, что делает невозможным использование представленного метода для исключительно теоретического исследования.

В работе [42] авторы D. Siminiati и D. Hren предложили для описания процесса уплотнения модель с двумя степенями свободы (Рисунок 3.5).

Движение рабочего органа представлено перемещением вибрационного вальца  $z_d$  и перемещением рамы вибрационного вальца  $z_f$ . Главными характеристиками системы «вибрационный валец - уплотняемый материал» являются: масса рамы вибрационного вальца  $m_f$ , масса вибрационного вальца  $m_d$ , масса дебалансного узла  $m_e$ . Для данной системы выделяются два параметра: частота колебаний  $f$  и эксцентриситет  $e$ . Для вибрационного вальца, подвешенного на раме – коэффициент упругого сопротивления  $k_f$  и коэффициент вязкого сопро-

тивления  $c_f$ , для уплотняемого материала – коэффициент упругого сопротивления  $k_s$  и коэффициент вязкого сопротивления  $c_s$ . Эти параметры должны быть известны для созданной модели.

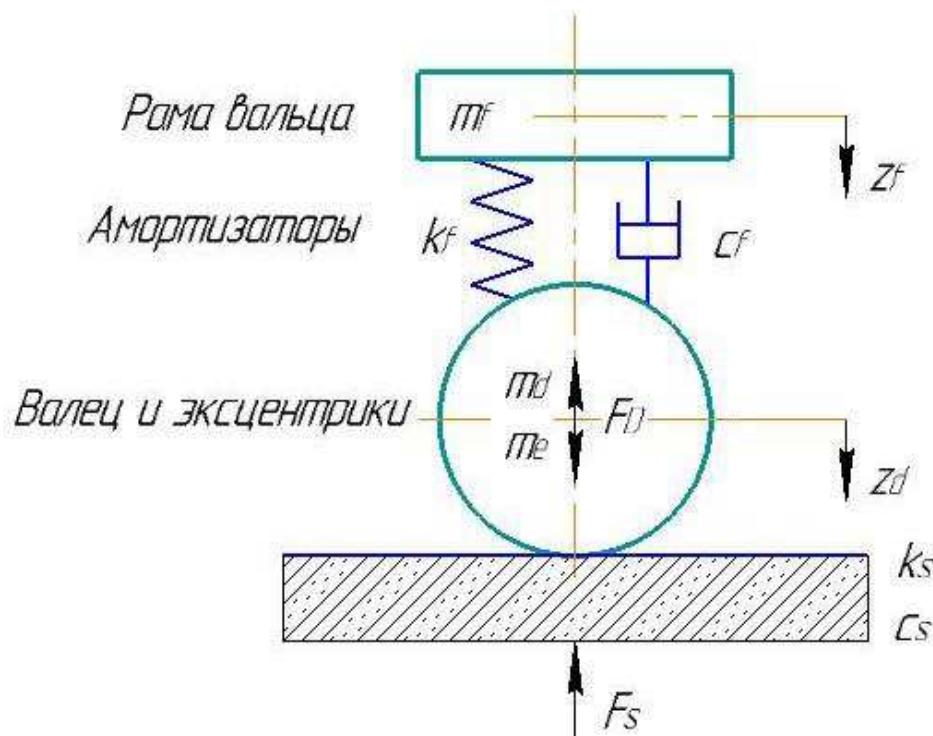


Рисунок 3.5 – Двухмассная математическая модель функционирования системы «вибрационный валец - уплотняемый материал» [42]

Вибрационная система создает динамическое усилие

$$F_D = m_e e \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t),$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота вынужденных колебаний.

Пренебрегая пластическими деформациями в процессе уплотнения, контактная сила может быть определена по следующей формуле

$$F_s = k_s z_d + c_s \dot{z}_d.$$

Авторы получили два дифференциальных уравнения движения. Для виб-  
рационного вальца

$$(m_d + m_e) \ddot{z}_d + c_f (\dot{z}_d - \dot{z}_f) + k_f (z_d - z_f) = m_e e \omega^2 \sin(\omega t) - F_s.$$

Для рамы вибрационного вальца

$$m_f \ddot{z}_f - c_f (\dot{z}_d - \dot{z}_f) - k_f (z_d - z_f) = 0.$$

Если используется специальная конструкция подвешенной системы, то коэффициент упругого сопротивления  $k_f$  и коэффициент вязкого сопротивления  $c_f$  могут быть значительно уменьшены. Следовательно, математическая модель может быть упрощена, за счет пренебрежения этими двумя параметрами.

Главное дифференциальное уравнение для системы с одной степенью свободы

$$m_r \ddot{z}_d = m_e e \omega^2 \sin(\omega t) - F_s ,$$

где  $m_r = m_d + m_e + m_f$  – общая масса уплотняющей машины.

Перемещение вибрационного вальца

$$z(t) = Z \sin(\omega t - \varphi) ,$$

где  $Z$  – амплитуда перемещений вибрационного вальца.

Скорость вибрационного вальца

$$\dot{z}(t) = Z \omega \cos(\omega t - \varphi) .$$

Ускорение вибрационного вальца

$$\ddot{z}(t) = -Z \omega^2 \sin(\omega t - \varphi) .$$

Авторами был смоделирован процесс взаимодействия уплотняемого материала и вибрационного вальца, и получены графики зависимости перемещений вальца, рамы и поверхности. Также были построены графики зависимости перемещений поверхности уплотняемого покрытия, вальца и рамы в зависимости от частоты колебаний и значений амплитуды. Однако недостатком работы [42] является то, что авторы учитывают только поверхностные деформации и перемещения и совсем не рассматривают деформации и перемещения в более глубоких слоях.

В работе [43] в 2008 году Paul van Susante и Michael Mooney предлагают для исследования трехмассную систему взаимодействия вибрационного вальца с уплотняемым материалом (Рисунок 3.6).

При исследованиях, проведённых с использованием вышеуказанной модели, авторы предлагают дифференциальные уравнения контактной силы, вертикальных ускорений рамы катка, вибрационного вальца и поверхности уплотняемого материала.

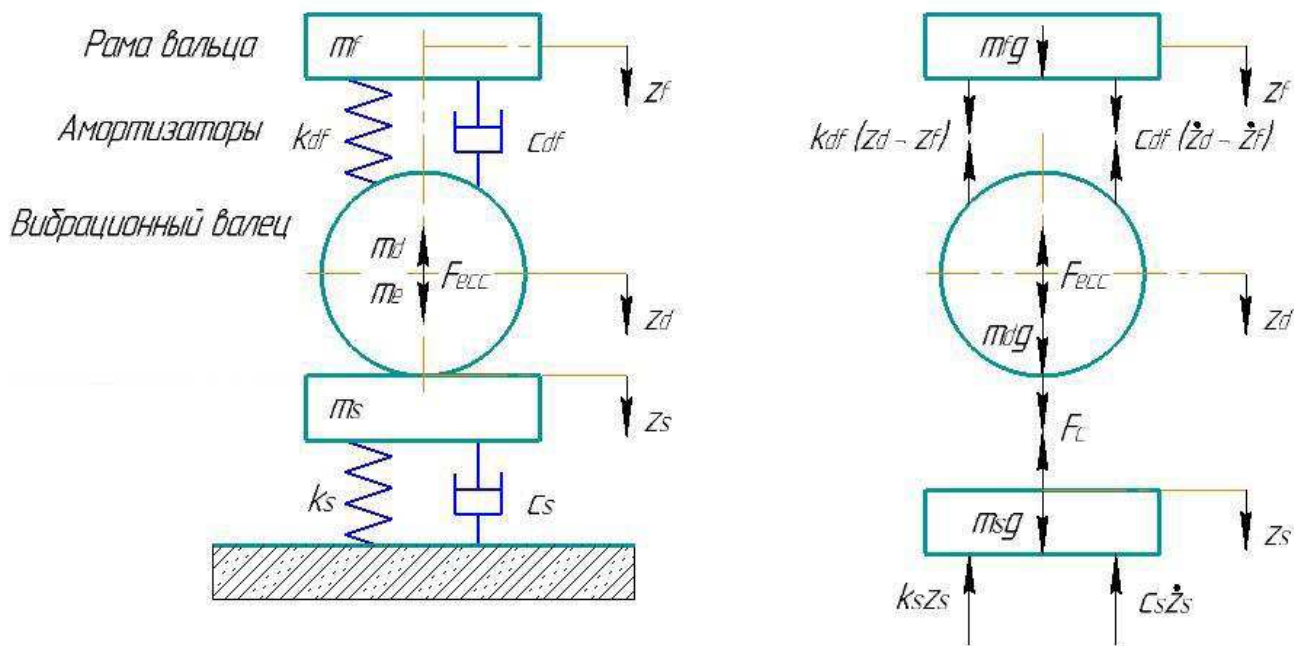


Рисунок 3.6 – Трёхмассная модель функционирования системы «рама - вибрационный валец – уплотняемый материал» [43]

Контактная сила  $F_c$  рассчитывается

$$\begin{aligned}
 F_c &= m_s \ddot{z}_d - m_s g + k_s z_d + c_s \dot{z}_d = \\
 &= m_0 e_0 \Omega^2 \sin(\Omega t) + m_d g + m_f g - m_d \ddot{z}_d - m_f \ddot{z}_f .
 \end{aligned}$$

Система дифференциальных уравнений в такой системе для безотрывного режима приобретает вид

$$\begin{cases}
 m_f \ddot{x}_f - b_f (\dot{x}_d - \dot{x}_f) - k_f (x_d - x_f) = m_f g ; \\
 (m_d + m_s) \ddot{x}_d + b_f (\dot{x}_d - \dot{x}_f) + k_f (x_d - x_f) + \\
 + b_s \dot{x}_d + k_s x_d = (m_d + m_s) g + P \sin \omega t ; \\
 \dot{x}_d = \dot{x}_s ; \\
 x_d = x_s ,
 \end{cases} \quad (3.3)$$

а для режима с отрывом

$$\begin{cases} m_f \ddot{x}_f + b_f(\dot{x}_d - \dot{x}_f) + k_f(x_d - x_f) = m_f g ; \\ m_d \ddot{x}_d - b_f(\dot{x}_d - \dot{x}_f) - k_f(x_d - x_f) = m_d g + P \sin \omega t ; \\ m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s + k_s x_s = m_s g , \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $x_f$  – вертикальная координата рамы вибрационного вальца, м;  $x_d$  – вертикальная координата рамы вибрационного вальца, м;  $x_s$  – вертикальная координата поверхности материала, м;  $\dot{x}_f, \dot{x}_d, \dot{x}_s$  – вертикальные скорости рамы, вальца и поверхности материала соответственно, м/с;  $\ddot{x}_f, \ddot{x}_d, \ddot{x}_s$  – ускорения рамы, вальца и поверхности материала соответственно, м/с<sup>2</sup>;  $m_f$  – масса рамы вибрационного вальца, кг;  $m_d$  – масса вибрационного вальца, кг;  $m_s$  – масса присоединённого материала, кг;  $b_f$  – коэффициент вязкого сопротивления амортизаторов, Н·с/м<sup>2</sup>;  $b_s$  – коэффициент вязкого сопротивления уплотняемого материала, Н·с/м<sup>2</sup>;  $k_f$  – коэффициент жёсткости амортизаторов, Н/м;  $k_s$  – коэффициент жёсткости уплотняемого материала, Н/м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $P$  – вынуждающее усилие, Н;  $\omega$  – угловая скорость вибровозбудителя, рад/с.

Представленная авторами модель отражает реальные процессы, происходящие при уплотнении вибрационным катком. Авторами проведена экспериментальная проверка полученных зависимостей, при уплотнении песчаной насыпи вибрационным катком INGERSOLL RAND DD138. Однако для решения предложенных авторами уравнений необходимо знать значения коэффициентов упругого и вязкого сопротивления уплотняемого материала, а также амортизаторов на раме.

В работе [13] Носов С.В. проводил теоретические исследования взаимодействия ходовых систем колесных, гусеничных и дорожных машин с опорным основанием (далее КГДМ).

На основе методов формализации динамических систем автором были разработаны обобщенные динамические модели КГДМ, которые учитывают основные параметры машины-уплотнителя и реологические параметры опорно-

го основания. Это позволяет производить качественную оценку динамики системы. Параметры опорного основания в модели представлены физико-механическим свойством уплотняемого материала, являющимся отображением модуля деформации на единицу толщины уплотняемого слоя (Рисунок 3.7).

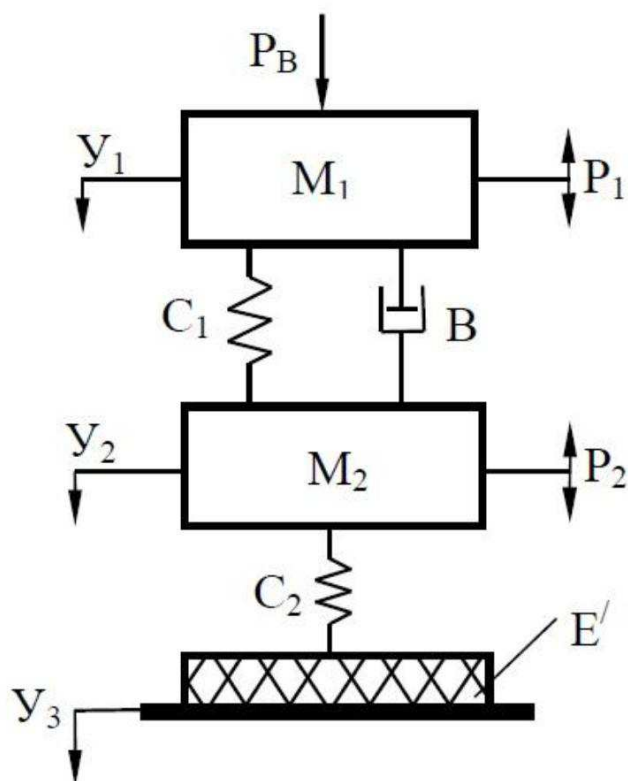


Рисунок 3.7 – Динамическая модель КГДМ для исследования вертикальных колебаний элементов системы [13]

Принимая некоторые допущения ( $C_2=B=P_1=Y_3=0$ ), автор описывает расчетную схему вибрационного катка с системой из двух линейных дифференциальных уравнений второго порядка

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

где  $M_1$  и  $M_2$  – масса части рамы катка, приходящейся на один валец, и масса вибрационного вальца соответственно, кг;  $y_1$  и  $y_2$  – линейные перемещения масс  $M_1$  и  $M_2$  соответственно, м;  $P_B$  – сила воздействия вакуумной камеры, которая равняется произведению ее рабочей площади на величину разряжения,

$H$ ;  $P_2$  – амплитудное значение вынуждающего усилия со стороны вибратора вибрационного вальца, Н;  $\omega$  – частота колебаний,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между перемещением вибрационного вальца и направлением вынуждающего усилия, рад;  $C_1$  – коэффициент упругого сопротивления амортизаторов,  $\text{Н}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $E'$  – физико-механический параметр уплотняемого материала,  $\text{Н}\cdot\text{м}^{-1}$ .

Учитывая требования, предъявляемые к динамической модели, автор рассматривает параметр  $E'$  как сложную функцию, зависящую от конструктивных и технологических параметров вибрационного катка и учитывающую нелинейные свойства уплотняемого материала, которые изменяются во времени

$$E' = \frac{EF_K}{\varepsilon(t)h_{\text{сл}}},$$

где  $E$  – модуль деформации, Па;  $F_K$  – площадь штампа, с помощью которого определяется модуль деформации слоя толщиной  $h_{\text{сл}}$ ,  $\text{м}^2$ ;  $\varepsilon(t)$  – относительная деформация.

Представленная работа, несомненно, вызывает большой интерес, так как с помощью уравнений, полученных автором можно связать модуль деформации материала и ускорение вибрационного вальца вибрационного катка через амплитуду колебаний вибрационного вальца.

В работе [35] Р. Erdmann и D. Adam применяли численное моделирование динамического процесса уплотнения вибрационным катком.

Было отмечено, что метод конечных элементов способен решить проблему расчёта механических эффектов, таких как столкновение вибрационного вальца с дорожным покрытием, деформация поверхности контакта, трение и поведение различных составляющих системы «вибрационный валец - уплотняемый материал». Модель динамического процесса деформации эластичного материала позволяет реалистично отразить динамические характеристики грунта и асфальтобетона. Вертикальное возбуждение вибрационного вальца моделировалась вертикальной синусоидальной силой в центре, сравнимой с направленным вибрационным возбудителем в вертикальном направлении. Авторами

были получены кривые зависимости контактной силы поверхности к статической нагрузке в зависимости от амплитуды вертикального смещения. Представленная имитационная модель не в состоянии воспроизвести увеличение плотности и жесткости дорожного покрытия в процессе уплотнения из-за применяемой модели упругого материала, в котором не учитывается пластическая деформация асфальтобетона. Тем не менее, изменение жесткости асфальта позволяет моделировать различные режимы работы вибрационного вальца в процессе уплотнения. Результаты моделирования при динамическом уплотнении вибрационным вальцом представлены на рисунке (Рисунок 3.8).

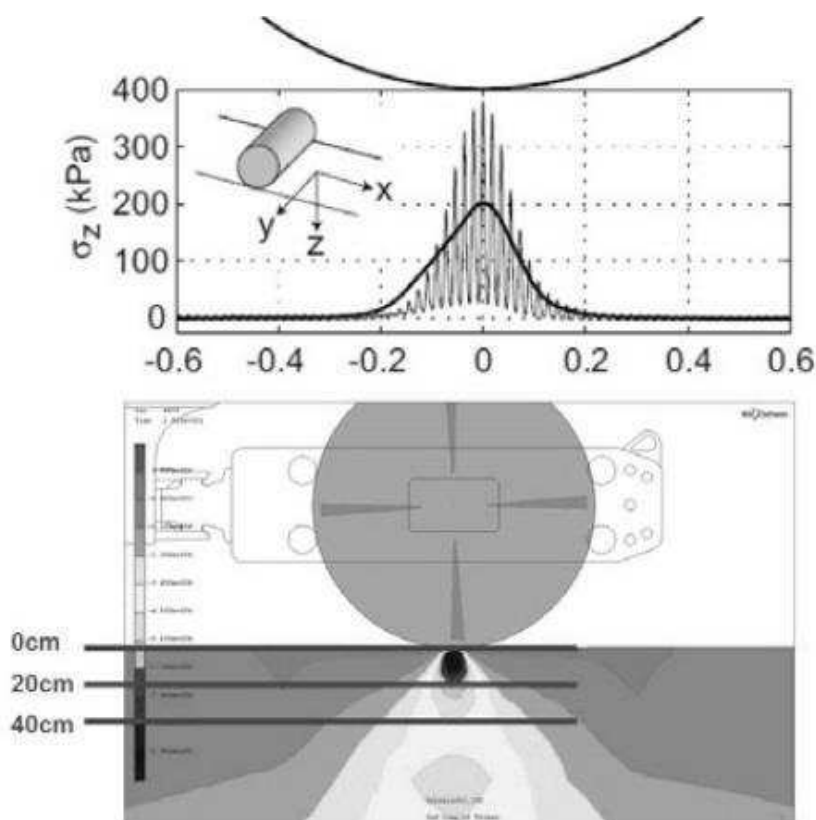


Рисунок 3.8 – Результаты моделирования при динамическом уплотнении вибрационным вальцом [35]

Представленная авторами модель с упругими свойствами материала, построенная с использованием метода конечных элементов, отлично подходит для описания характеристик системы «вибрационный валец - уплотняемый материал» при динамическом уплотнении. При использовании вышеуказанной



модели можно описать различные режимы уплотнения и показать эффекты, появляющиеся в материале при уплотнении его вибрационными катками. Для моделирования уплотнения необходимо рассматривать соответствующие законы, учитывающие пластические деформации и динамические циклические нагрузки.

В работе [37] Н.М. Hugel, S. Henke и S. Kinzler использовали метод конечных элементов для моделирования процесса уплотнения грунта вибрационным катком. Авторы моделировали грунт как однофазный материал. Трехмерная ABAQUS модель состояла из 222600 конечных элементов (Рисунок 3.9). Недра грунта определялись использованием элементов (C3D8R), дальнейшее поле моделировалось с использованием бесконечных элементов (CIN3D8).

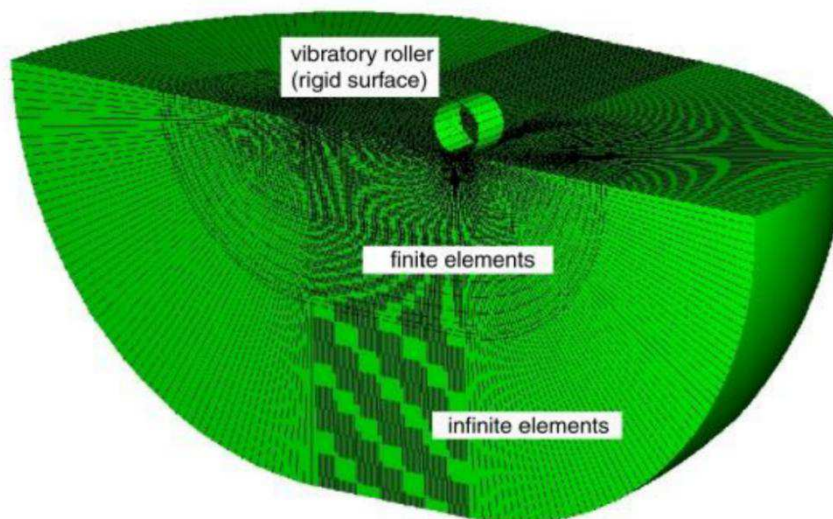


Рисунок 3.9 – ABAQUS модель процесса уплотнения дорожного покрытия вибрационным катком [37]

Вибрационный каток моделировался как жесткая недеформируемая поверхность. На Рисунке 3.10 показано полученное авторами расчетное распределение коэффициента пористости материала после одного прохода вибрационного катка. Авторы отмечают, что ABAQUS моделирование помогает оптимизировать процесс уплотнения и гомогенизацию несвязных грунтов. Однако

крайне важно еще уделять внимание выбору типа и определению параметров конечных элементов, что в работе указано не было.

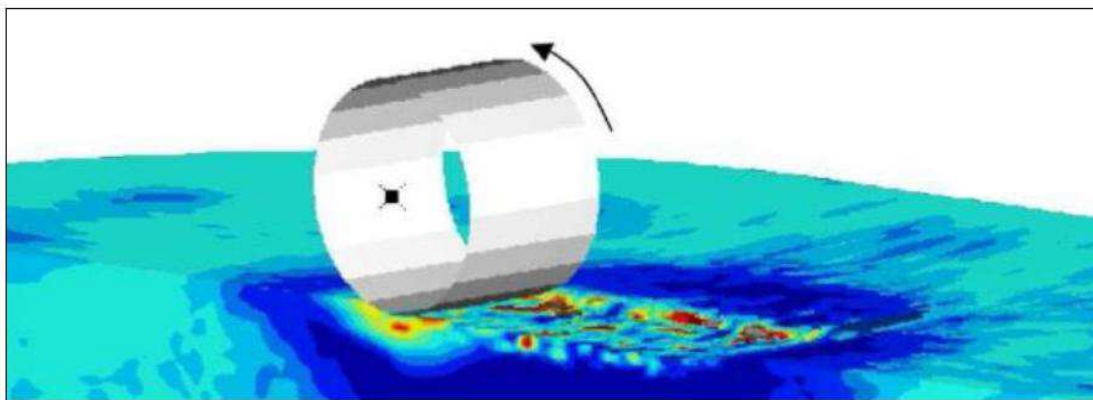


Рисунок 3.10 – Расчетное распределение пористости в уплотняемом материале после одного прохода вибрационного катка [37]

#### 4. Разработка математической модели системы «вибрационный валец - уплотняемый асфальтобетон»

##### 4.1. Описание математической модели

Проведённый в главе 3 анализ показал, что наиболее точно отражает характер уплотнения асфальтобетона трёхмассная реологическая модель взаимодействия «рама-вибровалец-уплотняемый материал» (Рисунок 3.6). К сожалению, на сегодняшний день не удаётся её реализовать полностью, так как система уравнений для режима с отрывом (3.4) является неразрешимой. Вследствие этого, для описания процесса уплотнения асфальтобетона будем использовать реологическую модель, аналогичную показанной на Рисунке 3.3.

Дифференциальное уравнение, описывающее безотрывное движение вибровальца в данной модели (при  $x_1 \geq x_2$ ;  $b\dot{x}_1 + cx_1 \geq 0$ ) имеет вид [24]

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 + b\dot{x}_1 + cx_1 = G + P\sin\omega t \\ \dot{x}_2 = \dot{x}_1 \end{cases}, \quad (4.1)$$

где  $M$  – масса вибровальца, кг;  $G$  – часть веса виброкатка, приходящаяся на ось с вибровальцом,  $H$ ;  $c$  – коэффициент жесткости,  $H/m$ ;  $b$  – коэффициент вязкого

сопротивления,  $H \cdot c/m$ ;  $P$  – амплитудное значение возмущающей силы вибровальца,  $H$ ;  $\omega$  – частота возмущающей силы,  $rad/c$ .

В отрыве от поверхности (т.е. при  $x_1 < x_2$ ) уравнение движения вибровальца примет вид

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 = G + P\sin\omega t \\ b\dot{x}_2 + cx_2 = 0. \end{cases} \quad (4.2)$$

Для исследования характера движения вибровальца и деформации асфальтобетона необходимо осуществлять переход между уравнениями (4.1) и (4.2) в зависимости от наличия контакта вибровальца с поверхностью. Поэтому для решения данных уравнений была разработана расчетная модель в среде MatLab (с использованием библиотеки блоков-диаграмм Simulink), которая позволяет получить осциллограммы перемещения вибровальца и поверхности асфальтобетона.

Уравнения (4.1) и (4.2) были приведены к виду, удобному для моделирования в среде MatLab, а именно

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3, \\ \dot{x}_3 = \frac{U_1}{M} - U_2 U_3 \left( \frac{c}{M} x_1 + \frac{b}{M} x_3 \right), \\ \dot{x}_2 = -\frac{b}{c} x_2 + U_2 U_3 \left( x_3 + \frac{b}{c} x_2 \right), \end{cases} \quad (4.3)$$

где  $x_3$  – скорость вибровальца,  $m/c$ ;  $U_1$  – уравнение движения вибратора ( $U_1 = G + P\sin\omega t$ );  $U_2$  – условие наличия силы сопротивления уплотняемого материала

$$U_2 = \begin{cases} 1, & \text{при } bx_3 + cx_1 \geq 0, \\ 0, & \text{при } bx_3 + cx_1 < 0; \end{cases}$$

$U_3$  – условие наличия контакта между вибровальцом и поверхностью

$$U_3 = \begin{cases} 1, & \text{при } x_2 - x_1 \leq 0, \\ 0, & \text{при } x_2 - x_1 > 0. \end{cases}$$

При моделировании взаимодействия вибровальца с асфальтобетоном возможны два режима колебаний: с отрывом и без отрыва. Безотрывный режим

колебаний возникает при выполнении условий  $U_2 = 1$  и  $U_3 = 1$ . В этом случае система уравнений (4.3) принимает вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3, \\ \dot{x}_3 = \frac{U_1}{M} - U_2 U_3 \left( \frac{c}{M} x_1 + \frac{b}{M} x_3 \right) \\ \dot{x}_2 = -\frac{b}{c} x_2 + U_2 U_3 \left( x_3 + \frac{b}{c} x_2 \right) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{U_1}{M} - \left( \frac{c}{M} x_1 + \frac{b}{M} x_3 \right) \\ \dot{x}_2 = x_3 \end{cases}.$$

Если хотя бы одно из условий  $U_2, U_3$  принимает значение 0, то система переходит в режим колебаний с отрывом от поверхности и система уравнений (4.3) принимает вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{U_1}{M} \\ \dot{x}_2 = -\frac{b}{c} x_2. \end{cases}$$

Решение системы уравнений (4.3) производилось в среде MatLab с использованием библиотеки функциональных блоков Simulink. Структурная схема математической модели представлена на Рисунке 4.1.1.

На этой схеме блок Differential Equation Editor предназначен для решения системы уравнений (4.3). Он имеет 3 входных параметра:  $U_1$  – закон движения вибратора,  $U_2$  – условие наличия силы сопротивления поверхности,  $U_3$  – условие наличия контакта вальца с уплотняемым материалом. Условия  $U_2, U_3$  определяются массивами блоков 2 и 3 соответственно. Массив блоков 1 предназначен для получения спектров виброускорений. Графики перемещений, скоростей и ускорений выводятся с помощью соответствующих блоков Scope.

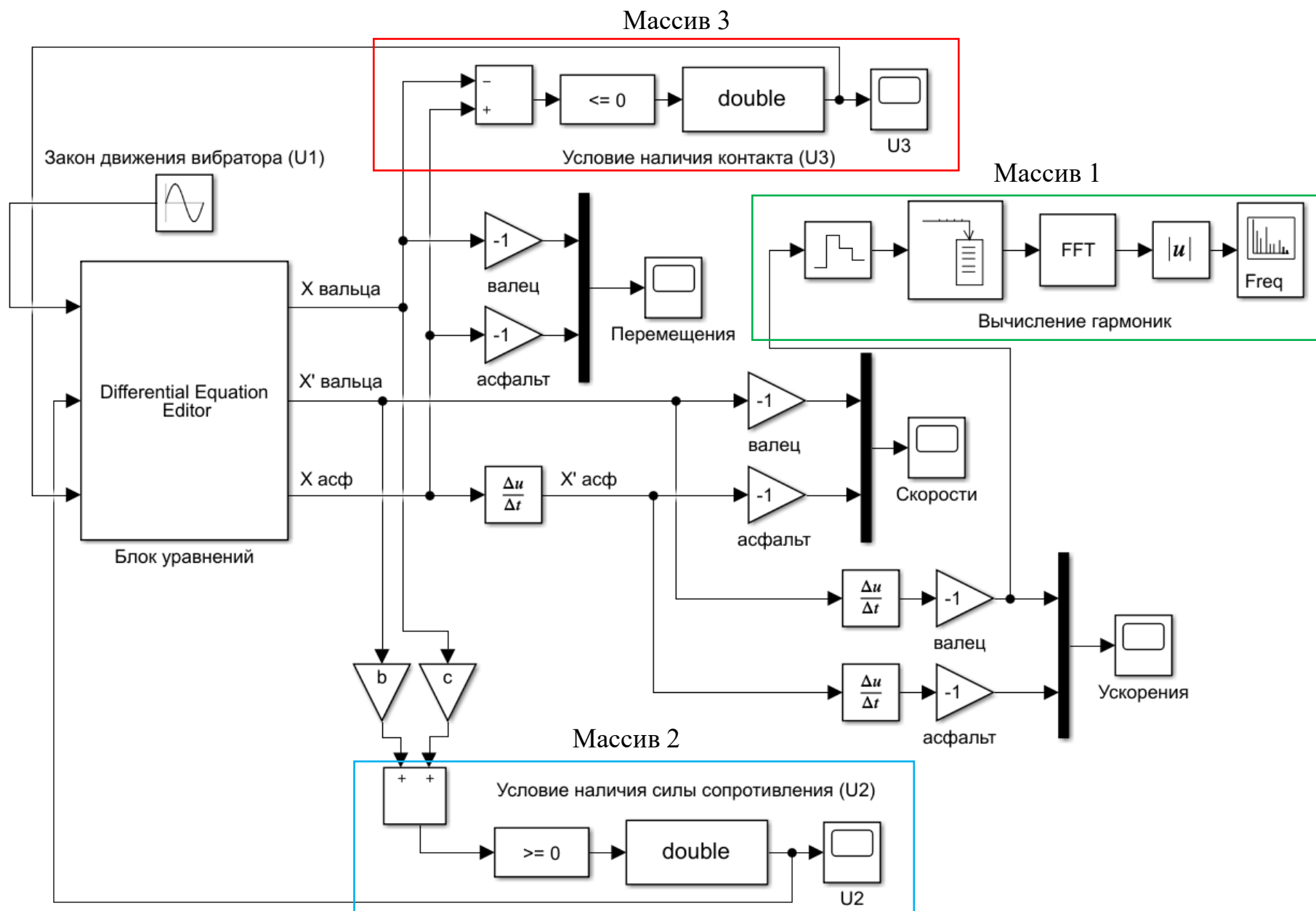


Рисунок 4.1.1 – Структурная схема математической модели в среде MatLab

## 4.2. Обоснование параметров математической модели и проведение вычислений

При использовании математической модели необходимо знать параметры катка и характеристики асфальтобетонной смеси.

Для расчёта были выбраны вибрационные катки ДУ-82, ДУ-96, ДУ-98 производства ОАО «РАСКАТ» (г. Рыбинск), параметры которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры катков ДУ-82, ДУ-96, ДУ-98

Каток	Масса катка, кг	Масса вальца, кг	Диаметр вальца, м	Ширина вальца, м	Линейное давление, Н/м	Частота вращения вала вибровозбудителя, Гц	Вынуждающая сила, Н
ДУ-82	3500	900	0,8	1,3	11900	50 60	34000 26000
ДУ-96	7800	1650	1,07	1,5	28000	40 50	57000 44000
ДУ-98	11500	2850	1,2	1,7	34000	40	75000 42000

Подробное изучение процесса уплотнения осложняется из-за отсутствия точных данных по изменениям свойств асфальтобетона во время укатки. Существуют некоторые экспериментально полученные зависимости, а также теоретические исследования, указывающие лишь на характер изменения тех или иных свойств. Рассмотрим подробнее как те или иные факторы влияют на показатели асфальтобетонной смеси в процессе укатки.

### 1. Толщина уплотняемого слоя

При увеличении толщины уплотняемого слоя  $h$  будет уменьшаться жёсткость  $c$  (см. зависимость (5.5) и  $K_y$  при постоянстве прочих условий, что приведет к увеличению затрачиваемой на уплотнение энергии и продолжительности стадии безотрывного режима (на практике – увеличение числа проходов). Из графиков на Рисунке 4.2.1 видно, что для достижения

одного и того же  $K_y$  на тонком слое необходимо значительно меньшее силовое воздействие, чем на толстом слое.

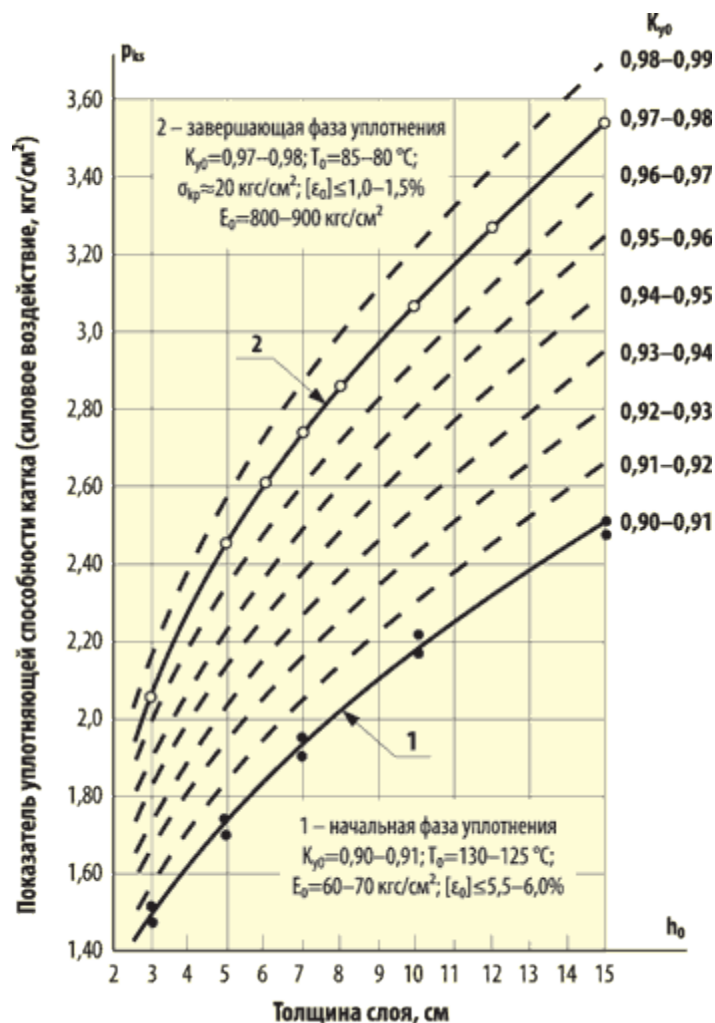


Рисунок 4.2.1 – Оптимальные значения контактных давлений катка в зависимости от толщины слоя и плотности асфальтобетона [7]

## 2. Количество проходов и скорость катка

В работе [19] Серебренниковым В.С. экспериментально были получены зависимости коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси от количества проходов вибрационного катка фирмы Натт с различными скоростями (Рисунок 4.2.2).

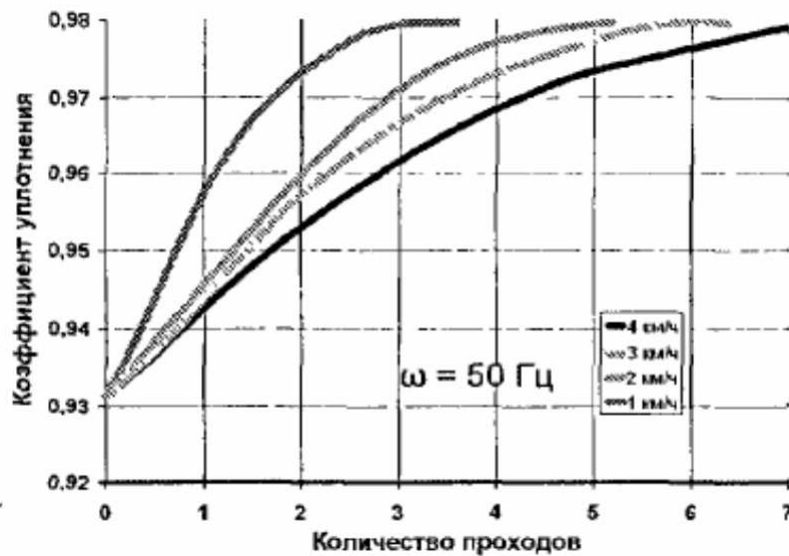


Рисунок 4.2.2 – Зависимость коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси от количества проходов вибрационного катка Hamm HD110

В работе американских ученых [34] также была получена зависимость коэффициента уплотнения от количества проходов, но при этом еще и проводилось измерение температуры асфальтобетонной смеси. Результаты их измерений представлены на графиках (Рисунок 4.2.3)

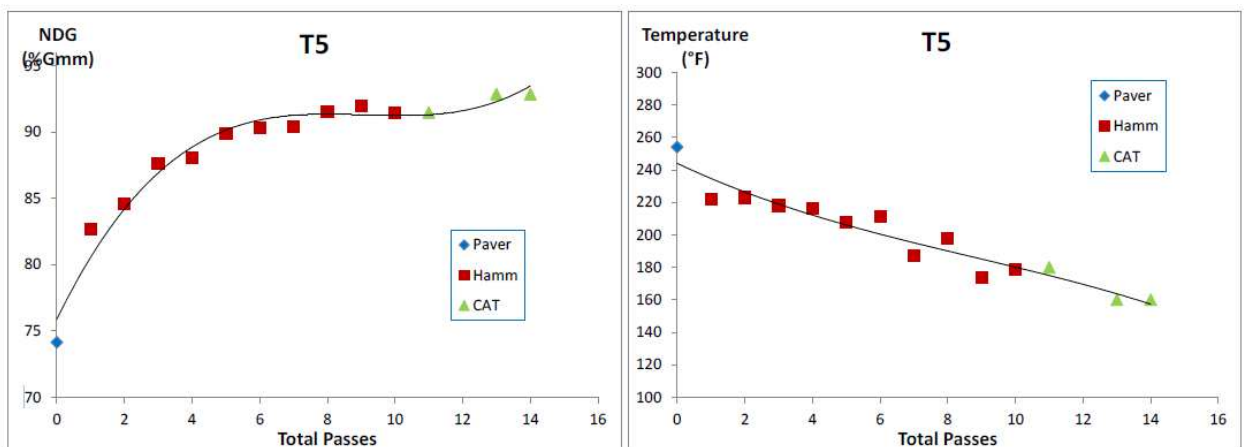


Рисунок 4.2.3 – Зависимость коэффициента уплотнения и температуры от количества проходов катком [34]



### 3. Температура смеси

По графикам на Рисунке 4.2.3, сопоставив значения после каждого прохода, можно построить зависимость коэффициента уплотнения от температуры. Получим следующий график.

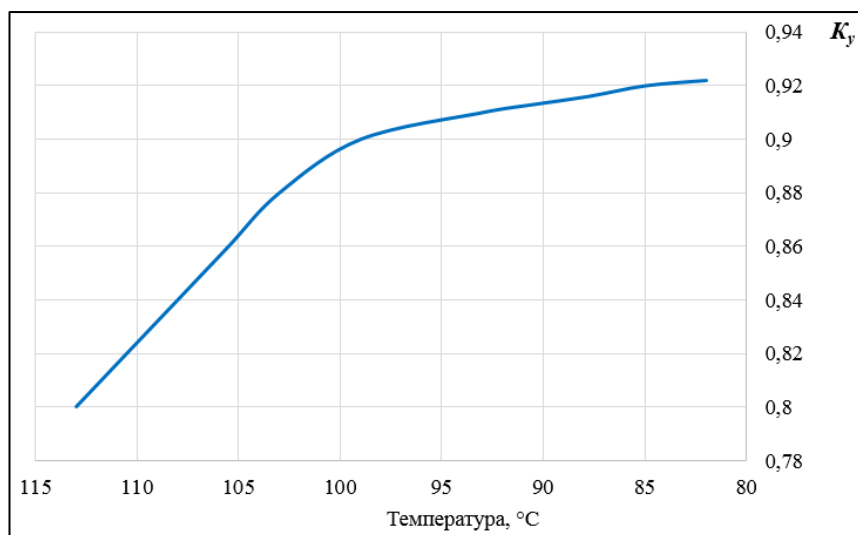


Рисунок 4.2.4 – Зависимость коэффициента уплотнения от температуры при уплотнении катком фирмы Hamn

В процессе уплотнения наблюдается большой перепад температуры со  $130^{\circ}\text{C}$  в начале укатки до  $70^{\circ}\text{C}$  в конце. При этом сильно меняются свойства материала, в том числе жесткость и вязкость асфальтобетонной смеси.

На Рисунке 4.2.5 приведена зависимость вязкости битума от температуры. Так как битум является основным элементом асфальтобетонной смеси, характер зависимости вязкости асфальтобетона от температуры будет схожим с представленным на рисунке.

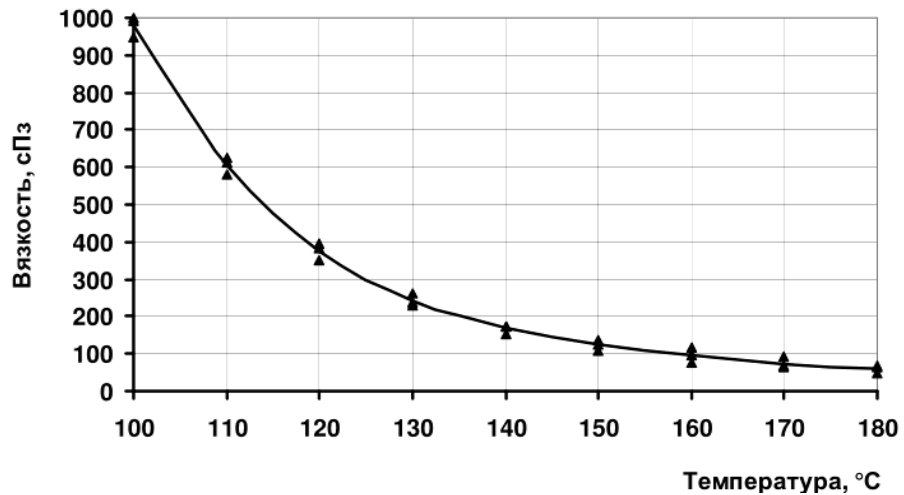


Рисунок 4.2.5 – Зависимость вязкости битума от температуры [1]

От температуры сильно зависит и модуль деформации  $E$  асфальтобетона. По данным В.П. Ложечко [9] в процессе уплотнения модуль деформации будет изменяться в диапазоне от 5 МПа в начале укатки до 50 МПа на момент окончания укатки (Рисунок 4.2.6).

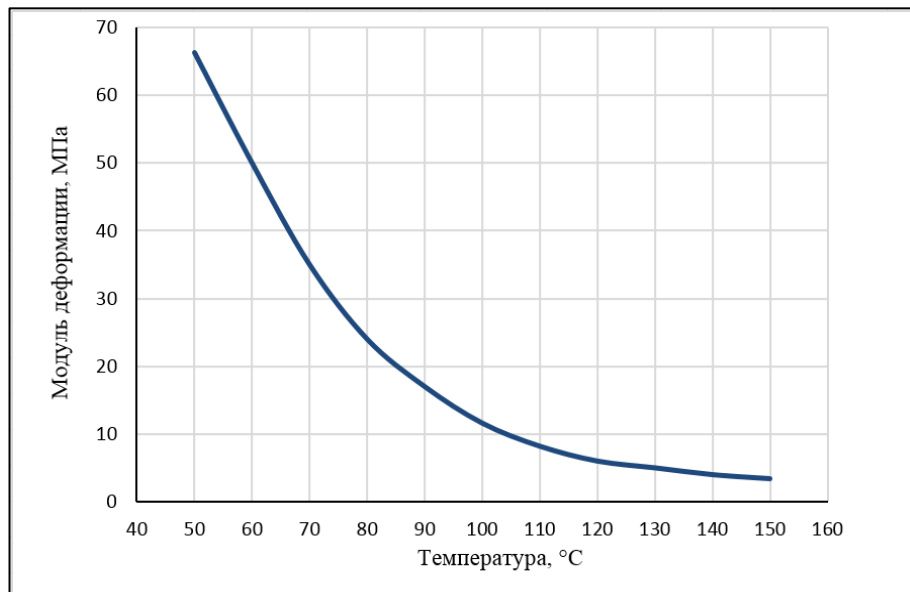


Рисунок 4.2.6 – Зависимость модуля деформации от температуры

Характеристики уплотняемой среды  $b$  и  $c$  находятся по следующим формулам [17]:

$$b = \frac{\eta S}{h}, \quad (4.4)$$

где  $b$  – коэффициент вязкого сопротивления деформируемой среды,  $H \cdot c/m$ ;  $\eta$  – вязкость деформируемой среды,  $H \cdot c/m^2$ ;  $S$  – площадь контакта,  $m^2$ ;  $h$  – толщина деформируемого слоя,  $m$ ;

$$c = \frac{ES}{h}, \quad (4.5)$$

где  $c$  – жёсткость деформируемой среды,  $H/m$ ;  $E$  – динамический модуль деформации,  $Па$ .

Площадь контакта  $S$  находится как

$$S = B \cdot L, \quad (4.6)$$

где  $L$  – длина зоны контакта (равна ширине вальца),  $m$ ;  $B$  – ширина зоны контакта,  $m$ .

По формуле Беляева-Герца [26]  $B$  находится как

$$B = 4 \cdot \sqrt{\frac{q \cdot D}{2 \cdot E}}, \quad (4.7)$$

где  $q$  – линейное давление вальца,  $H/m$ ;  $D$  – диаметр вальца,  $m$ ;  $E$  – модуль деформации материала,  $Па$ .

Толщину слоя  $h$  примем 5 см.

Так как на разных катках будет разная площадь контакта, то выполним расчёт для каждого из выбранных катков на разных этапах укатки. Результаты расчётов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчётов площади контакта и характеристик асфальтобетона на разных этапах уплотнения

Каток	Характеристики катка	Модуль деформации, $МПа$	Площадь контакта, $м^2$	Жёсткость, $МН/м$	Коэф. вязкого сопротивления, $кН \cdot c/м$
ДУ-82	Ширина вальца $L = 1,3$ м	5	0,160	16,0	115,5
	Диаметр вальца $D = 0,8$ м	10	0,113	22,7	88,5
	Линейная нагрузка $q = 11900$ Н	25	0,072	35,9	77,5
		50	0,051	50,7	115,7
ДУ-96	Ширина вальца $L = 1,5$ м	5	0,328	32,8	236,5

	Диаметр вальца $D = 1,07$ м	10	0,232	46,4	181,1
	Линейная нагрузка $q =$ 28000 Н	25	0,147	73,4	158,6
		50	0,104	103,9	236,8
ДУ-98	Ширина вальца $L = 1,7$ м	5	0,434	43,4	312,7
	Диаметр вальца $D = 1,2$ м	10	0,307	61,4	239,6
	Линейная нагрузка $q =$ 34000 Н	25	0,194	97,1	209,8
		50	0,137	137,4	313,2

Таким образом, по таблице 3 выберем диапазон коэффициентов жесткости 15...130 МН/м, и будем использовать его для моделирования в среде Matlab.

Результаты расчета для катка ДУ-96 представлены в виде графиков перемещений (Рисунок 4.2.7) и скоростей (Рисунок 4.2.8) вибровальца и уплотняемого материала, а также ускорений (Рисунок 4.2.9) вальца вибрационного катка. Кроме того, представлен спектр ускорений вибровальца (Рисунок 4.2.10).

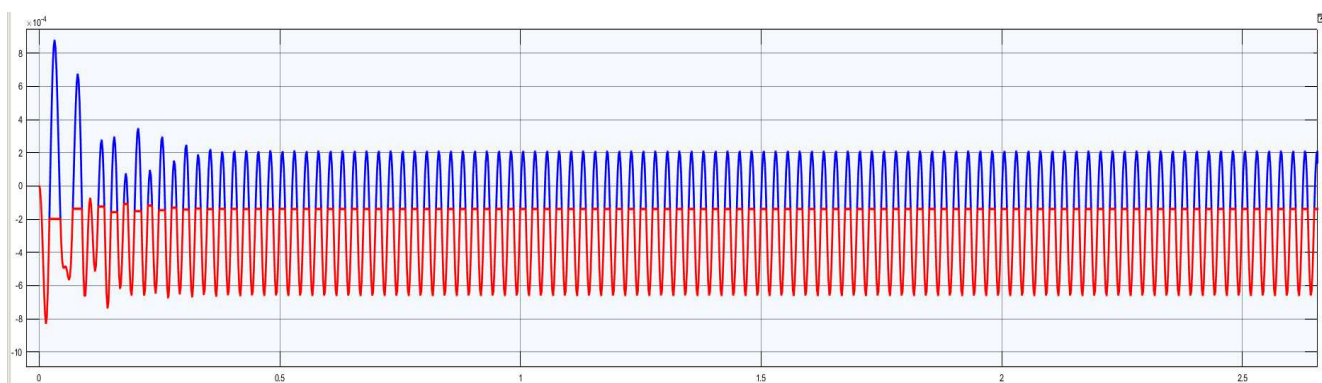


Рисунок 4.2.7 – График перемещений вальца и поверхности асфальтобетона

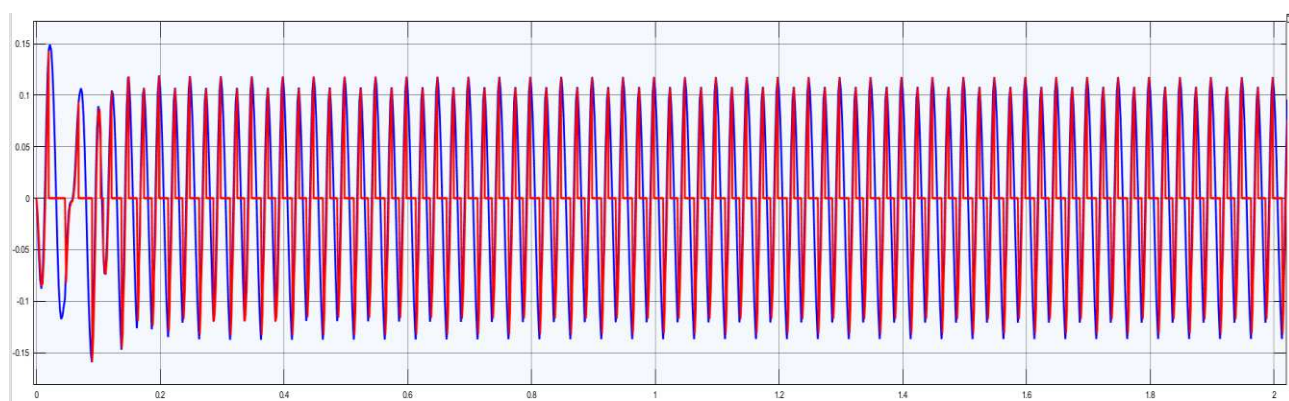


Рисунок 4.2.8 – График скоростей вальца и поверхности асфальтобетона

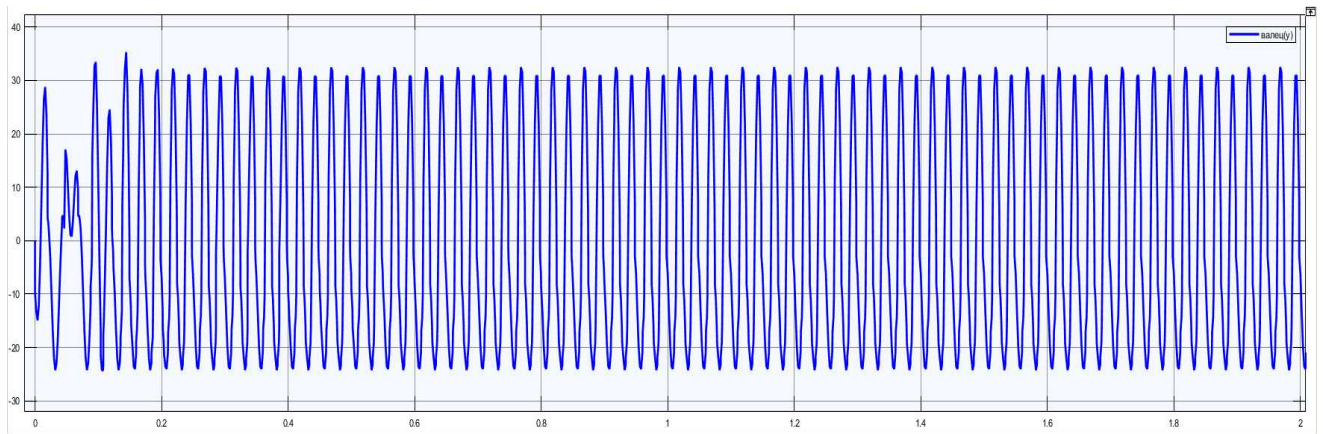


Рисунок 4.2.9 – График ускорений вальца

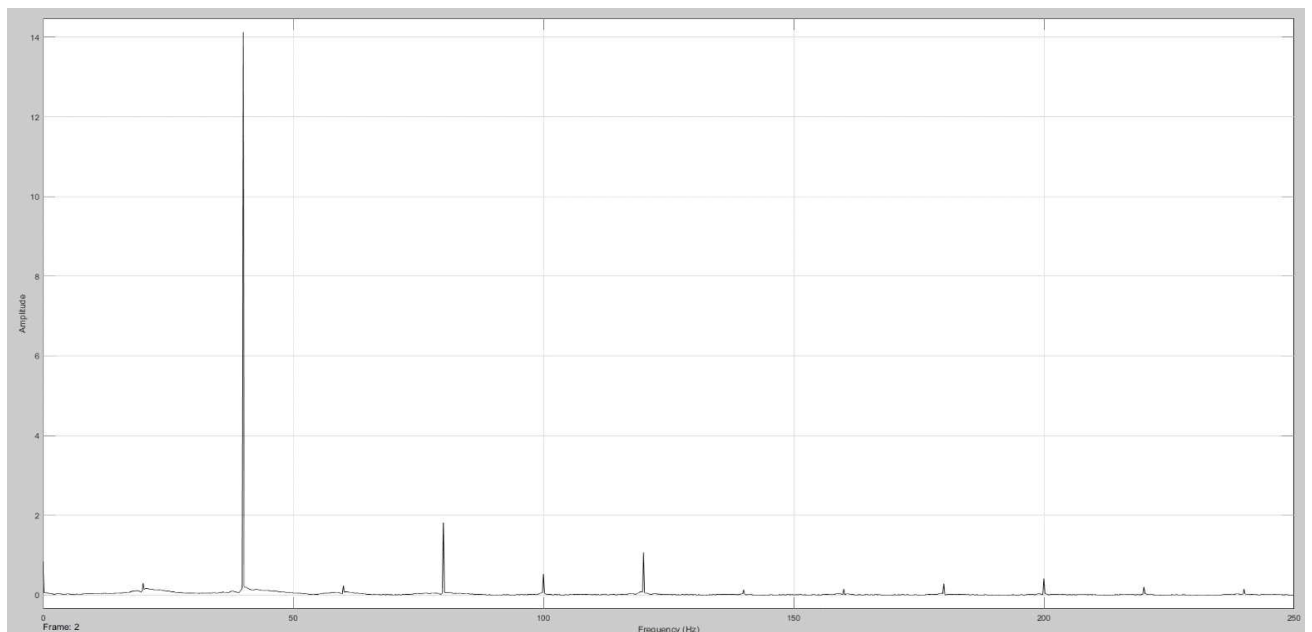


Рисунок 4.2.10 – Спектр ускорений вибрационного вальца (горизонтальная ось – ось частоты колебаний, вертикальная – амплитуды виброускорений вальца)

Разработанная модель позволяет не только определять изменения свойств уплотняемого материала, но и характер колебаний в зависимости от параметров катка. Изменяя вынуждающее усилие и частоту вращения вибровозбудителя, по графикам перемещения (Рисунок 4.2.7) можно узнать амплитуду колебаний и величину отрыва вальца от поверхности.

Для расчета возьмем параметры катка ДУ-96 (таблица 2) и свойства асфальтобетона при  $K_y=0,96$  ( $b = 160 \frac{\text{кН}\cdot\text{с}}{\text{м}}$ ,  $c = 75 \frac{\text{МН}}{\text{м}}$ ).

Построим графики зависимости амплитуды и величины отрыва от вынуждающей силы в диапазоне  $P = 10 \dots 70$ кН (Рисунок 4.2.11). Частоту вращения вибровозбудителя примем постоянной ( $\omega = 40$ Гц для катка ДУ-96).

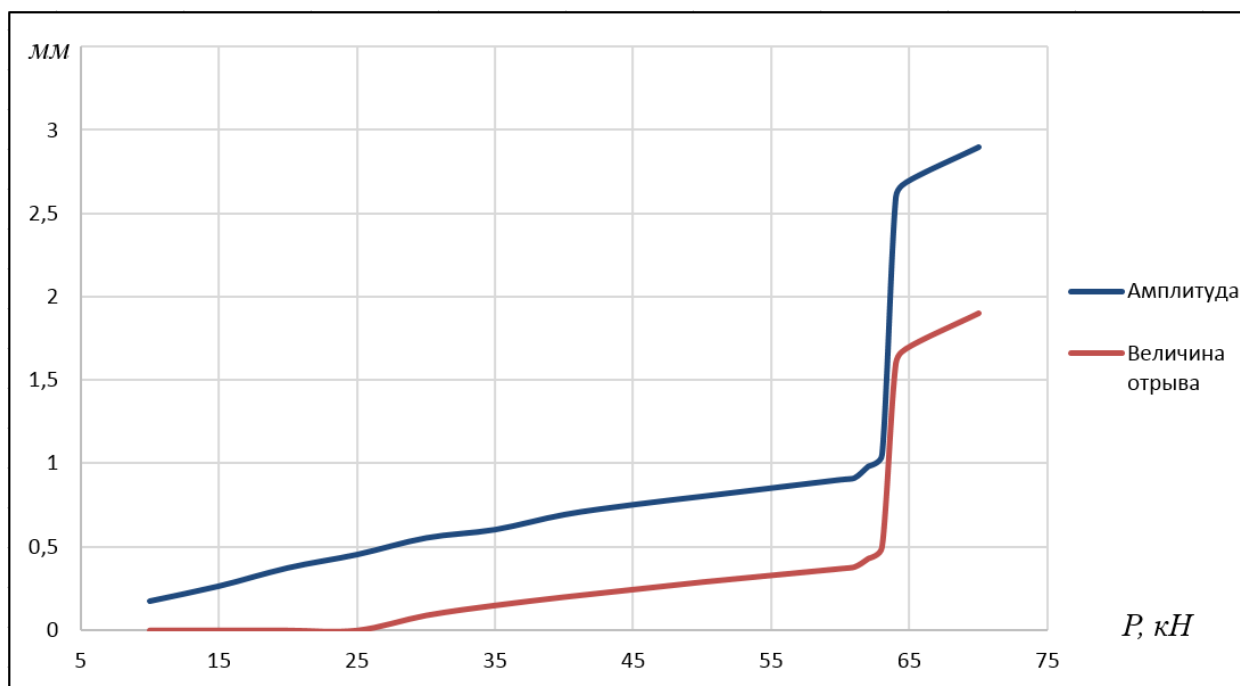


Рисунок 4.2.11 – Зависимости амплитуды и величины отрыва от вынуждающей силы

Из графиков видно, что амплитуда колебаний линейно зависит от вынуждающего усилия, но при достижении определенного значения происходит довольно резкая смена режима на «двойной прыжок», сопровождающаяся значительным увеличением амплитуды вибрационного вальца.

Также можем определить зависимости амплитуды и величины отрыва от частоты вращения. При постоянной вынуждающей силе  $P = 57$ кН будем менять частоту вращения вибровозбудителя в диапазоне  $\omega = 20 \dots 60$ Гц, считывая значения с графиков перемещений. Результаты расчетов представлены на Рисунке 4.2.12.

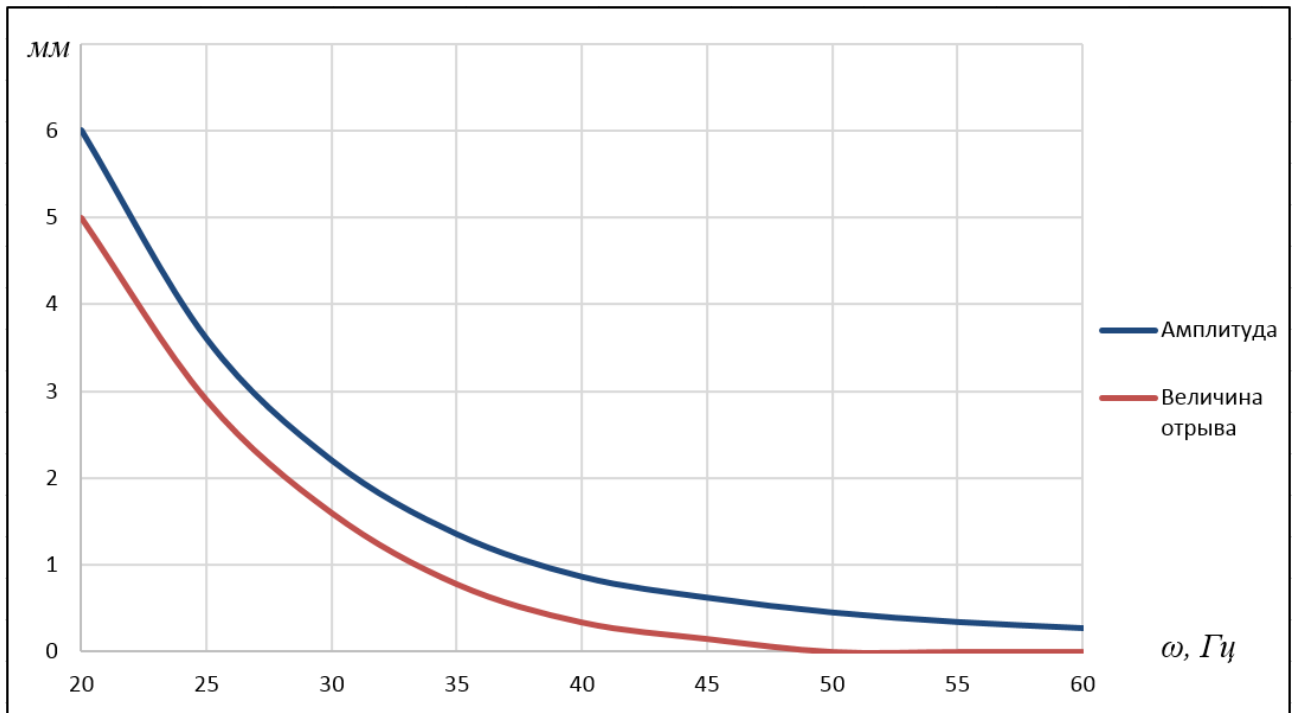


Рисунок 4.2.12 – Зависимости амплитуды и величины отрыва от частоты вращения вибровозбудителя

Известно, что разные типы асфальтобетонных смесей лучше уплотняются при тех или иных амплитудах колебаний вибровальца. Вычислим амплитуду колебаний вальца на отечественных катках в зависимости от относительной вынуждающей силы  $P/Q$  (Таблица 4). По полученным значениям был построен график, представленный на Рисунке 4.2.13.

Таблица 4 – Результаты вычислений амплитуды колебаний вальцов исследуемых катков от относительной вынуждающей силы

Каток	Вес вальца, $H$	Вынуждающее усилие, $H$	$P/Q$	Амплитуда, $mm$
ДУ-82	8829	38000	4,3	1,1
ДУ-96	16187	57000	3,52	0,69
ДУ-98	27959	75000	2,68	0,58
		42000	1,5	0,33

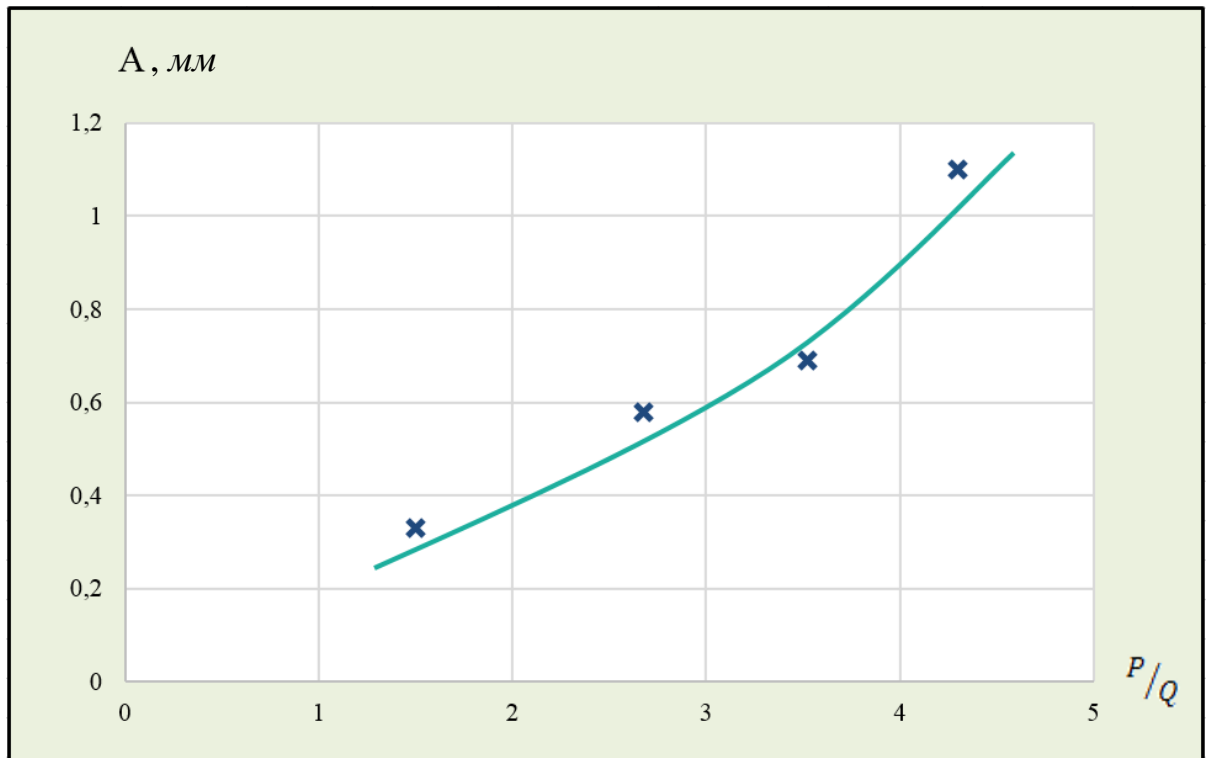


Рисунок 4.2.13 – График зависимости амплитуды колебаний вибровальца от относительной вынуждающей силы

Представленные на Рисунках 4.2.11-4.2.13 зависимости могут быть востребованы при проектировании новых отечественных вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей.

### 4.3. Выводы по главе

Разработанная математическая модель функционирования системы «вибрационный валец – уплотняемый асфальтобетон» реагирует на изменение режимов работы вибрационного катка при уплотнении асфальтобетона. По графикам перемещений вибрационного вальца и поверхности асфальтобетона подтвердилось, что происходит смена режима работы вибрационного катка с постоянного контакта на режим частичного отрыва вибрационного вальца и далее переход в режим «двойного прыжка».

При увеличении значения коэффициента жесткости асфальтобетона также меняются спектры ускорений вибрационного вальца. При работе вибраци-



онного катка в постоянном контакте с поверхностью на спектре ускорений видна лишь гармоника на рабочей частоте вибрационного катка, без проявления других гармоник и субгармоник. При переходе на режим работы вибрационного катка с частичным отрывом вибрационного вальца на спектре ускорения помимо гармоники на рабочей частоте проявляются также гармоники на частотах в 2 и 3 раза больше рабочей. Как только вибрационный каток переходит на режим работы «двойной прыжок», на спектре ускорения появляются помимо гармоник еще и субгармоники спектра ускорения вибрационного вальца на частотах  $0,5f$  и  $1,5f$ .

Кроме того, данная программа позволяет вычислять амплитуду колебаний вибровальца, а также величину его отрыва от поверхности в режиме частичного отрыва. Представленная математическая модель может быть использована при расчете параметров и проектировании новых отечественных вибрационных катков.

Однако используемая модель не может достоверно описывать процесс уплотнения, так как в ней не учитывается влияние рамы катка. А также, вызывает трудности назначение численных значений коэффициентов жесткости и вязкого сопротивления асфальта в зависимости от его температуры и плотности вследствие недостаточной изученности этих взаимосвязей. Уточнение численных значений этих коэффициентов требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

## **5. Исследование показателей непрерывного контроля уплотнения асфальтобетона для отечественных вибрационных катков**

Используя спектры ускорений вибровальца, полученные при моделировании в среде Matlab (Рисунок 4.2.10), можно вычислить некоторые из показателей уплотнения, о которых говорилось во второй главе, а именно:

$$CCV = \frac{A_{0.5f} + A_{1.5f} + A_{2f} + A_{2.5f} + A_{3f}}{A_{0.5f} + A_f} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

$$RMV = BV = C \cdot \frac{A_{0.5f}}{A_f} \quad (5.2)$$

$$CMV = C \cdot \frac{A_{2f}}{A_f} \quad (5.3)$$

Изменяя значения коэффициента жёсткости  $c$  в диапазоне 15...130 МН/м, получаем спектры ускорений для всего периода уплотнения. По спектру определяются амплитуды гармоник и подставляются в формулы (5.1–5.3). Таким образом, находятся значения данных показателей на всех стадиях укатки. После чего, по полученным значениям можно построить график зависимости показателей  $CCV$ ,  $RMV$ ,  $CMV$  от жесткости. Но, так как нас интересует плотность асфальтобетона, перейдём от коэффициента жёсткости к коэффициенту уплотнения. Для этого проведём тарировку, используя зависимость, аналогичную представленной в работе [11]

$$c \approx Y \cdot K_y^{15},$$

откуда

$$K_y \approx \sqrt[15]{\frac{c}{Y}},$$

где  $K_y$  - коэффициент уплотнения,  $c$  – коэффициент жёсткости,  $Y$  – тарировочный коэффициент для материала.

Коэффициент  $Y$  выберем, приняв, что конечное значение коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси при  $c = 130$  МН/м равно нормативному  $K_y = 0,98$ . Получим  $Y = 1,76 \cdot 10^8$ , тогда начало уплотнения будет при  $K_y \approx \sqrt[15]{\frac{1,5 \cdot 10^7}{1,76 \cdot 10^8}} \approx 0,85$ , что приблизительно соответствует реальному  $K_y$  после работы асфальтоукладчика.

Далее были выполнены расчёты и построены графики зависимостей показателей  $CCV$ ,  $RMV$ ,  $CMV$  от коэффициента уплотнения для катка ДУ-96 (Рисунок 5.1).

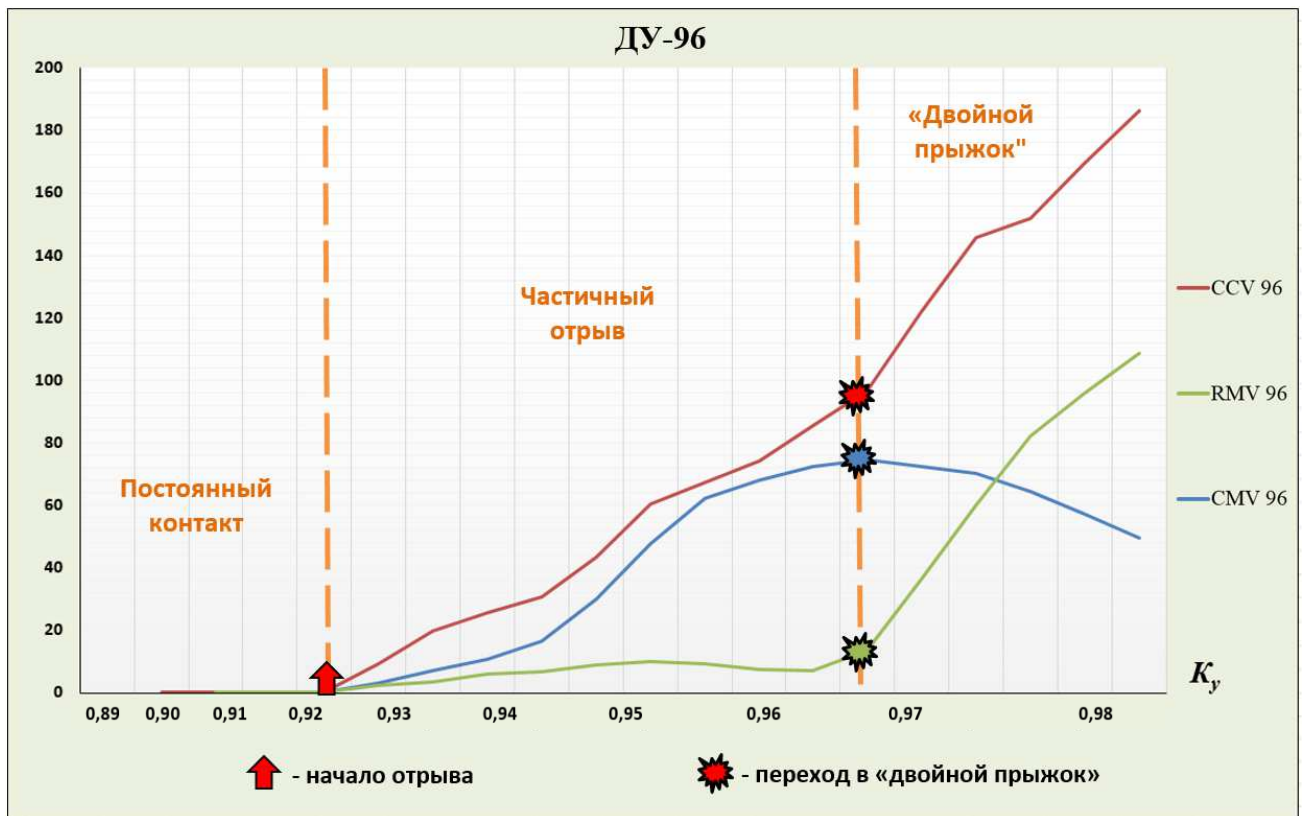


Рисунок 5.1 – Показатели CCV, RMV, CMV для катка ДУ-96

На графике приведены изменения показателей CCV, RMV, CMV по ходу уплотнения асфальтобетона катком ДУ-96 (характеристики катка в таблице 2). По оси абсцисс – коэффициент уплотнения, по оси ординат – значения показателей. Данный график можно разбить на 3 этапа: постоянный контакт между вальцом и уплотняемым материалом, частичный отрыв вальца и «двойной прыжок» (подробнее о них говорится в первой главе). Видно, что при использовании данного катка режим частичного отрыва начинается, когда коэффициент уплотнения достигает  $K_y = 0,92$ ; а режим «двойного прыжка» при  $K_y = 0,97$ , после чего эффективность использования катка падает. Судя по графику, для дальнейшего уплотнения имеет смысл сменить режим работы на данном катке, либо заменить каток на более тяжелый, чтобы достичь нормативный коэффициент уплотнения с наименьшими затратами. Это подтверждается данными, представленными в работе [10] (Рисунок 5.2).

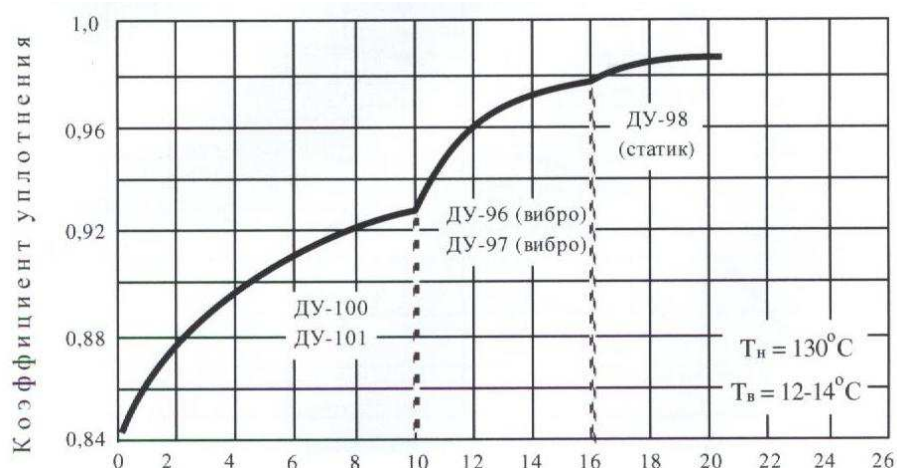


Рисунок 5.2 – Технологическая схема работы звена катков фирмы «Раскат» [10]

На графике видно, что каток ДУ-96 с включенным вибровозбудителем рекомендуется к использованию в интервале плотности с  $K_y = 0,92 \dots 0,98$ , что соответствует данным, вычисленным программой.

Рассмотрим каждый показатель по отдельности и сравним их между собой, выделив преимущества и недостатки.

### 5.1. Показатель CCV (Compaction Control Value)

По результатам расчётов построен и представлен на Рисунке 5.1.1 график зависимостей показателя CCV от коэффициента уплотнения  $K_y$  для трёх катков, характеристики которых приведены в таблице 2.

Показатель CCV имеет наиболее крутой подъём, следовательно, лучше всего отслеживаются изменения коэффициентов жесткости и уплотнения (высокая чувствительность). Данный показатель подсчитывается более сложно (5.1), чем остальные, так как не всегда известны амплитуды на  $1.5f$  и  $2.5f$ , что ограничивает его применимость. Из графика можно заметить, что более высокая чувствительность наблюдается на легких катках. Также отметим, что для тяжелых катков стадия безотрывного режима дольше, чем для лёгких.

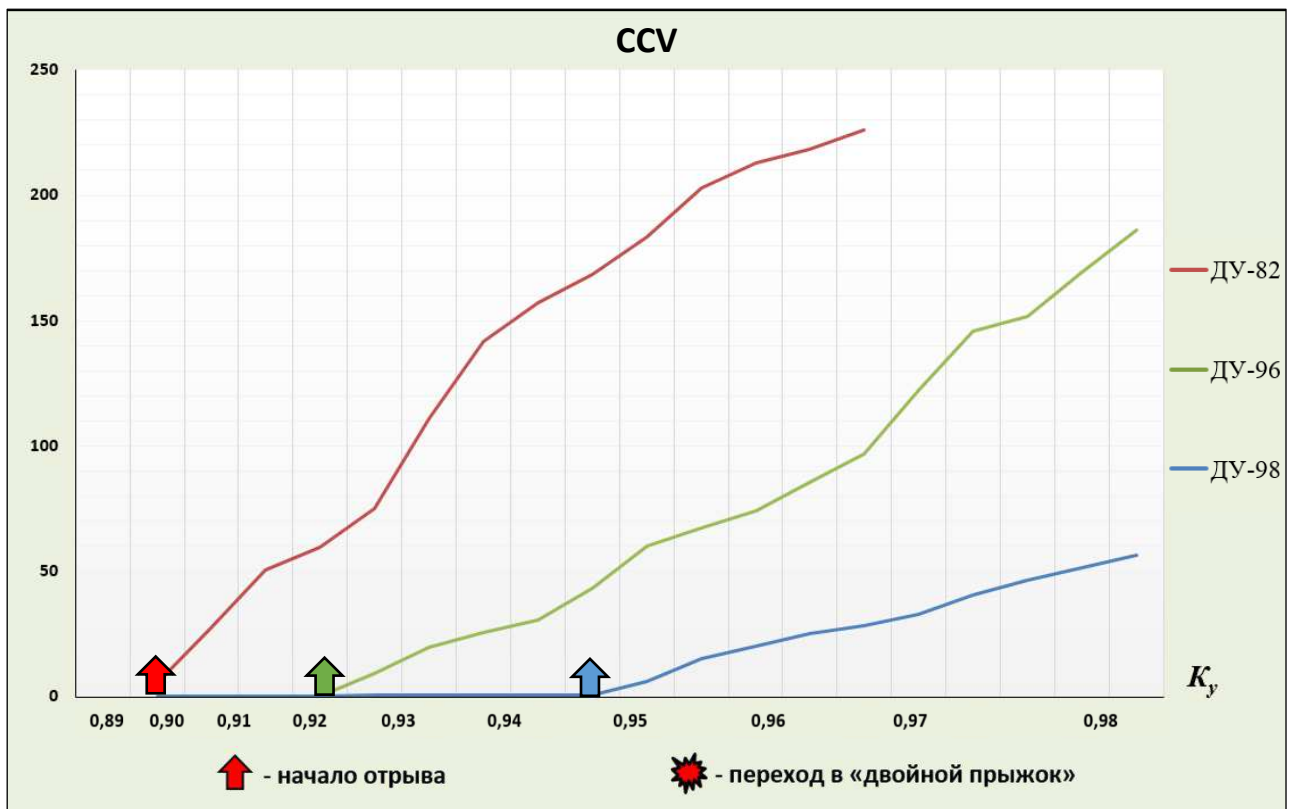


Рисунок 5.1.1 – Показатель CCV для катков ДУ-82, ДУ-96, ДУ-98

## 5.2. Показатель RMV (Resonance Meter Value)

Ещё один показатель, рассчитываемый с использованием амплитуд гармоник спектра ускорений (5.2), это показатель RMV (Resonance Meter Value). График зависимости RMV от  $K_y$  представлен на Рисунке 5.2.1.

Показатель RMV – наименее чувствительный показатель из исследуемых. Начинает резко расти, когда появляется «двойной прыжок», но на данном этапе эффективность катка падает, что означает сомнительность использования данного показателя. Возможно его совместное применение с показателем CCV, как вспомогательной характеристики для определения перехода в режим «двойного прыжка».

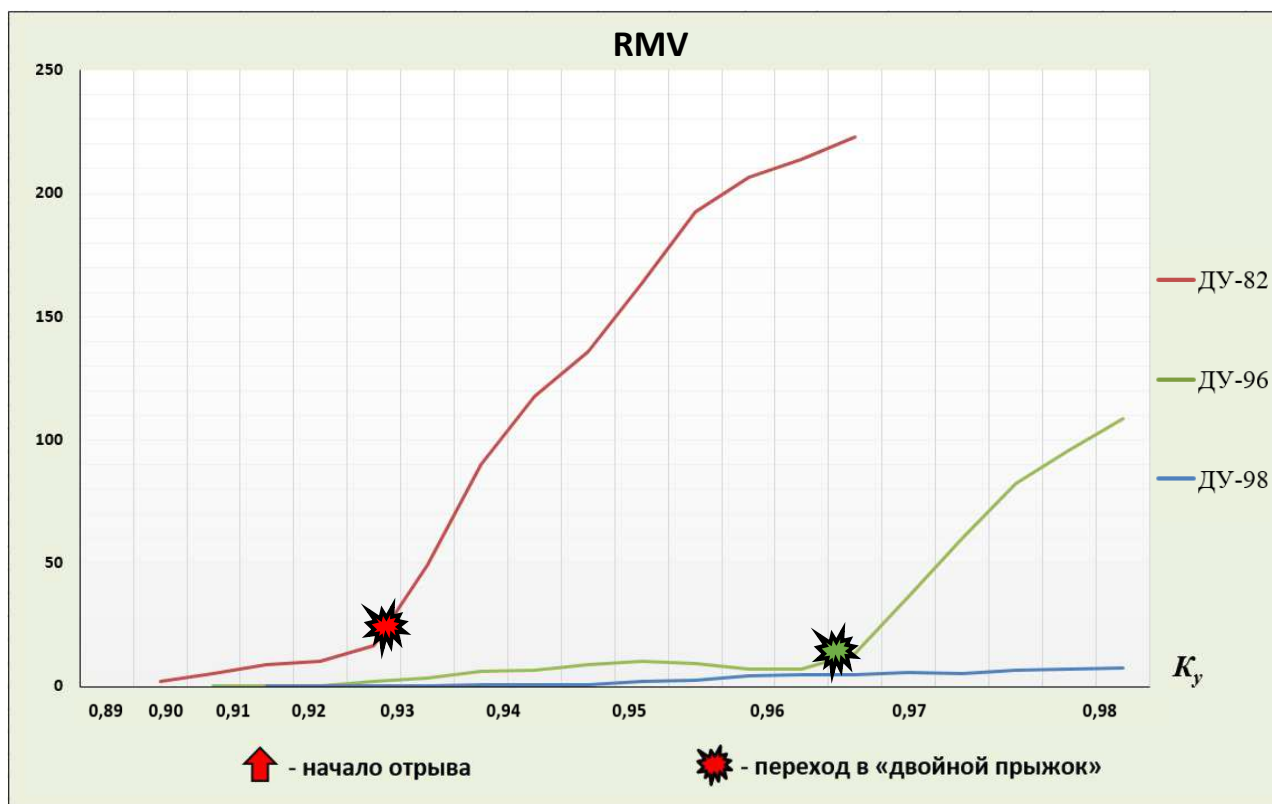


Рисунок 5.2.1 – Показатель RMV для катков ДУ-82, ДУ-96, ДУ-98

### 5.3. Показатель CMV (Compaction Meter Value)

Также был рассмотрен показатель CMV, график зависимости которого представлен на Рисунке 5.3.1.

Показатель CMV – наиболее универсальный показатель, так как легко вычисляется, имеет достаточно высокую чувствительность на этапе «частичного отрыва», а при возникновении «двойного прыжка» имеет тенденцию убывать, пропорционально эффективности катка. Это позволяет использовать его как для оценки степени уплотнения, так и для определения момента смены катка на более тяжелый. Таким образом, по графику можем определить, что каток ДУ-82 эффективнее всего использовать до  $K_y=0,93$ , а каток ДУ-96 до  $K_y=0,97$ , после чего сменять на более тяжелый. Каток ДУ-98 целесообразнее использовать с включенным вибровозбудителем, начиная с  $K_y=0,95$ .

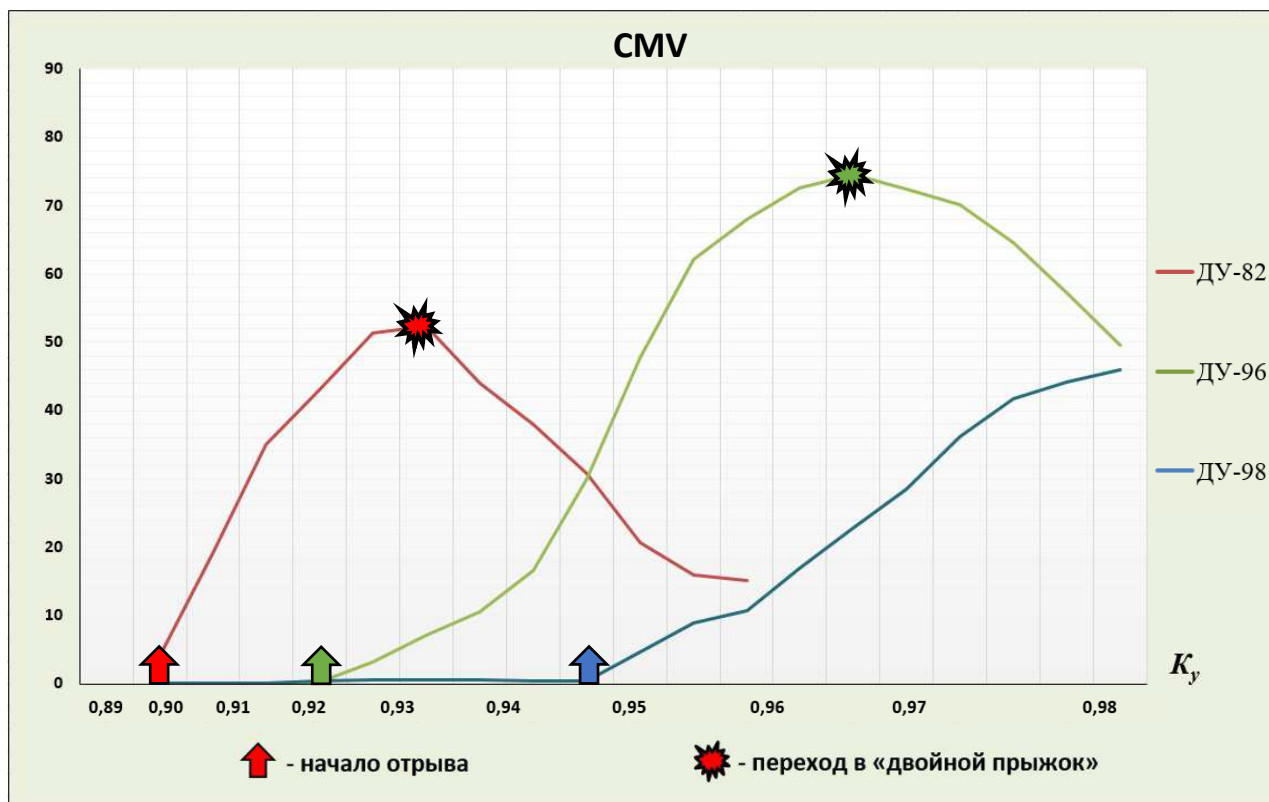


Рисунок 5.3.1 – Показатель CMV для катков ДУ-82, ДУ-96, ДУ-98

#### 5.4. Выводы по главе

По результатам анализа исследуемых показателей была составлена сравнительная таблица 5, отображающая преимущества и недостатки каждого из показателей степени уплотнения асфальтобетонной смеси.

Таблица 5 – Сравнительный анализ показателей контроля уплотнения

Показатель контроля уплотнения	Чувствительность	Простота вычисления	Контроль смены режимов	Применимость для безотрывного режима
CCV	+	-	-	-
RMV	-	+	+	-
CMV	+	+	+	-

Из таблицы видно, что показатель CMV обладает рядом преимуществ относительно остальных, вследствие чего, его можно рекомендовать к использованию фирмам-производителям катков, а также производителям вспомогатель-

ного оборудования для катков. Показатели CCV и RMV имеют свои минусы, но при совместном их применении они могут дать более точный результат, однако для этого потребуется более сложное и дорогое оборудование.

Все рассмотренные показатели имеют один общий недостаток – невозможность использования при безотрывном режиме уплотнения. Таким образом, системы непрерывного контроля на основе рассмотренных показателей эффективно применять на вибрационных катках, используемых при строительстве объектов с высокими требованиями к плотности асфальтобетонного покрытия. Для уплотнения асфальтобетонов низкой плотности (например из холодных смесей с  $K_y = 0,96$ ) такие системы становятся экономически невыгодными. Существует ряд других показателей для оперативного контроля уплотнения, описанные во второй главе, но большинство из них вычисляются лишь практическим методом. Это осложняет полное исследование и анализ подобных систем.



## Заключение

Основные результаты проведенных исследований можно сформулировать следующим образом:

1. На основе проведенного обзора существующих методов контроля качества уплотнения дорожно-строительных материалов и анализа систем непрерывного контроля уплотнения для вибрационных катков установлено, что подобные системы наиболее точно и оперативно дают информацию о степени уплотнения грунтов, однако применительно к асфальтобетонным смесям нуждаются в дополнительных исследованиях.

2. Разработана математическая модель системы «вибрационный валец-уплотняемый асфальтобетон» и реализована в среде моделирования MatLab с использованием библиотеки блоков-диаграмм Simulink. Данная модель позволяет вычислять перемещения, скорости и ускорения вибровальца в зависимости от параметров катка и уплотняемого материала, а также получать спектр ускорений для вычисления показателей уплотнения.

3. Исследован характер колебаний вибровальца в процессе уплотнения асфальтобетонных смесей для трёх катков производства российской фирмы ООО «Раскат». Выявлены различные режимы колебаний (постоянный контакт, частичный отрыв, «двойной прыжок») и определены коэффициенты уплотнения, при которых происходит смена режима работы для каждого из катков. Эти данные рекомендуется использовать для разработки технологических схем работы звена катков.

4. Вычислены и проанализированы показатели уплотнения для систем непрерывного контроля (CCV, RMV, CMV). По результатам анализа составлена сравнительная таблица, позволяющая рекомендовать к применению на отечественных вибрационных катках систему непрерывного контроля, основанную на показателе CMV, как наиболее эффективную.

## Список литературы

1. **Васильев Ю.Э.** Исследование влияния ультразвуковой обработки на вязкость битума / Васильев Ю.Э., Калачев Ю.Н // МАДИ. – 2012. – 7 с.
2. **Герасимов, М. Д.** Сложение колебаний в вибровозбудителях / М. Д. Герасимов // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. - 2016, №3. – с. 116 – 121.
3. **Доценко, А. И.** О результатах исследования силового взаимодействия вибротрамбующей машины и уплотняемого грунта / А. И. Доценко // Труды МАДИ. Вып. 114: Исследование рабочих процессов дорожно-строительных машин. – Москва, 1976. – с. 93 – 97.
4. **Дудин, В. М.** Анализ расчетной схемы вибратора на упруго-вязком ограничителе / В. М. Дудин, Н. Н. Попова // «Строительные и дорожные машины». Сб. научных трудов Ярославского Политехнического Института. - Ярославль, 1975. - с. 11-14.
5. **Евтюков, С. А.** Построение механореологических моделей процессов взаимодействия рабочих органов строительно-дорожных машин со средой: учебное пособие / С. А. Евтюков, А. А. Овчаров, И. В. Замараев // СПбГА-СУ. – СПб., 2011. – 59 с.
6. **Закирзаков, Г. Г.** Экспериментально-теоретическое определение параметров двухмассовой колебательной системы / Г. Г. Закирзаков, М. И. Капустин // Рабочие процессы и динамика машин для разработки, уплотнения грунтов и вибрационного формования изделий. - Ярославль, 1986, с. 81-86.
7. **Костельов М.П.** Обеспечение высокого качества уплотнения асфальтобетона / Костельов М. П. Перевалов В.П. // «Дорожная техника». – 2006. –10с.
8. **Кустарев, Г. В.** Методы и приборы контроля качества строительства дорожных покрытий / Г. В. Кустарев, С. А. Павлова, Х. А. Джабраилов // Проблемы совершенствования конструкции строительных, дорожных, коммунальных и аэродромных машин: материалы семинара. - Москва, 2-3 февраля 2011 г. – с. 69.
9. **Ложечко В.П.** Научные основы создания дорожных катков с автоматизированным оборудованием / Ложечко В.П.// СПбГТУ. – 1997. – 321 с.
10. **Ложечко В.П.** Машины для уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей/ Ложечко В.П., Шестоपालов А.А.// СПбГПУ. – 2006. – 71 с.
11. **Морев А.С.** Обоснование показателя уплотнения для системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками / Морев А.С. // ЯГТУ. – 2017. – 180 с.

12. **Носов, С. В.** Концепция совершенствования технологий уплотнения дорожных грунтов и асфальтобетонных смесей на основе развития их реологии / С. В. Носов // Вестник Липецкого государственного технического университета. – Липецк, 2012. - №1(20). – с. 86 – 94.
13. **Носов, С. В.** Взаимодействие колесных, гусеничных и дорожных машин с деформируемым опорным основанием (научные основы): дис. ... д. техн. наук: 05.05.03; 05.05.04 / Носов Сергей Владимирович. – Санкт-Петербург, 2008. – 480 с.
14. **Осмаков, С. А.** О движении вибратора, свободно опирающегося на упругий ограничитель / С. А. Осмаков, О. А. Савинов // Изв. АН СССР. Механика и Машиностроение. – 1960, №3. - с. 3-11.
15. **Пермяков, В. Б.** Обоснование выбора параметров вибрационных катков / В. Б. Пермяков, А. В. Захаренко, С. В. Савельев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003, № 2. - с. 100-103.
16. **Пермяков, В. Б.** Устройство для автоматического контроля процесса уплотнения дорожно-строительных материалов катками и виброкатками / В. Б. Пермяков, А. В. Захаренко, В. В. Дубков, В. О. Поляков, А. В. Шапошников, Ю. С. Седельникова // Патент на изобретение RUS 2188272 30.05.2000.
17. **Савельев С.В.** Развитие теории и совершенствование конструкций вибрационных катков с пневмошинными рабочими органами / Савельев С.В. // СиБАДИ. – 2014. – 326 с.
18. **Савельев, С. В.** Исследования деформирования упруго-вязкой среды при ударном нагружении / С. В. Савельев // Вестник сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск, 2012. - №4-26. – с. 100 – 103.
19. **Серебренников В.С.** Обоснование режимных параметров вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей / Серебренников В.С. // - Омск, 2008. - 170 с.
20. **Телушкин, А. В.** Обоснование структуры и режимов функционирования системы «вибрационный каток – земляное сооружение – приборы контроля параметров»: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Телушкин Александр Владимирович. – Москва, 2000. – 259 с.
21. **Тюремнов, И. С.** Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 1 / И. С. Тюремнов, А. С. Морев // Вестник ТОГУ. – 2015, №4(39). - с. 99-108.
22. **Тюремнов, И. С.** Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 2 / И. С. Тюремнов, А. С. Морев // Вестник ТОГУ. - 2015. №1(40) - с. 69-76.

23. **Тюремнов, И. С.** Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и «интеллектуальное уплотнение» / И. С. Тюремнов // Вестник ТОГУ. – 2016, №2(41). - с. 115-122.
24. **Тюремнов И.С.** Теоретическое определение составляющих времени взаимодействия вальца вибрационного катка с уплотняемым грунтом / И.С. Тюремнов, И.С. Филатов, А.С. Морев // ЯГТУ. – 2014. – с. 444.
25. **Хархута, Н. Я.** Воздействие вибрационных нагрузок на грунты. В сб. «Механизация и автоматизация дорожного строительства» / Владимирова В. Н., Шестопапов А. А. // Труды Союздорнии, выпуск 26. - Балашиха, Московская обл., 1969. - с. 4-29.
26. **Хархута, Н. Я.** Машины для уплотнения грунтов / Н. Я. Хархута // Л.: Машиностроение, 1973. – 176 с.
27. **Хархута, Н. Я.** Определение основных параметров трамбуемых машин для уплотнения грунтов / Н. Я. Хархута, М. П. Костельов // Строительные и дорожные машины, №11, 1969. - с.11-14.
28. **Шестопапов, А. А.** Выбор оптимальной величины возмущающей силы вибротрамбующих машин / А. А. Шестопапов // Труды ЛПИ. Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР. - Л., 1968, №299: Машиностроение: сборник статей. - с. 212 - 214.
29. Измеритель плотности асфальтобетона ПАБ, руководство по эксплуатации / «ИНТЕРПРИБОР». – 2014. – 49 с.
30. **Adam, D.** Földművek tervezése, minőségbiztosítása és monitoringja Ausztriában / D. Adam // Standardization, Design, Quality Assurance and Monitoring of Earth Works in Road Engineering in Austria. - Budapest, 21 November 2007. – p. 33.
31. **Anderegg, R.** Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors [Электронный ресурс] / R. Anderegg, A. Dominik, K. Kaufmann // Intelligent compaction
32. **Briaud, J. L.** Intelligent compaction: overview and research needs / J. L. Briaud J. Seo // Texas A&M University. - December 2003. - p.84.
33. **Chang, G.** Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology For Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials / G. Chang, Q. Xu, R. Rasmussen, D. Merritt, L. Michael, D. White, B. Horan // IC Data Management, Federal Highway Administration Office of Pavement Technology, НІРТ-10. - 2010. - p. 118.
34. **Chang G.** A Study on Intelligent Final Report Compaction and In-Place Asphalt Density / George Chang, Qinwu Xu, Jennifer Rutledge // - 2014. - 309 с.

35. **Erdmann, P.** Numerical simulation of dynamic soil compaction with vibratory compaction equipment / P. Erdmann, D. Adam // XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering. - Vienna, Austria, 9-11 September 2014. – p. 243-248.
36. **Horan, B.** Improving Quality Control with Intelligent Compaction / B. Horan // Ohio Paving & NCAUPG Conference. – 2011. – p. 46.
37. **Hügel, H. M.** High-performance Abaqus simulations in soil mechanics / H.M. Hügel, S. Henke, S. Kinzler // Abaqus Users' Conference, 2008. – p. 1-15.
38. **Mooney, M. A.** Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork Compaction: An Overview / M. Mooney, D. Adam // Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2004. – p. 1-12.
39. **Sandström, A. J.** Intelligent Systems for QA/QC in soil compaction / A. J. Sandström, C. B. Pettersson // GEODYNAMIK HT AB Box 7454 SE-103 92. - Stockholm, Sweden. – p. 1-17.
40. **Scherocman, J. A.** Intelligent Compaction, Does It Exist? [Электронный ресурс] / J. A. Scherocman, S. Rakowski, K. Uchiyama. // Intelligent Compaction.
41. **Scullion, T.** Field evaluation of new technologies for measuring pavement quality / T. Scullion, S. Sebesta, D. Rich, W. Liu // Texas Department of Transportation USA. – 2006. - P.57.
42. **Siminiati, D.** Simulation on vibratory roller-soil interaction / D. Siminiati, D. Hren // Advanced engineering ISSN 1846-5900, №2. – 2008.
43. **Van Susante, P. G.** Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // P. G. Van Susante, M. A. Mooney // Journal of engineering mechanics © ASCE, August 2008. – p. 684-693.
44. Variocontrol [Электронный ресурс] / BOMAG [Официальный сайт]
45. **Vennapusa, P. KR.** «Field Validation of Intelligent Compaction Monitoring Technology for Unbound Materials» / P. KR. Vennapusa, D. J. White, M. J. Thompson // Minnesota Department of Transportation Federal Highway Administration. – 2007. - p.12.
46. **White, D. J.** A review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks / D. J. White, P. KR. Vennapusa // Earthworks Engineering Research Center (EERC). Final Report ER10-04. – April 2010. – p. 31.
47. **White, D. J.** Iowa DOT Intelligent Compaction Research and Implementation – Phase I / D. J. White, P. KR. Vennapusa, H. Gieselmann // Final Report, EERC Publication ER10-06. – November 2010. – p. 129.
48. Compactometer, compaction meter for vibratory rollers / Geodynamik // – 23 с.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

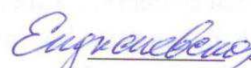
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт

Кафедра Строительных материалов и технологий строительства

УТВЕРЖДАЮ

Заведующая кафедрой

 И.Г. Енджиевская


« 25 » 06 2021 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

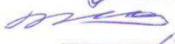
Тема: «Непрерывный неразрушающий контроль уплотнения дорожных  
покрытий»


08.04.01 Строительство

08.04.01.00.07 Комплексная механизация и автоматизация строительства

Научный руководитель  доц., канд. техн. наук А.П. Прокопьев

Выпускник \_\_\_\_\_ А.И. Шведов

Рецензент  проф., д-р техн. наук В.И. Иванчура

Нормоконтролер  - доц., канд. техн. наук Е.С. Турьшева

Красноярск 2021