

На правах рукописи



МУСИЯКО ДМИТРИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАЛЫХ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ
В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном общеобразовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Башкарёв Альберт Яковлевич

Официальные оппоненты: **Носов Сергей Владимирович**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет», кафедра
«Строительного материаловедения и
дорожных технологий», профессор;
Ефремов Игорь Михайлович
кандидат технических наук, доцент,
СПб ГБПОУ «Академия машиностроения имени
Ж.Я. Котина», Ленинградский
машиностроительный факультет, преподаватель;

Ведущая организация: Научно-производственная корпорация
«Механобр–техника», Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «26» февраля 2019 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно–строительный университет» по адресу: 190103, г. Санкт-Петербург, Курляндская ул., д. 2/5, аудитория 340-К.

Тел./Факс: (812) 316–58–72; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно–строительный университет» и на сайте:

<http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/musiyako-dmitriy-valentinovich>

Автореферат разослан «22» января 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.223.02,
кандидат технических наук,
доцент



Олещенко Елена Михайловна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день правительство РФ анонсировало запуск нескольких национальных проектов и один из наиболее значимых – «ЖКХ и городская среда». Основная цель данного проекта – благоустройство городской среды, а одно из направлений – благоустройство дворов, которое включает в себя ремонт дворовых проездов. В настоящее время ситуация такова, что в лучшем случае, долговечность такого ремонта составляет 3-5 лет и связано это, в первую очередь, с недостаточной механизацией данного процесса и некачественным уплотнением укладываемой асфальтобетонной смеси в стеснённых условиях работы.

На текущий момент модернизация конструкций малых средств механизации в дорожном строительстве – малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнительных машин с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия остановилось. Отсутствие методики компоновки конструкций с точки зрения обеспечения эффекта виброперемещения с привлечением математического аппарата и нехватка научных знаний в области вибрационной механики в значительной степени тормозят совершенствование конструкций таких машин.

Выполненная диссертационная работа посвящена решению именно этой задачи и конкретно научному обоснованию методики определения параметров процесса виброперемещения малых средств механизации в дорожном строительстве.

Степень разработанности. Исследования, касающиеся технологических процессов уплотнения дорожных строительных материалов, проектирования новых конструкций дорожной вибрационной уплотнительной техники и изучения процесса уплотнения поверхностными вибрационными уплотнителями рассмотрены в работах отечественных учёных: Д.Д. Баркана, А.Я. Башкарёва, И.И. Блехмана, М.П. Зубанова, А.И. Новожилова, Н.Я. Харкуты, А.А. Шестопалова, а также зарубежных авторов С. Adam, A. Jonsson, S. Ryan и S. Xu, C. F. Beards. Вопросы, касающиеся расширения технологических возможностей современных виброплит представлены в материалах производителей Wacker Neuson (Германия), ТЕС (Чехия), BOMAG (Германия), Weber (Германия), Дунпарас (Швеция), ПВ (Россия), Splitstone (Россия), Plato (Китай), Champion (Китай), Top Machine (Китай), СО (Беларусь), GROST (Россия).

Анализ опубликованных результатов исследований показал, что динамика малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнительных машин с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия с точки зрения обеспечения эффекта виброперемещения, недостаточно изучена и тема, исследуемая в диссертации, не нашла отражения в работах отечественных и зарубежных учёных.

Целью диссертационной работы является разработка методического инструментария, обеспечивающего возможность расчёта конструкций

малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнительных машин с различными видами рабочего оборудования, чтобы с его помощью найти новые возможности их совершенствования.

Задачи диссертационного исследования:

1. Создать математическую модель динамики поверхностного вибрационного уплотнителя с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия и найти условие, при котором уплотнитель самостоятельно передвигается по уплотняемой поверхности за счёт возмущающей силы вибровозбудителя.

2. Предложить метод совершенствования конструкции малогабаритного поверхностного вибрационного уплотнителя с использованием преимуществ вальца и плиты.

3. Создать методику расчёта направленного толкающего усилия вибровозбудителя ненаправленного действия, позволяющую определить возможность совмещения процессов уплотнения малосвязных материалов и их планирования.

4. Экспериментально исследовать изменение коэффициента поверхностного трения между поверхностью грунта и рабочей поверхностью виброуплотнителя во время его работы.

5. Разработать методику компьютерного расчёта для компоновки конструкций малогабаритных поверхностных виброуплотнителей с различными видами рабочего оборудования, при которой возникает эффект виброперемещения.

6. Математически описать процесс виброперемещения двухвальцового уплотнителя-планировщика с двумя вибровозбудителями колебаний ненаправленного действия.

7. Экономически обосновать эффективность внедрения конструкции комбинированного поверхностного уплотнителя на примере создания предприятия по его производству.

8. Разработать методику определения параметров процесса виброперемещения малых средств механизации в дорожном строительстве, которая является совокупностью всех вышеперечисленных методов.

Объектом диссертационного исследования являются малогабаритные поверхностные вибрационные уплотнители, в том числе комбинированные, с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия.

Предметом исследования является динамика передвижения малых средств механизации в дорожном строительстве с вибровозбудителями колебаний ненаправленного действия.

Научная новизна диссертационного исследования.

1. Создана теория расчёта конструкций малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнительных машин с различными видами рабочего оборудования.

2. Разработаны алгоритмы, на основе которых созданы компьютерные программы для определения оптимальных геометрических параметров

конструкций малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнительных машин с точки зрения обеспечения эффекта их виброперемещения.

Теоретическая значимость работы. Заключается в создании основ математического описания динамики малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнительных машин с вибровозбудителями колебаний ненаправленного действия.

Практическая значимость работы. Заключается в возможности использования результатов исследования при проектировании конструкций малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнительных машин с различными видами рабочего оборудования.

Методология и методы диссертационного исследования. В работе над диссертацией были использованы такие приемы как: анализ, сравнение и моделирование. Сравнительный анализ конструкций поверхностных вибрационных плит позволил определить, что закономерностей при проектировании современных конструкций вибрационных плит не существует. Разработанный экспериментальный метод позволил изучить природу трения при вибрации и подтвердить правильность теоретически полученных решений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика исследования динамики малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнителей, в том числе комбинированных, с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия.

2. Алгоритм компьютерной программы для компоновки конструкции комбинированного поверхностного виброуплотнителя.

3. Математическое описание динамики вибрационного уплотнителя-планировщика с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия.

4. Алгоритм компьютерной программы для компоновки конструкции вибрационного уплотнителя-планировщика.

5. Математическое описание процесса виброперемещения двухвальцового уплотнителя-планировщика с двумя вибровозбудителями колебаний ненаправленного действия.

6. Результаты экспериментальных исследований коэффициента поверхностного трения между поверхностью грунта и рабочей поверхностью вибрационной уплотнительной машины во время её работы.

7. Результаты экспериментальной проверки выводов о возможности создания конструкции малогабаритного поверхностного комбинированного виброуплотнителя, выполненной в виде шарнирно соединённых плиты и вальца.

Область диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 05.05.04 – «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины», а именно пункту 2 – «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения».

Степень достоверности результатов диссертационного исследования. Обеспечена использованием известных положений, накопленного опыта, а также достоинств из мировой практики в области проектирования и

эксплуатации поверхностных вибрационных уплотнительных машин, использованием математического аппарата в качестве инструмента исследования, а также сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на международных научно-практических конференциях: III и V международных научно-практических конференциях «Современное машиностроение. Наука и образование» (Санкт-Петербург, 2013 и 2016), а также на семинарах кафедры «Транспортные и технологические системы» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Результаты исследования внедрены в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» при подготовке магистров по программе «Строительные и дорожные машины» направления «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе 4 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, 4 в сборнике тезисов и докладов научно-практических конференций, в 1 патенте на полезную модель, в 2 свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и задач дальнейших исследований, списка литературы, состоящего из 120 источников и приложений, представленных на 4 страницах. Текст работы изложен на 139 страницах. Диссертация содержит 87 формул, 18 таблиц и 63 рисунка.

Во введении обосновывается актуальность проблемы совершенствования современных конструкций малых средств механизации в дорожном строительстве и недостаточной исследованности природы фрикционного взаимодействия рабочего органа поверхностного вибрационного уплотнителя с поверхностью уплотняемого материала. Формулируются цели и задачи диссертационного исследования.

В первой главе приведены сравнительный анализ конструкций малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнителей. Производится обзор опубликованных работ, посвящённых исследованиям в области проектирования новых конструкций дорожной вибрационной уплотнительной техники и изучения процесса виброперемещения поверхностных вибрационных уплотнителей с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия, а также природы трения при вибрации. Сформулирована постановка вопроса, цели и задачи исследования.

Во второй главе описана общая методика исследования динамики комбинированного поверхностного уплотнителя. Приведён алгоритм расчёта, на основе которого создана компьютерная программа для определения оптимальных параметров конструкции комбинированного поверхностного уплотнителя с точки зрения обеспечения эффекта виброперемещения. Исследована возможность вибрационного движителя как транспортирующего

средства. Описана общая методика исследования динамики вибрационного уплотнителя-планировщика и приведён алгоритм расчёта, на основе которого создана компьютерная программа для определения оптимальных параметров его конструкции. Здесь же предлагается к рассмотрению конструкция двухвальцового уплотнителя-планировщика и математически описывается процесс его виброперемещения.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям коэффициента трения между грунтом и рабочей поверхностью вибрационного уплотнителя и динамике виброперемещения комбинированного поверхностного уплотнителя.

В четвёртой главе приводится технико-экономическое обоснование внедрения конструкции комбинированного поверхностного уплотнителя на примере создания предприятия ООО «Инноплейт».

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Методика исследования динамики малогабаритных поверхностных вибрационных уплотнителей, в том числе комбинированных, с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия.

На рисунке 1 представлен малогабаритный поверхностный вибрационный уплотнитель со смещённым вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия и схема сил, действующих на него.

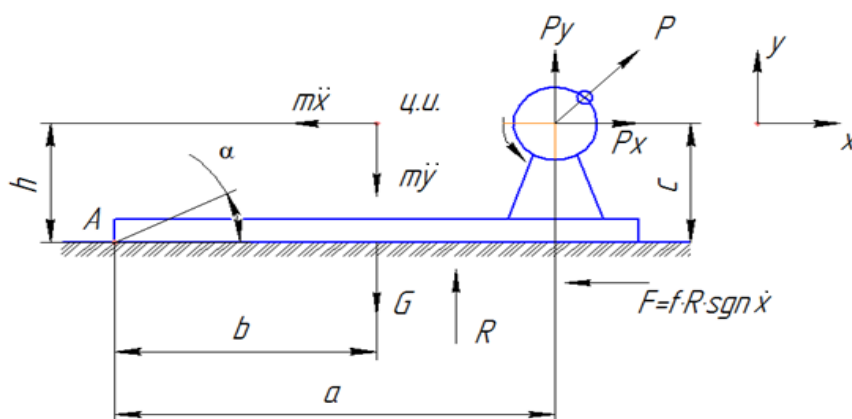


Рисунок 1 – Вибрационный уплотнитель со смещённым вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия и схема сил, действующих на него

Здесь: G – вес уплотнителя; m – масса уплотнителя; a , b , c , h , – геометрические параметры конструкции; P – возмущающая сила вибровозбудителя; F – сила трения со знаком скорости; f – коэффициент трения; R – реакция грунта; α – угол отклонения уплотнителя относительно кромки A опорной плиты.

Для рассмотрения динамики вибрационного перемещения уплотнителя были записаны уравнения равновесия сил, действующих на плиту:

$$\begin{cases} \frac{G}{g} \ddot{x} = P_x - Rf \cdot \text{sgn} \dot{x} & (1) \\ \frac{G}{g} \ddot{y} = P_y - G + R & (2) \end{cases}$$

$$Y_a \ddot{\alpha} = P_y a - P_x c - Gb - \frac{G}{g} \ddot{y} b + \frac{G}{g} \ddot{x} h. \quad (3)$$

После преобразования получаем выражение для R :

$$R = \frac{P_y(a - 2b) - P_x(h - c) + Gb}{2b + fh \text{sgn} \dot{x}}. \quad (4)$$

В данном исследовании добиваемся того, чтобы отрыва кромки в точке A не происходило, благодаря чему уплотнитель будет удерживаться от сползания на поперечных уклонах.

Условие, при котором отрыва поверхности виброуплотнителя от поверхности грунта происходить не будет – следующее:

$$P_x(h - c) + Gb > 0. \quad (5)$$

Это доказывает, что перемещение уплотнителей с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия, возможно лишь при соответствующем его расположении относительно центра инерции колеблющейся системы:

$$P_x^{\max} < \frac{G \cdot b}{c - h}. \quad (6)$$

На рисунке 2 рассмотрим конструкцию малогабаритного комбинированного поверхностного виброуплотнителя, выполненную в виде шарнирно соединённых плиты и вальца. Особенностью данной конструкции является то, что под вальцем, работающим в режиме вибрирования, благодаря высоким контактным давлениям достигаются высокие степени уплотнения, а рабочая плита, работающая в режиме вибротрамбования, обеспечивает глубину уплотнения.

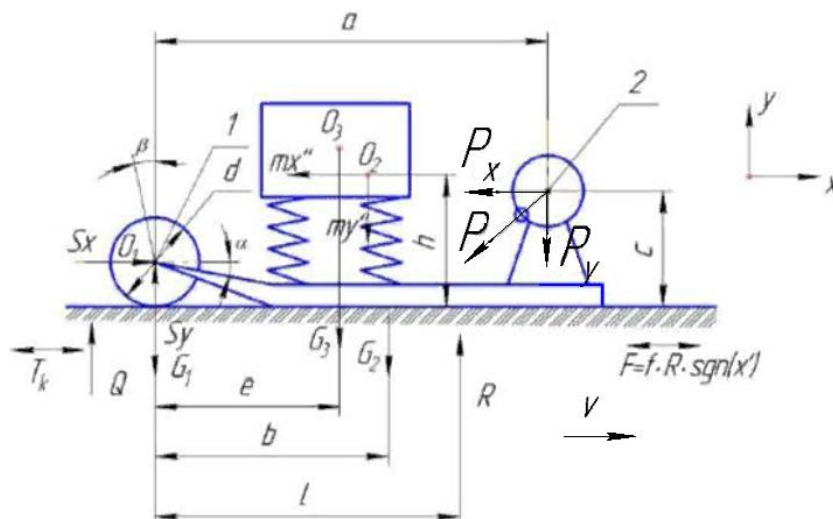


Рисунок 2 – Комбинированный поверхностный виброуплотнитель со смещённым вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия и схема сил, действующих на него

Здесь: $G1$ – вес вальца; $G2$ – вес рамы с вибровозбудителем; $G3$ – вес двигателя; m – масса комбинированного поверхностного виброуплотнителя; a, b, c, d, e, h, l – геометрические параметры конструкции; F – сила трения со знаком скорости; f – коэффициент трения скольжения; P – возмущающая сила вибровозбудителя; R – реакция грунта; $O1$ – центр вальца; $O2$ – центр инерции рамы с вибровозбудителем; $O3$ – центр двигателя; Sx и Sy – реакции в точке крепления рамы к оси вальца; Q – реакция под вальцем со стороны опорной поверхности; Tk – сила сопротивления перекачиванию катка; α – угол отклонения рамы уплотнителя относительно оси вальца; β – угол поворота вальца; μ – коэффициент сопротивления качению.

Для рассмотрения динамики вибрационного перемещения комбинированного виброуплотнителя были записаны уравнения равновесия сил, действующих на валец:

$$\begin{cases} \frac{G_1}{g} \ddot{x} = S_x - Q\mu \cdot \text{sgn}\dot{x} & (7) \\ \frac{G_1}{g} \ddot{y}_1 = S_y + Q - G_1 & (8) \\ Y_a \ddot{\beta} = Q\mu \cdot \text{sgn}\dot{x} \cdot \frac{d}{2}. & (9) \end{cases}$$

И на уплотняющую часть комбинированного виброуплотнителя:

$$\begin{cases} \frac{G_2}{g} \ddot{x} = \pm P_x - S_x - Rf \cdot \text{sgn}\dot{x} & (10) \\ \frac{G_2}{g} \ddot{y}_2 = -P_y + R - S_y - G_2 - G_3 & (11) \\ Y_0 \ddot{\alpha} = -P_y a \pm P_x \left(c - \frac{d}{2} \right) + Rl - Rf \cdot \text{sgn}\dot{x} \cdot \frac{d}{2} + \\ + \frac{G_2}{g} \ddot{x} \left(h - \frac{d}{2} \right) - \frac{G_2}{g} \ddot{y}_2 b - G_2 b - G_3 e. & (12) \end{cases}$$

После ряда преобразований и принятия определённых конструкторских решений, получаем выражение для Q :

$$Q = \pm P_x \frac{\left(c - \frac{d}{2} \right)}{2b} + G_1 + \frac{G_2}{2} + G_3 \left(1 - \frac{e}{2b} \right). \quad (13)$$

Условие, при котором Q всегда больше 0, т.е. валец всегда находится в контакте с уплотняемой поверхностью, принимает вид:

$$\pm P_x^{\max} \geq \frac{G_3(e - 2b) - \left(G_1 + \frac{G_2}{2} \right) 2b}{c - \frac{d}{2}}. \quad (14)$$

При рассмотрении движения по наиболее труднопроходимой поверхности – песку (коэффициент сопротивления качению $\mu = 0,1 \div 0,3$ [2], значение сопротивления движению оказывается на порядок меньше возмущающей силы:

$$T = Q\mu = \left(\pm P_x \frac{\left(c - \frac{d}{2} \right)}{2b} + G_1 + \frac{G_2}{2} + G_3 \left(1 - \frac{e}{2b} \right) \right) \mu. \quad (15)$$

Введём следующие постоянные:

$$m = G_1 + \frac{G_2}{2} + G_3 \left(1 - \frac{e}{2b} \right),$$

$$n = \frac{\left(c - \frac{d}{2} \right)}{2b}.$$

Примем вращение дебаланса против часовой стрелке. Тогда выражение (15) принимает следующий вид:

$$T = (-P_x n + m) \mu. \quad (16)$$

Найдем скорость движения виброплиты. Выразим из выражения (7) горизонтальную реакцию в точке крепления рамы к оси вальца:

$$S_x = \frac{G_1}{g} \ddot{x} + Q\mu \cdot \text{sgn} \dot{x}, \quad (17)$$

Подставим выражение (17) в выражение (10) и найдем ускорение плиты:

$$\ddot{x} = \frac{(-P_x - Q\mu \cdot \text{sgn} \dot{x} - Rf \cdot \text{sgn} \dot{x}) g}{G_1 + G_2}. \quad (18)$$

Проинтегрировав выражение (18), определим выражение скорости движения виброплиты:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\int \frac{Pg \sin(\omega t)}{G_1 + G_2} dt - \int \frac{Q\mu g \cdot \text{sgn} \dot{x}}{G_1 + G_2} dt - \int \frac{Rfg \cdot \text{sgn} \dot{x}}{G_1 + G_2} dt + C_1 = \\ &= -\frac{Pg \cos(\omega t)}{\omega(G_1 + G_2)} - \frac{Q\mu g \cdot \text{sgn} \dot{x}}{G_1 + G_2} t - \frac{Q\mu g \cdot \text{sgn} \dot{x}}{G_1 + G_2} t + C_1. \end{aligned} \quad (19)$$

На рисунке 3 рассмотрим, как изменяется сопротивление качению в зависимости от возмущающей силы вибровозбудителя:

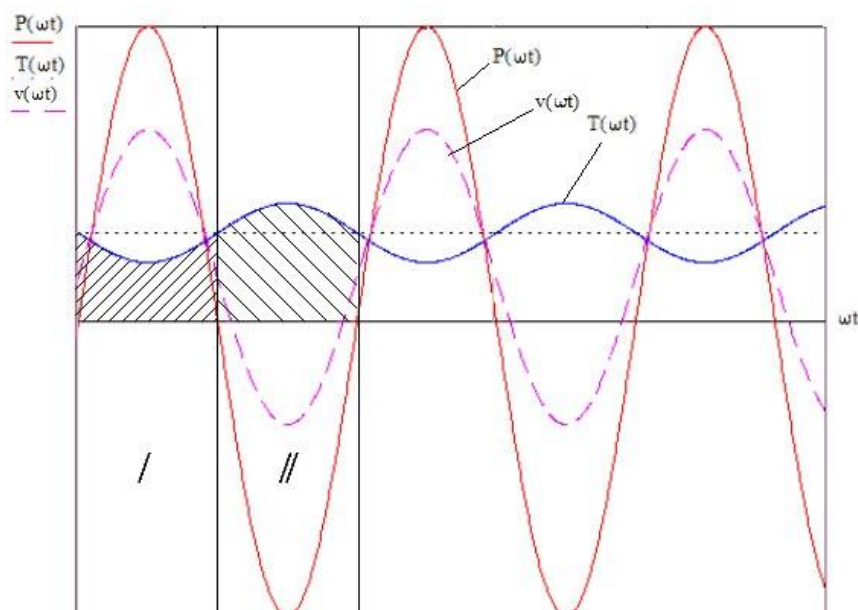


Рисунок 3 – График зависимости сопротивления качению от возмущающей силы вибровозбудителя

В первом полупериоде колебаний имеем максимальное значение горизонтальной составляющей возмущающей силы. При этом, исходя из выражения 16, сопротивление качению принимает минимальное значение в этот момент. Во втором полупериоде колебаний возмущающая сила принимает своё минимальное значение и сопротивление движению T будет больше по сравнению с первым полупериодом. Следовательно, виброуплотнитель будет совершать поступательное движение вперед больше в первом полупериоде колебаний, чем во втором из-за разницы в сопротивлении движению в первом и во втором полупериодах. Тем самым и объясняется возможность самостоятельного вибрационного перемещения виброплиты с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия при его определенном расположении относительно центра виброуплотнителя.

Если конструкцию уплотнителя-планировщика спроектировать так, что расстояние от оси вальца до оси вибровозбудителя будет в 2 раза больше, чем до центра инерции системы отвал-вибровозбудитель-груз-рама, и центр тяжести вибрирующей части будет находиться на высоте оси вальца, то будет наблюдаться эффект виброперемещения.

Скорость виброперемещения плиты, в свою очередь, напрямую зависит от сопротивления движению – чем меньше заштрихованная область на участке I и больше область на участке II (рисунок 3), тем быстрее будет передвигаться

плита. Коэффициент « $\frac{c-d}{2b}$ » при P_x в выражении (15) отвечает за величину максимальных и минимальных значений сопротивления движения.

2. Алгоритм компьютерной программы для компоновки конструкции комбинированного поверхностного виброуплотнителя.

Решая задачу расположения узлов конструкции комбинированного поверхностного виброуплотнителя, следовало постоянно перемещать эти узлы

относительно друг друга и центра инерции, сохраняя при этом эффект виброперемещения.

Для того, чтобы уйти от этого постоянного перемещения узлов конструкции предлагается применять специальный груз, установленный на уплотнителе в определенной точке, координаты которой зависят от массы этого же груза.

В работе предлагается один из возможных вариантов алгоритма решения этой задачи.

Для получения значений неизвестных параметров была написана программа «Расчет КПВУ» в среде C++ с использованием .NET Framework и концепции Windows Forms. В основу разработки ПО положен объектно–ориентированный подход, принцип которого в виде алгоритма представлен на рисунке 4.

Данная программа имеет свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018610822 – «Расчёт комбинированного поверхностного вибрационного уплотнителя».

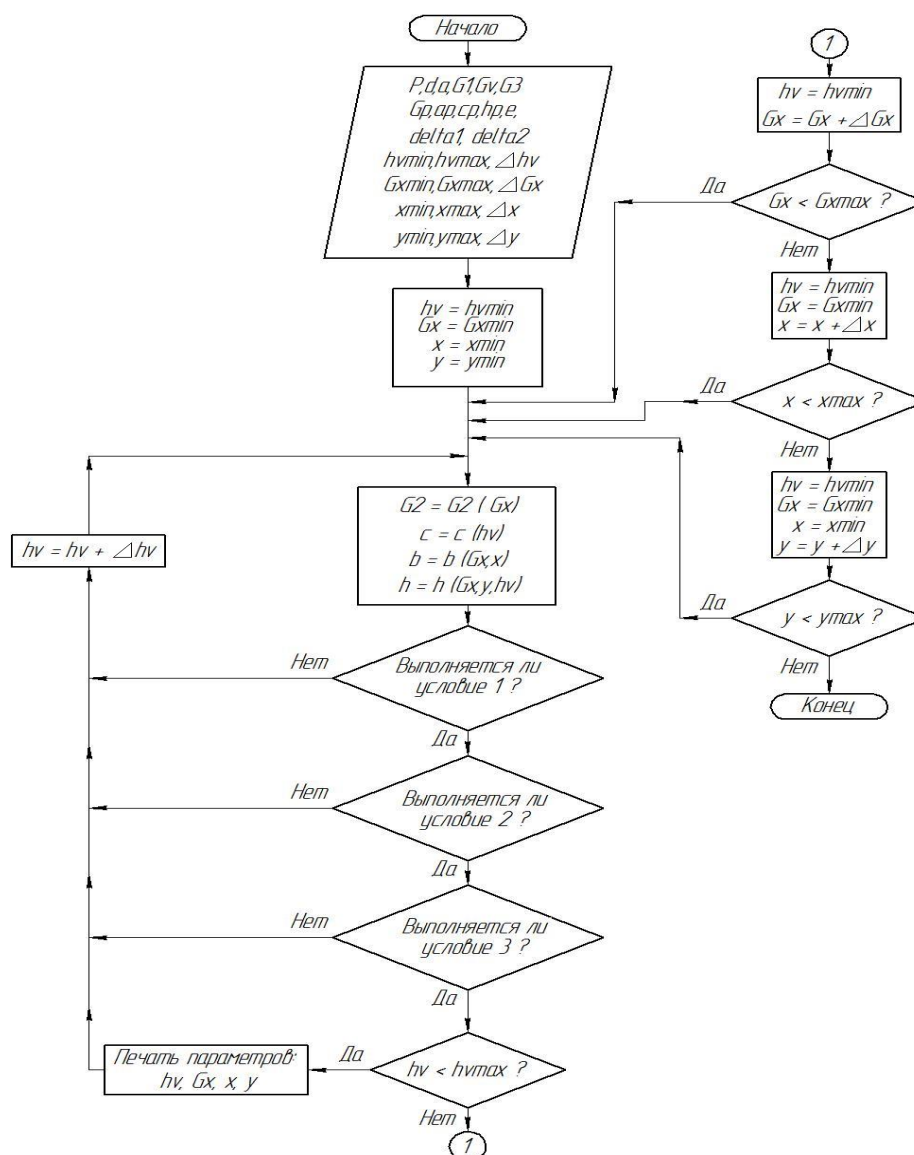


Рисунок 4 – Алгоритм программы «Расчет КПВУ»

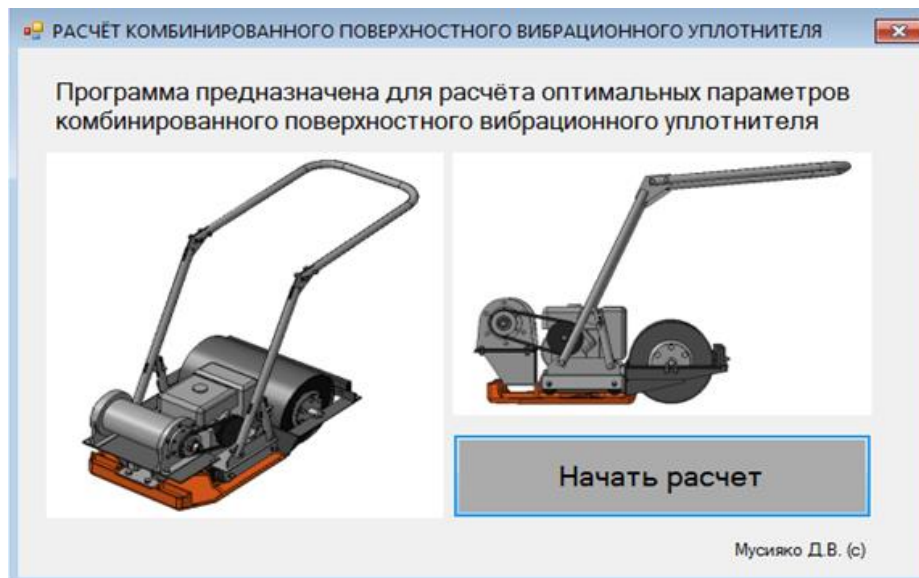


Рисунок 5 – Форма входа программы «Расчёт КПВУ»

3. Математическое описание динамики вибрационного уплотнителя-планировщика с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия.

Полученные результаты теоретических исследований и их успешные практические проверки дали нам возможность выдвинуть идею создания вибрационного самоходного механизма, в котором объединяется возможность совместить процессы равномерного распределения и уплотнения применяемого материала вальцем. Ввиду того, что передвижение конструкции, представленной на рисунке 6, осуществляется за счёт вибрационного воздействия и отвал находится в непосредственном контакте с распределяемой смесью, данная смесь под влиянием механических воздействий претерпевает тикспотропные превращения и, следовательно, становится более податливой для дальнейших операций над ней.

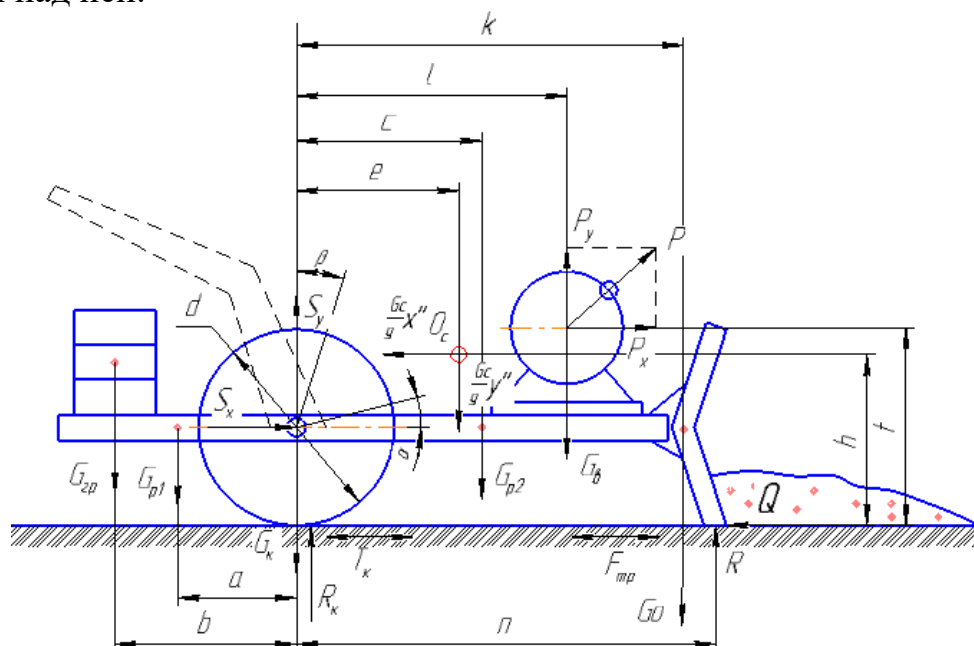


Рисунок 6 – Схема сил, действующих на вибрационный уплотнитель-планировщик

Здесь: G_{gp} – вес дополнительного груза; G_{p1}, G_{p2} – вес левой и правой части рамы соответственно; G_g – вес вальца; G_o – вес отвала; $G_{виб}$ – вес вибровозбудителя; G_c – вес системы; T_g – сила сопротивления качению вальца; R_g – реакция под вальцом со стороны опорной поверхности; S_x, S_y – реакции в точке крепления оси вальца к раме; F_{mp} – сила трения; α – угол отклонения рамы относительно оси вальца; β – угол поворота вальца; f – коэффициент трения скольжения; P – возмущающая сила вибровозбудителя; R – реакция под отвалом со стороны опорной поверхности; Q – реакция со стороны перемещаемого объекта; O_l – центр вальца; O_c – центр инерции системы отвал-вибровозбудитель-груз-рама; $a, b, c, d, e, h, k, l, n, t$ – геометрические размеры.

Для рассмотрения динамики вибрационного перемещения уплотнителя-планировщика были записаны уравнения равновесия сил, действующих на валец:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_g}{g} \ddot{x} = S_x - R_g \mu \cdot \text{sgn} \dot{x} \\ \frac{G_g}{g} \ddot{y}_1 = S_y + R_g - G_g \\ J_\kappa \ddot{\beta} = R_g \mu \cdot \text{sgn} \dot{x} \cdot \frac{d}{2} \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{G_g}{g} \ddot{y}_1 = S_y + R_g - G_g \\ J_\kappa \ddot{\beta} = R_g \mu \cdot \text{sgn} \dot{x} \cdot \frac{d}{2} \end{array} \right\} \quad (21)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{G_g}{g} \ddot{y}_1 = S_y + R_g - G_g \\ J_\kappa \ddot{\beta} = R_g \mu \cdot \text{sgn} \dot{x} \cdot \frac{d}{2} \end{array} \right\} \quad (22)$$

Напишем уравнения равновесия сил, действующих на систему отвал-вибровозбудитель-груз-рама, соблюдая указанные на рисунке 6 направления сил:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_c}{g} \ddot{x} = P_x - S_x - Rf \cdot \text{sgn} \dot{x} - Q \\ \frac{G_c}{g} \ddot{y}_2 = P_y + R - S_y - G_c \end{array} \right. \quad (23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_c}{g} \ddot{y}_2 = P_y + R - S_y - G_c \\ J_c \ddot{\alpha} = P_y l - P_x \left(t - \frac{d}{2} \right) - G_{виб} l - G_o k + Rn - Q \frac{d}{2} - Rf \cdot \text{sgn} \dot{x} \cdot \frac{d}{2} + \frac{G_c}{g} \ddot{x} \left(h - \frac{d}{2} \right) - \frac{G_c}{g} \ddot{y}_2 e - G_{p2} c + G_{gp} b + G_{p1} a \end{array} \right. \quad (24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_c}{g} \ddot{y}_2 = P_y + R - S_y - G_c \\ J_c \ddot{\alpha} = P_y l - P_x \left(t - \frac{d}{2} \right) - G_{виб} l - G_o k + Rn - Q \frac{d}{2} - Rf \cdot \text{sgn} \dot{x} \cdot \frac{d}{2} + \frac{G_c}{g} \ddot{x} \left(h - \frac{d}{2} \right) - \frac{G_c}{g} \ddot{y}_2 e - G_{p2} c + G_{gp} b + G_{p1} a \end{array} \right. \quad (25)$$

После ряда преобразований и принятия определённых конструкторских решений, получаем выражение для реакции под вальцем:

$$R_g = \frac{-P_x \left(t - \frac{d}{2} \right)}{2e} + G_c + \frac{1}{2e} (G_{gp} b - G_o k + G_{p1} a - G_{p2} c) - Q \frac{d}{4e}. \quad (26)$$

Рассмотрим на графике на рисунке 7, как изменяется реакция вальца в свободном режиме работы.

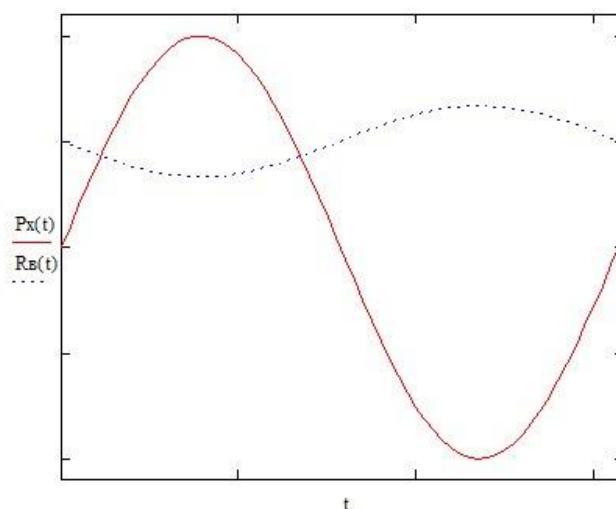


Рисунок 7 – График зависимости горизонтальной составляющей возмущающей силы и реакции под валцем

На графике в первом полупериоде колебаний возмущающей силы наблюдаются меньшие значения реакции под валцем в сравнении со значениями во втором полупериоде, т.е. сила сопротивления перемещению в первом полупериоде меньше чем во втором. Таким образом и обеспечивается эффект виброперемещения.

4. Алгоритм компьютерной программы для компоновки конструкции вибрационного уплотнителя-планировщика.

По аналогии с алгоритмом программы «Расчёт КПВУ», решая задачу расположения узлов конструкции вибрационного уплотнителя-планировщика, следовало постоянно перемещать эти узлы относительно друг друга и центра инерции, сохраняя при этом эффект виброперемещения.

Для того, чтобы уйти от этого постоянного перемещения узлов конструкции предлагается применять специальный груз, установленный на уплотнителе в определенной точке, координаты которой зависят от массы этого же груза.

Принцип работы алгоритма заключается в переборе основных геометрических параметров, результатом которого являются их оптимальные значения с точки зрения обеспечения условий виброперемещения и максимально преодолимых нагрузок.

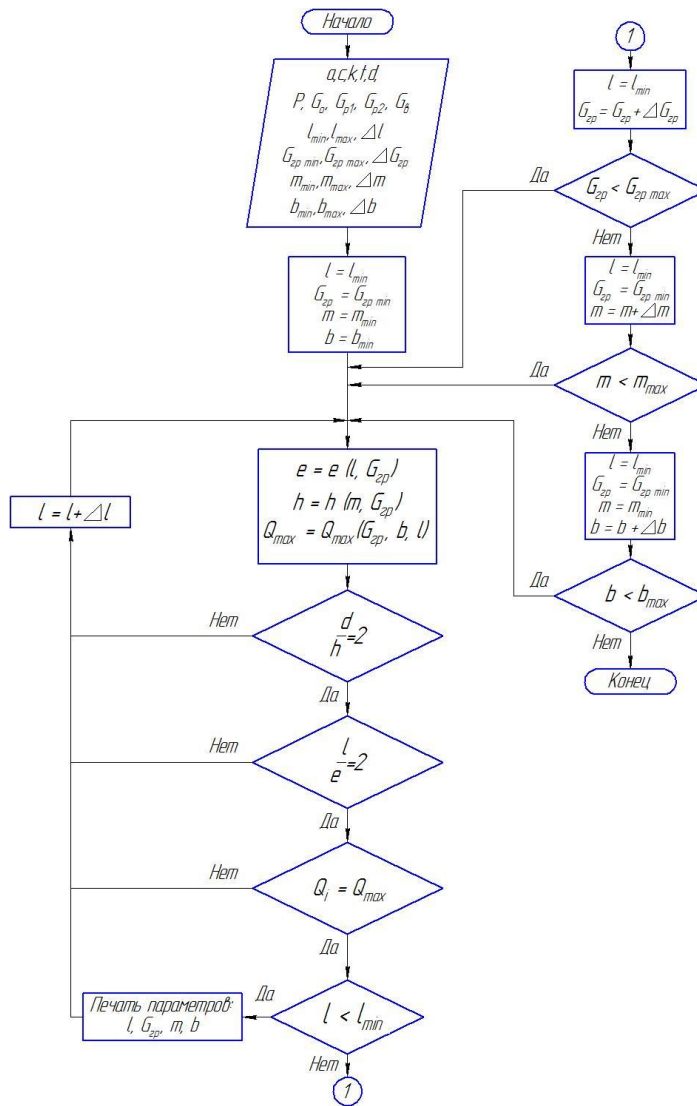


Рисунок 8 – Алгоритм подбора оптимальных значений m , b , l , G_{zp}

Для получения значений неизвестных параметров на основе представленного алгоритма была написана программа «Расчет ВУП» в среде C++.

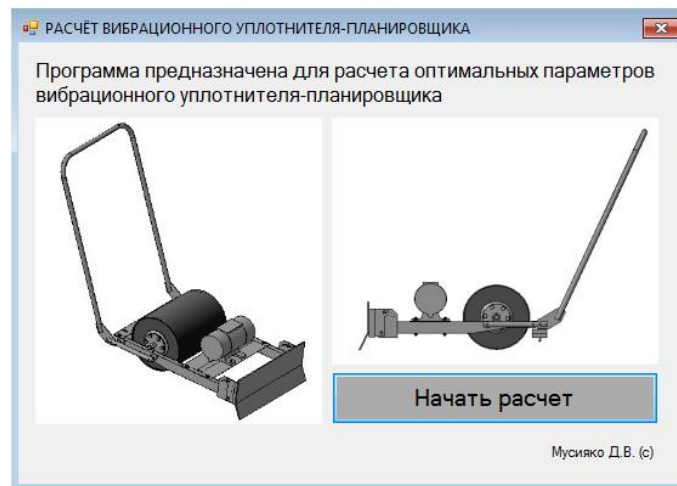


Рисунок 9 – Форма входа программы «Расчет ВУП»

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018610672 – «Расчёт вибрационного уплотнителя-планировщика».

5. Математическое описание процесса виброперемещения двухвального уплотнителя-планировщика с двумя вибровозбудителями колебаний ненаправленного действия.

В качестве конструкционного варианта предлагается рассмотреть уплотнитель-планировщик с двумя симметрично расположенными электрическими вибровозбудителями колебаний ненаправленного действия, схема сил, действующих на который, представлена на рисунке 10.

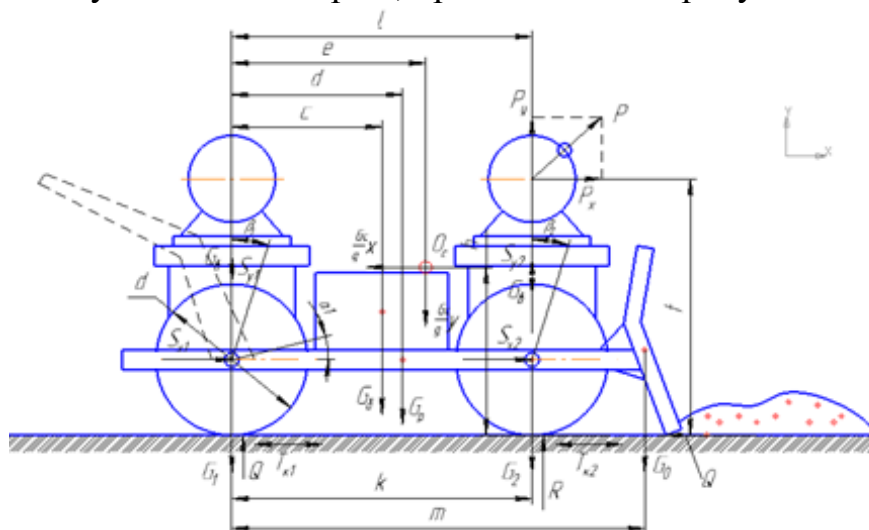


Рисунок 10 – Схема сил, действующих на вибрационный уплотнитель-планировщик

Здесь: G_p – вес рамы; G_1, G_2 – вес заднего и переднего вальца соответственно; G_b – вес бака для воды; G_e – вес вибровозбудителя; T_{K1}, T_{K2} – силы сопротивления качению заднего и переднего вальца соответственно; μ – коэффициент сопротивления качению; R_1 – реакция под задним валцом со стороны опорной поверхности; R_2 – реакция под передним валцом со стороны опорной поверхности; $S_{x1}, S_{x2}, S_{y1}, S_{y2}$ – реакции в точках крепления рамы к оси колеса; P – возмущающая сила вибровозбудителя; α_1 – угол отклонения рамы относительно оси вальца; β_1 – угол поворота вальца; O_c – центр инерции системы; G_c – вес системы без бака с водой; G_{c+b} – вес системы, включая бак с водой; Q – реакция со стороны перемещаемого объекта; $a, b, c, d, e, h, k, l, t$ – геометрические размеры.

Рассматривается режим работы вибрационного уплотнителя, когда задний валец находится в постоянном контакте с поверхностью, по которой он передвигается. Передний валец работает в режиме вибрационного трамбования, совершая мгновенный удар по уплотняемой поверхности. Далее будут найдены условия существования такого режима и поперечные усилия, которые могут быть преодолены установкой.

Рассматривается работа с одним вибровозбудителем при движении вперед и с другим при движении назад, с изменением вращения эксцентрик в обратном направлении.

Напишем уравнения равновесия сил для заднего вальца, принимая, что вращение дебаланса происходит против часовой стрелки.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_1}{g} \ddot{x} = S_{x1} - R_1 \cdot \mu \cdot \text{sgn} \dot{x} \\ \frac{G_1}{g} \ddot{y}_1 = S_{y1} + R_1 - G_1 \end{array} \right. \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_1}{g} \ddot{y}_1 = S_{y1} + R_1 - G_1 \\ J_e \ddot{\beta} = R_1 \cdot \mu \cdot \frac{d}{2} \text{sgn} \dot{x}. \end{array} \right. \quad (28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_1}{g} \ddot{x} = S_{x1} - R_1 \cdot \mu \cdot \text{sgn} \dot{x} \\ \frac{G_1}{g} \ddot{y}_1 = S_{y1} + R_1 - G_1 \\ J_e \ddot{\beta} = R_1 \cdot \mu \cdot \frac{d}{2} \text{sgn} \dot{x}. \end{array} \right. \quad (29)$$

Напишем уравнения равновесия сил, действующих на систему: два вибровозбудителя, передний валец, рама, отвал, бак с водой.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_c}{g} \ddot{x} = P_x - S_{x1} - Q \\ \frac{G_c}{g} \ddot{y}_2 = -S_{y1} + P_y - G_c \end{array} \right. \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{G_c}{g} \ddot{y}_2 = -S_{y1} + P_y - G_c \\ J_c \ddot{\alpha} = P_y l + P_x \left(t - \frac{d}{2} \right) - G_e l - Q \frac{d}{2} - G_2 k + \\ + \frac{G_c}{g} \ddot{x} \left(h - \frac{d}{2} \right) - \frac{G_c}{g} \ddot{y}_2 e - G_p d - G_o c. \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_c \ddot{\alpha} = P_y l + P_x \left(t - \frac{d}{2} \right) - G_e l - Q \frac{d}{2} - G_2 k + \\ + \frac{G_c}{g} \ddot{x} \left(h - \frac{d}{2} \right) - \frac{G_c}{g} \ddot{y}_2 e - G_p d - G_o c. \end{array} \right. \quad (32)$$

После выполнения ряда преобразований и принятия определённых конструкторских решений, получаем выражение для R_1 :

$$R_1 = \frac{P_x \left[t - \frac{d}{2} + G_{omu} \left(h - \frac{d}{2} \right) \right] + G_1 l + G_e l + Q \frac{d}{2} + G_o (l - c) + G_p (l - d)}{\left[l + \mu \cdot G_{omu} \left(h - \frac{d}{2} \right) \cdot \text{sgn} \dot{x} \right]}. \quad (33)$$

Допустим, что перед отвалом нет преград (поперечная нагрузка $Q=0$). Тогда условия, при котором R_1 всегда больше 0, т.е. валец всегда в контакте с уплотняемой поверхностью следующее:

$$P < \frac{(G_1 + G_e + G_o + G_p) l - G_o c - G_p d}{t - \frac{d}{2} + G_{omu} \left(h - \frac{d}{2} \right)}. \quad (34)$$

6. Результаты экспериментальных исследований коэффициента поверхностного трения между поверхностью грунта и рабочей поверхностью уплотняющей машины во время её работы.

Задача эксперимента – проверить корректность выводов, полученных в результате теоретических и практических исследований поверхностного коэффициента трения.

Для проведения опытов использовался вибровозбудитель колебаний направленного действия, привод которого осуществлялся от двигателя постоянного тока, что позволяло регулировать его рабочую частоту. Усилие, возникающее в тросике лебёдки, записывалось с помощью специального тензодатчика. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 11.

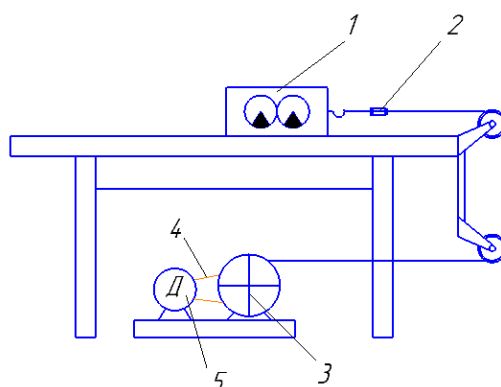


Рисунок 11 – Схема экспериментальной установки для проверки натяжения троса при включенном/выключенном вибровозбудителе:
 1 – вибровозбудитель колебаний направленного действия, 2 – тензодатчик, 3 – тяговая лебёдка, 4 – цепь, 5 – двигатель

Эксперимент заключался в том, что после включения двигателя и выхода вибромашины на соответствующий режим работы, производилась запись сигналов с тензодатчика, фиксирующего величину сдвигающего усилия. Перед каждой серией опытов по этой методике производился замер сдвигающего усилия при отсутствии вибрации и определялся соответствующий коэффициент трения.

Проделанная работа позволила сделать вывод, что коэффициент поверхностного трения между поверхностью грунта и рабочей поверхностью виброуплотнителя во время его работы изменяется незначительно.

7. Результаты экспериментальной проверка выводов о возможности создания конструкции малогабаритного поверхностного комбинированного уплотнителя, выполненной в виде шарнирно соединённых плиты и вальца.

Задача эксперимента – проверить выводы, полученные в результате теоретических исследований динамики поверхностных вибрационных уплотнителей и эффективность предложенного нового конструкционного варианта, объединяющего преимущества вибрационных катка и плиты.

В качестве эксперимента использован уплотнитель, представленный на рисунке 12.



Рисунок 12 – Комбинированный поверхностный вибрационный уплотнитель, управляемый оператором

При производственном испытании опытного образца комбинированного поверхностного уплотнителя исследовалась только его способность самостоятельного передвижения, поэтому эксперимент проводился на песчаном, предварительно уплотнённом грунте. В процессе эксперимента изменялась частота вращения вибровозбудителя регулированием числа оборотов двигателя.

Результаты полевых испытаний опытного виброуплотнителя представлены в таблице 1, где приняты следующие обозначения:

n – число оборотов вала вибровозбудителя, об/мин;

P – расчётная возмущающая сила вибровозбудителя, кг;

P/G – отношение возмущающей силы вибровозбудителя к общему весу уплотнителя;

A_1 – амплитуда колебаний уплотнителя над осью вибровозбудителя, мм;

A_2 – амплитуда вертикальных колебаний вальца, мм;

V – средняя скорость передвижения виброуплотнителя.

Таблица 1 – Результаты полевых испытаний опытного виброуплотнителя.

n , об/мин	P , кг	P/G	A_1 , мм	A_2 , мм	V , м/мин
1500	370.1	2.47	2.1	0.9	10.2
2000	657.9	4.39	2.7	0.9	14.1
2500	1028.1	6.85	3.5	0.8	18.2
3000	1480.4	9.87	3.6	0.7	22.1

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Получены аналитические зависимости, позволяющие определять оптимальное положение вибровозбудителя колебаний ненаправленного действия относительно центра инерции масс вибрационного уплотнителя, при котором обеспечивается эффект его самостоятельного передвижения.

2. Экспериментальные исследования, направленные на изучение коэффициента поверхностного трения между поверхностью грунта и рабочей поверхностью виброуплотнителя во время его работы показали, что коэффициент трения при вибрации практически не изменяется.

3. Научно доказана и экспериментально подтверждена возможность создания поверхностного вибрационного уплотнителя, в конструкции которого применяются и валец и плита, что даёт возможность одновременного использования преимуществ каждого из них.

4. Исследованы возможности вибрационного движителя с вибровозбудителем колебаний ненаправленного действия для перемещения перед собой сыпучих материалов, что открывает ещё одно направление совершенствования малых средств механизации в дорожном строительстве.

5. Создана методика расчёта расположения центра масс вибрационного уплотнителя с помощью дополнительного груза, определения его массы и

месторасположения, при которых имеет место эффект вибрационного перемещения.

6. Разработаны алгоритмы и написаны компьютерные программы на их основе для создания и совершенствования малых средств механизации.

7. Исследованы возможности двухвальцового самоходного вибрационного уплотнителя-планировщика с двумя вибровозбудителями колебаний ненаправленного действия для одновременного уплотнения и перемещения перед собой сыпучих материалов, а также найдено условие, при котором обеспечивается эффект его самостоятельного передвижения по уплотняемой поверхности.

8. Произведено технико-экономическое обоснование внедрения конструкции комбинированного поверхностного уплотнителя на примере создания предприятия по его производству. Срок окупаемости проекта составляет 3 года 2 месяца с учетом дисконтирования, что говорит о том, что такой проект является экономически эффективным.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, перечень которых размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. **Мусяйко Д.В.** Самоходный вибропланировщик / Д.В. Мусяйко, Р.А. Хабибуллин // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – №4 (57). – С. 157 – 161.

2. **Мусяйко Д.В.** Самоходная вибрационная плита с вальцем / Д.В. Мусяйко, Р.А. Расулов // Вестник тихоокеанского государственного университета. – 2016. – №4 (43). – С. 73 – 80.

3. **Мусяйко Д.В.** Обеспечение устойчивости вибрационных уплотнителей / Д.В. Мусяйко, Е.В. Куракина // Вестник гражданских инженеров. – 2017, – №6 (65). – С. 245 – 249.

4. **Мусяйко Д.В.** Обоснование параметров процесса виброперемещения виброуплотнителя с круговыми колебаниями вибратора ненаправленного действия / Д.В. Мусяйко // Вестник гражданских инженеров. – 2018, – №4 (69). – С. 156 – 161.

5. Патент РФ № 175704. Вибропланировщик. Заявка № 2017121383 от 19.06.2017. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 15.12.2017. Опубликовано 15.01.2018, № 35.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчёт вибрационного уплотнителя-планировщика» №2018610672 от 15.01.2018.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчёт комбинированного поверхностного вибрационного уплотнителя» №2018610822 от 18.01.2018.

Статьи в других изданиях:

8. **Мусияко Д.В.** Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя / А.Я. Башкарев, Д.В. Мусияко, В.С. Пешков // Научно–технические ведомости Санкт–петербургского государственного политехнического университета. СПбГПУ. – 2013. – №1 (166). – С. 175 – 178.

9. **Мусияко Д.В.** Теория передвижения комбинированного поверхностного уплотнителя / А.Я. Башкарев, Д.В. Мусияко, В.С. Пешков // Материалы 3–й Международной научно–практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». 20–21 июня 2013. СПбГПУ. – 2013. – С. 916 – 922.

10. **Мусияко Д.В.** Компоновка самоходных вибрационных уплотнителей / А.Я. Башкарев, Д.В. Мусияко, Р.А. Расулов // Научно–технические ведомости Санкт–петербургского государственного политехнического университета. СПбГПУ. – 2015. – №4 (231). – С. 163 – 169.

11. **Мусияко Д.В.** Вибрационный уплотнитель–планировщик / А.Я. Башкарев, Д.В. Мусияко, В.С. Пешков, Р.А. Хабибуллин // Современное машиностроение. Наука и образование. СПбПУ. – 2016. – №5. – С. 857 – 865.