

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

УДК 631.372

На правах рукописи



КОЛЯДИН Павел Александрович

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГОСРЕДСТВ ПУТЕМ  
ПРИМЕНЕНИЯ ШИН СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса

**ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Прядкин Владимир Ильич

Санкт-Петербург 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	13
1.1 Анализ конструктивных схем, особенностей эксплуатации и обоснование параметров мобильных средств сельскохозяйственного назначения .....	13
1.2 Свойства виброзащитных систем и анализ конструкций адаптивных подвесок, применяемых в мобильных средствах .....	21
1.3 Методы теоретических исследований плавности хода и анализ математических моделей мобильных энергетических средств.....	31
1.4 Воздействие на растения ходовых аппаратов мобильных средств сельскохозяйственного назначения.....	35
1.5 Выводы по главе 1.....	37
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА НА ШИНАХ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ .....	39
2.1 Разработка математической модели мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем .....	39
2.1.1 Общие положения модели .....	39
2.1.2 Моделирование прямолинейного движения мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем .....	44
2.1.3 Результаты моделирования прямолинейного движения мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем .....	51
2.1.4 Разработка математической модели разворота мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем .....	55
2.1.5 Результаты моделирования разворота мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем .....	57
2.2 Разработка модели взаимодействия шины сверхнизкого давления мобильного с культурными растениями.....	62
2.3 Выводы по главе 2.....	70
ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОБИЛЬНОГО СРЕДСТВА НА ШИНАХ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ .....	72
3.1 Цели, задачи и объекты экспериментальных исследований .....	72
3.2 Методика проведения лабораторных испытаний .....	74
3.3 Методика проведения лабораторно-полевых и полевых испытаний МЭС-600..	80

3.4 Методика проведения полевых и испытаний МЭС-600 .....	88
3.5 Выводы по главе 3.....	92
<b>ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МОБИЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА НА ШИНАХ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ .....</b>	<b>93</b>
4.1 Лабораторные испытания.....	93
4.1.1 Результаты определения нагрузочной характеристики шины.....	93
4.1.2 Определение характеристик упругих элементов подвески.....	95
4.1.3 Результаты определения координат центра масс при переменной массе..	98
4.2 Лабораторно-полевые испытания мобильного средства .....	100
4.2.1 Исследование виброзащитных свойств мобильного средства на сиденье оператора при проезде через единичную неровность.....	100
4.2.2 Исследование вибронагруженности на краях штанг установленного опрыскивателя.....	105
4.2.3 Оптимизация параметров динамической системы МЭС.....	110
4.3 Полевые испытания виброзащитных свойств мобильного средства .....	115
4.4 Экспериментальные исследования воздействия на растения шин сверхнизкого давления .....	122
4.5 Расхождение полученных теоретических и экспериментальных значений ...	124
4.6 Выводы по главе 4.....	132
<b>5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ МЭС НА ШИНАХ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.....</b>	<b>135</b>
5.1 Исходные данные оценки эффективности применения МЭС-600 на шинах сверхнизкого давления .....	135
5.2 Определение экономических показателей на отдельных видах механизированных работ .....	137
5.3 Методы определения показателей ресурсосбережения .....	141
5.4 Методы определения показателей сравнительной экономической эффективности.....	143
5.5 Выводы по главе 5.....	145
<b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....</b>	<b>146</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>149</b>
Приложение А. Результаты проведенных лабораторно-полевых исследований .	166
Приложение Б. Результаты проведенных полевых исследований.....	214

Приложение В. Акты внедрения результатов исследования в практическую деятельность.....	226
Приложение Г. Акт внедрения результатов исследования в учебный процесс ...	229
Приложение Д. Свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ	230
Приложение Е. Свидетельство о проверке анализатора шума и вибрации Ассистент .....	238

## ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных целей «Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года», в рамках реализации Указа Президента Российской Федерации «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» и национальной цели №4 «Достойный, эффективный труд и успешное предпринимательство», являются «Обеспечение продовольственной безопасности» и «Увеличение произведенной добавленной стоимости». Решение поставленных целей возможна путем повышения урожайности сельскохозяйственных культур и вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения, имеющих почвы с низкой несущей способностью с одновременной технической модернизацией используемых технологических средств.

Реализация целей стратегии невозможно без учета роли крестьянско-фермерских хозяйств (КФХ) и малых сельскохозяйственных предприятий, которые в структуре агропромышленного комплекса России на 2024 год занимают более 35% посевных площадей озимых зерновых культур АПК России, на которых выращивают около 57% от массы зерновых культур. Основными энергетическими средствами при выполнении сельскохозяйственных работ в крестьянско-фермерских хозяйствах являются тракторы различных классов и энергонасыщенности, но их применение ограничено по агротехническим требованиям при выполнении технологических операций в ранний весенний период, при котором движение машин по полю в это время становится невозможным.

Решением этой проблемы является реализация современных высокоэффективных технологий в КФХ и малых сельскохозяйственных предприятиях и требует применения мобильных энергетических средств (МЭС), оборудованных различными почвошадящими движителями, обеспечивающих высокую производительность и экономическую эффективность, с жестким соблюдением агротехнического регламента. Однако применение таких

энергосредств малыми сельскохозяйственными организациями со среднегодовой численностью до 60 человек экономически ограничено средней посевной площадью зерновых культур 969,7 га, что требует создания адаптированных МЭС малой грузоподъемности с колесной формулой 4К4, оборудованных шинами сверхнизкого давления, позволяющих повысить их рабочие скорости на 20-30%, снизить энергозатраты на 30% и обеспечить сохранность посевов в ранний весенний период. Тенденция развития современных сельскохозяйственных самоходных машин подразумевает вынос кабины оператора за ось передних колес, улучшающей обзорность и расширяющая размеры адаптивной технологической площадки для монтирования различного технологического оборудования. Однако, исследования по оценке виброзащитных свойств мобильных средств малой грузоподъемности, при компоновочной схеме с колесной формулой 4К4 и кабиной расположенной перед передней осью, не рассмотрены в должной мере и требуют дополнительного изучения.

В соответствии с вышеизложенным, актуальность темы связана с совершенствованием конструктивно-компоновочных параметров виброзащитной системы мобильных энергетических средств малой грузоподъемности с колесной формулой 4К4, что позволит повысить их эксплуатационные свойства, связанные с повышением производительности и урожайности сельскохозяйственных культур, направленных на решение целей «Обеспечения продовольственной безопасности» и «Увеличения произведенной добавленной стоимости» АПК России.

**Степень разработанности.** Наибольший вклад в вопросы, связанные с повышением эффективности применения и мобильных транспортно-технологических средств внесли работы следующих отечественных и зарубежных ученых: Дербаремдикер А.Д., Никитин А.О., Дмитриев А.А., Жилейкин М.М., Савочкин В.А., Силаев А.А., Котиев Г.О., Беляев, А. Н. Наказной О.А., Новиков В.В., Смирнов А.А., Хвингия М.В., Ротенберг Р.В., Меликов И.М., Фридман В.М., Коловский М.З., Левитский Н.И., Пановко Я.Г., Платонов В.Ф., Чудаков Д.А. Горобцов А.С., Дьяков А.В., Дьяков А.С., Косов О.Д., Ляшенко М.В., Савельев Г.С., Русанов, В.А., Барский И.Б. и другие.

Анализ литературных источников показал влияние снижения вертикальных ускорений на повышение эффективности мобильных и транспортно-технологических средств путем повышения рабочих скоростей их движения. Однако недостаточно изучен вопрос исследования колебательных процессов штанговых опрыскивателей.

**Цель работы** – повышение эффективности применения самоходных штанговых опрыскивателей сельскохозяйственного назначения с колесной формулой 4К4 средств за счет применения шин сверхнизкого давления.

**Задачи работы.**

1. Провести анализ параметров и режимов работы двухосных мобильных энергетических средств на шинах сверхнизкого давления для агропредприятий малых форм хозяйствования.

2. Разработать математическую модель мобильного энергетического средства на шинах сверхнизкого давления исследования плавности хода, учитывающая колебания штанг опрыскивателем.

3. Разработать математическую модель воздействия колесного движителя на культурные растения, учитывающую многократный проход, провести сравнительную оценку теоретических и экспериментальных исследований.

4. Провести комплексные экспериментальные исследования плавности хода разработанного мобильного энергетического средства на шинах сверхнизкого давления, оборудованного штанговым опрыскивателем: лабораторные, лабораторно-полевые и полевые.

5. Выполнить экспериментальные исследования вибронагруженности и амплитуды колебаний штанг опрыскивателя мобильного энергетического средства, оборудованного шинами сверхнизкого давления.

6. Определить технико-экономическую эффективность применения режимов работы двухосных мобильных энергетических средств, оборудованных шинами сверхнизкого давления.

**Научная новизна.** Научной новизной обладают:

- математическая модель двухосного мобильного энергетического средства со штанговым опрыскивателем, оборудованного шинами сверхнизкого давления, отличающаяся учетом колебаний штанг опрыскивателя и изменением массы жидкости при движении;

- математическая модель воздействия шин сверхнизкого давления на культурные растения, отличающаяся учетом многократного прохода движителя по опорному основанию;

- закономерности изменения вертикальных ускорений двухосного мобильного энергетического средства, оборудованного штанговым опрыскивателем, учитывающие влияние параметров давления воздуха в шинах, массы жидкости в баке опрыскивателя и колебания штанг;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований воздействия колесного движителя на культурные растения, отличающаяся многократным проходом колесного движителя.

**Объект исследования** – мобильное энергетическое средство МЭС-600 малой грузоподъемности с колесной формулой 4К4, оборудованное шинами сверхнизкого давления.

**Предмет исследования** – закономерности изменения уровня вибрационной нагруженности мобильного энергетического средства, оборудованного шинами сверхнизкого давления в условиях реальной эксплуатации.

**Область исследований.** Работа предполагает изучение принципа работы, динамические процессы нагружения первичных и вторичных систем поддрессоривания современных мобильных энергетических средств на шинах сверхнизкого давления. Планируется обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований по применению шин сверхнизкого давления для улучшения конструкторско-технологических и технико-эксплуатационных параметров согласно государственным нормам и требованиям.

**Методы исследования.** Включают себя анализ конструктивных и технологических параметров мобильных средств сельскохозяйственного назначения; разработка экспериментального образца мобильного средства на шинах сверхнизкого давления; теоретическое исследование вертикальных вибронагрузок, действующих на оператора и штанги опрыскивателя МЭС; исследование упруго-демпфирующих характеристик шин, пружин и демпферов

системы поддресоривания в лабораторных условиях; исследование изменения координат центра масс мобильного средства с переменной массой; исследование виброзащитных свойств мобильного средства в лабораторно-полевых условиях; исследование вертикальных вибронагрузок, действующих на оператора и штанги мобильного средства при проведении эксперимента в полевых условиях; оценка воздействия на культурные растения шин сверхнизкого давления мобильных энергосредств при проведении полевых исследований; оценка экономической эффективности применения двухосного мобильного энергетического средства на шинах сверхнизкого давления.

**Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена лабораторными, лабораторно-полевыми и полевыми испытаниями, производственной проверкой характеристик, а также достаточно высоким схождением теоретических положений и экспериментальных данных.

**Теоретическую и практическую значимость работы составляют:**

- разработанная программа на основе динамической и математической модели мобильного энергетического средства с колесной формулой 4К4, учитывающей колебания штанг опрыскивателя, позволяет на стадии проектирования исследовать и прогнозировать оптимальные параметры виброзащитных систем двухосных самоходных машин, оборудованных штанговым опрыскивателем, учитывая изменяющиеся эксплуатационные свойства;

- разработанная математическая модель и программа оценки воздействия шин сверхнизкого давления на культурные растения позволяет подбирать оптимальные параметры движителя с регламентированным на опорное основание при проектировании и разработке мобильных энергетических средств;

- предложенная методика определения виброзащитных свойств мобильных энергетических средств, оборудованных штанговым опрыскивателем мобильных энергетических средств, оборудованных штанговым опрыскивателем, и полученные экспериментальные зависимости колебаний штанг опрыскивателя от давления воздуха в шинах и скорости движения при переменном уровне

заполнения технологической емкости позволяет повысить эффективность эксплуатации мобильных самоходных средств химизации.

**Вклад автора в проведенное исследование.** Разработана математическая и имитационная модели мобильного средства малой грузоподъемности, оборудованное штанговым опрыскивателем, отличающаяся возможностью исследования виброзащитных свойств МЭС с учетом изменения массы жидкости, подрессоривания кабины оператора и гистерезисных потерь в упругих элементах подвески при выполнении сельскохозяйственных операций. Проведены лабораторные, лабораторно-полевые и полевые исследования мобильного средства, оборудованного шины сверхнизкого давления 1020x420-18 и определены функциональные зависимости для определения параметров взаимодействия ШСНД с твердым и грунтовым опорным основанием. Проведены испытания по оценке воздействия на растения шин сверхнизкого давления 1020x420-18, применённых на объекте исследований при выполнении сельскохозяйственных операций.

**Реализация результатов исследований.** Результаты экспериментальных исследований конструкторско-технологических параметров виброзащитных свойств МЭС внедрены в производство на ООО «ТРАНСМАШ» (г. Нижний Новгород) и ООО «ЦЧ АПК» филиал МТС Воронеж Верхнехавского района Воронежской области. Разработанный стенд и методика определения жесткости упругих элементов подвески внедрена в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 23.03.03 «Эксплуатация транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования» по дисциплине «Конструкция и эксплуатационные свойства транспортно-технологических машин и оборудования».

**Научные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся основные положения, представляющие новизну и практическую ценность.

**Степень достоверности результатов** обеспечена применением в работе современных апробированных теоретических подходов с применением математического моделирования, а также достаточной сходимостью расчетных

данных, полученных при использовании лицензионных программных комплексов с экспериментальными данными, полученными при реальных условиях испытаний. Результаты и выводы работы теоретически обоснованы и подтверждены расчетами.

**Апробация работы.** «Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм» (ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 2018, 2020, 2021); Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы и инновационные решения в химической технологии (ПИРХТ-2019)» (ФГБОУ ВГТУ, Воронеж, 2019); «Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе» (АНО ВО «Автомобильно-транспортный институт», Воронеж, 2019); «Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, эко-логии и систем аэрокосмического мониторинга» (ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, 2019); «Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, Воронеж, 2020); «Современные направления и подходы к проектированию и строительству инженерных сооружений» (ФГБОУ ВО РГАУ им. П.А. Костычева); «Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, Воронеж, 2020); «Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий» (ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 2021); «Роботизированные и автоматизированные системы в автомобиле- и тракторостроении» (ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 2022); «Проблемы и перспективы конструктивного совершенствования отечественного автомобилестроения» (ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 2023); «Эксплуатация и сервис автомобилей, тракторов и двигателей» (ФГБОУ ВО СПбГАУ, Санкт-Петербург, 2023, 2024, 2025); «Автомобильное и тракторное машиностроение России: пути развития и подготовка кадров» (ФГБОУ ВО ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 2025).

**Публикации.** По материалам диссертации и результатам проведенных исследований опубликовано 27 статей, из них 2 в изданиях, рекомендованных списком ВАК РФ, 2 публикации в изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus. Получено 7 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 основных глав, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка, 6 приложений.

Общий объем диссертации составляет 239 страницы и содержит 74 рисунка, 37 таблиц, список литературы из 128 наименований.

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 1.1 Анализ конструктивных схем, особенностей эксплуатации и обоснование параметров мобильных средств сельскохозяйственного назначения

Мобильные энергетические средства (МЭС) и самоходные опрыскиватели на их базе, оборудованные шинами сверхнизкого давления способны применяться в условиях почв с низкой несущей способностью и на переувлажнённых почвах в ранний весенний период года, когда применение прицепных, навесных или самоходных опрыскивателей на стандартных шинах становится невозможным [27]. Взаимодействие шин сверхнизкого давления с опорной поверхностью характеризуется низким давлением на грунт, что оказывает минимальное травмирующее воздействие на растительный покров и практически исключает переуплотнение почвы в корневом слое растений и создание минерализованной колеи [22]. Таким образом данные шины обладают наибольшей экологичностью, обеспечивают высокую проходимость и плавность хода самоходным опрыскивателям, увеличивая их производительность. В сочетании с шинами большого диаметра при движении штанговых опрыскивателей в технологической колее, достигается высокая годовая загрузка, повышающая экономическую эффективность мобильных энергетических средств.

По мере насыщения рынка сельскохозяйственной техники такими штанговыми опрыскивателями появилось несколько отдельных направлений развития конструкций и компоновочных схем, с похожими либо близкими технико-эксплуатационными параметрами. Для изучения эффективности и особенностей применения штанговых самоходных опрыскивателей, оборудованных шинами сверхнизкого давления, необходимо рассматривать все многообразие существующих серийно выпускаемых образцов, в том числе и опытно-конструкторских [30, 31]. Таким образом можно определить направления развития и ключевые характеристики перспективных МЭС.

Первая группа опрыскивателей имеет колесную формулу 4x4 и объем бака до 1500 л. Большинство таких мобильных средств малой грузоподъемности

основывается на базе серийно выпускаемых автомобилей повышенной проходимости марки УАЗ, на раму которого устанавливается штанговый опрыскиватель с емкостью, а в качестве шин используются Бел-79. Одной из наиболее удачных машин с такой компоновкой является опрыскиватель «АХА-1» (рисунок 1.1, таблица 1.1).



Рисунок 1.1 – Самоходный опрыскиватель «АХА-1»

Таблица 1.1 – Технические характеристики самоходного опрыскивателя «АХА-1»

Название опрыскивателя	АХА-1
Скорость в поле (рабочая)	60 км/ч
Производительность	до 60 га/ч
Объём бака	1000 л
Ширина захвата	22 м
Расход рабочей жидкости	20–250л/га
Давление на почву	0,6 кг/см <sup>2</sup>
Расход топлива	до 0,4 л/га
Колёсная формула	4х4
Шины	Бел-79

Вторая группа опрыскивателей имеет колесную формулу 6х4 и объем бака до 1500 л. В такой колесной формуле нагрузка, приходящаяся на несущую систему самоходного опрыскивателя, более равномерно распределяется между колесами, обеспечивая равномерное давление каждой шины на опорное основание. Большинство мобильных энергетических средств и опрыскивателей на их базе, оборудованных шинами сверхнизкого давления, выполняются на оригинальной платформе

собственной разработки, имеющей переднее расположение кабины оператора и заднее расположение штангового опрыскивателя с емкостью. Принципиально самоходные штанговые опрыскиватели имеют два типа компоновочной схемы кабины оператора: в базе колес (за передней осью) и перед осью передних управляемых колес.

К мобильным энергетическим средствам с расположением кабины в базе колес относятся самоходные опрыскиватели «ОС 11110 «ROSA»-11», «ОЛС-1,0 БАРС 271», «ОРС-600» и «Бизон I» (рисунок 1.2). В качестве движителя у всех используются шины сверхнизкого давления ОШ-1 (таблица 1.2), характеризующиеся минимальным воздействием на почвенно-растительный покров и минимальным уплотнением почвы. При ширине захвата штанг от 20 до 24 метров и рабочей скорости более 25 км/ч обеспечивается высокая часовая производительность, более 50 га/ч.



а



б



в



г

Рисунок 1.2 – Самоходные опрыскиватели:  
а – «ОС 11110 «ROSA»-11», б – «ОЛС-1,0 БАРС 271», в – «ОРС-600», г – «Бизон I»

Мобильные энергетические средства с расположением кабины оператора перед осью передних управляемых колес представлены на Российском рынке опрыскивателями «Туман-1М» и «Рубин-1200» (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Самоходные опрыскиватели:  
а – «Туман-1М», б – «Рубин-1200»

Таблица 1.2 – Технические характеристики самоходных опрыскивателей малой грузоподъемности с колесной формулой 6х4

Название опрыскивателя	«Туман-1М»	«ОС 11110 «ROSA»-11»	«Рубин-1200»	«ОЛС-1,0 БАРС 271»	«ОРС-600»	«Бизон»
Скорость в поле (рабочая)	до 40 км/ч	-	до 40 км/ч	35 км/ч	25 км/ч	до 35 км/ч
Производительность	до 60 га/ч	до 54 га/ч	до 70 га/ч	до 45 га/ч	до 50 га/ч	до 80 га/ч
Объем бака	1000 л	850 л	1200 л	750 л	600 л	1000 л
Ширина захвата	20 м	24 м	24 м	24 м	22 м	24 м
Расход рабочей жидкости	10–180 л/га	30–300 л/га	15–300 л/га	5–200 л/га	10–150 л/га	-
Давление на почву	0,2 кг/см <sup>2</sup>	0,1-0,16 кг/см <sup>2</sup>	0,2 кг/см <sup>2</sup>	0,09-0,13 кг/см <sup>2</sup>	-	-
Расход топлива	до 0,25 л/га	до 0,2 л/га	0,2 (0,13) л/га	0,14 л/га	-	0,2 л/га
Дорожный просвет	до 0,4 м	-	0,7 м	0,5 м		
Колея	-	2,15	-	-	2,25 м	2,25 м
Колёсная формула	6х4	6х4	6х4	6х4	6х4	6х4
Вес пустой машины		1050 кг		1270 кг	1100 кг	
Шины	Бел-79	ОШ-1	Бел-79	ОШ-1	ОШ-1	ОШ-1

Такое расположение кабины обусловлено улучшением обзорности в кабине оператора и расширением габаритов задней технологической площадки для установки штангового опрыскивателя с ёмкостью. Исходя из повышенной нагрузки на движители при увеличенном объеме бака опрыскивателя применяются на каждой шине Бел-79. При этом моторно-трансмиссионное отделение располагается сразу за кабиной оператора перед баком-ёмкостью, обеспечивая равномерное распределение нагрузки на опорные колеса при полной загрузке. А с заявленной рабочей скоростью около 40 км/ч и шириной захвата 24 м обеспечивается производительность более 60 га/ч.

Третья группа опрыскивателей имеет колесную формулу 4x4 и объем бака до 3000 л. Такие мобильные энергетические средства средней грузоподъемности изготавливаются на базе автомобилей повышенной проходимости, путем установки на заднюю технологическую площадку штангового опрыскивателя. Характерными их представителями являются самоходные опрыскиватели «АВИОН 44-02» и «ВУАЗ АГРО 2000М» (рисунок 1.4). Установленные на них шины способны воспринимать большую нагрузку, имея как больший диаметр и большую ширину профиля. Технические характеристики самоходных опрыскивателей третьей группы (таблица 1.3) позволят увеличить производительность, за счет снижения времени на заправку технологического бака-ёмкости



а



б

Рисунок 1.4 – Самоходные опрыскиватели:  
а – «АВИОН 44-02», б – «ВУАЗ АГРО 2000М»

Первая схема компоновки предполагает размещение кабины оператора в колесной базе при переднем расположении моторно-трансмиссионной силовой установки. Опрыскиватели с такой компоновкой (рисунок 1.5) в большинстве случаев имеют конструкцию шасси собственной разработки с кабиной серийно выпускаемых автомобилей марок ГАЗ и УАЗ. Как правило их максимальная рабочая скорость превышает 40 км/ч, а ширина захвата штанг приближается к 28 м (таблица 1.4), что обеспечивает им также высокую производительность.

Таблица 1.3 – Технические характеристики самоходных опрыскивателей средней грузоподъемности с колесной формулой 4х4

Название опрыскивателя	«АВИОН 44-02»	«ВУАЗ АГРО 2000М»
Скорость в поле (рабочая)	до 50 км/ч	до 60 км/ч
Объём бака	2000 л	2000 л
Ширина захвата	24 м	20 м
Дорожный просвет	0,45 м	-
Колёсная формула	4х4	4х4
Вес пустой машины	2300 кг	-



а



б



в

Рисунок 1.5 – Самоходные опрыскиватели: а – «АХА-2», б – «Бизон II», в – «BAGIRA 3000M»

Таблица 1.4 – Технические характеристики самоходных опрыскивателей средней грузоподъемности, с кабиной классической компоновки, с колесной формулой 6х4

Название опрыскивателя	«АХА-2»	«Бизон II»	BAGIRA 3000M
Скорость в поле (рабочая)	60 км/ч	до 50 км/ч	до 40 км/ч
Производительность	до 60 га/ч	-	до 70 га/ч
Объём бака	2500 л	3000 л	3000 л
Ширина захвата	22 м	28 м	28 м
Расход рабочей жидкости	20-250 л/га	300 л/га	30–250 л/га
Расход топлива	до 0,4 л/га	0,3 л/га	0,27 кг/см <sup>2</sup>
Колёсная формула	6х4	6х4	6х4
Шины	Бел-79	AVTOROS MAX-TRIM	AVTOROS MAX-TRIM

Другая схема предполагает размещение кабины перед осью передних управляемых колес. Силовая установка размещена непосредственно за кабиной. Такие самоходные штанговые опрыскиватели (рисунок 1.6) имеют ширину захвата до 28 м и рабочую скорость движения около 35 км/ч, что обеспечивает их производительность до 80 га/ч (таблица 1.5). Их главной особенностью является улучшенная обзорность в кабине оператора и расширенная задняя технологическая площадка. На большинстве используются шины АВТОРОС S-TRIM или AVTOROS MAX-TRIM, позволяющие увеличить грузоподъемность мобильного средства. А производительность опрыскивателей достигает 80 га/ч.

Таблица 1.5 – Технические характеристики самоходных опрыскивателей средней грузоподъемности, с кабиной вынесенной за базу, с колесной формулой 6х4

Название опрыскивателя	«Туман-2М»	«Туман-3»	«ОС-2500М2 ОРС»	«РУБИН- 2500»
Скорость в поле (рабочая)	до 35 км/ч	до 35 км/ч	до 35 км/ч	до 35 км/ч
Производительность	до 80 га/ч	до 80 га/ч	до 50 га/ч	до 70 га/ч
Объём бака	2000 л	2500 л	2500 л	2500 л
Ширина захвата	28 м	28 м	28 м	28 м
Расход рабочей жидкости	30–300 л/га	15–450 л/га	15–450 л/га	15–300 л/га
Давление на почву	0,4 кг/см <sup>2</sup>	0,4-0,8 кг/см <sup>2</sup>	0,4-0,8 кг/см <sup>2</sup>	0,2 кг/см <sup>2</sup>
Расход топлива	0,2-0,25 л/га	до 0,35 л/га	до 0,35 л/га	0,13 л/га
Дорожный просвет	0,45-0,8 м	до 0,8 м	до 0,8 м	0,5 м
Колёсная формула	6х4	6х4	6х4	6х4
Масса заправленная	4800	5400	6200	6200 кг
Шины	АВТОРОС S-TRIM	АВТОРОС S-TRIM	AVTOROS MAX-TRIM	АВТОРОС S-TRIM

Производимые в России самоходные опрыскиватели с колёсной формулой 6x4 на сегодняшний день наиболее развиты и распространены. Их главными преимуществами являются низкое давление на опорное основание, большая ширина захвата (28 м), высокая скорость движения (более 40 км/ч). Однако из-за высокой стоимости их применение в малых и крестьянско-фермерских хозяйствах будет довольно затратно. В тоже время существующие МЭС с колесной формулой 4x4 имеют перегруженную заднюю ось, дополнительно увеличивающую уплотнение почвы в прикорневом слое. Таким образом для распределения нагрузки равномерно между осями необходимо вынести кабину за ось передних управляемых колес.



а



б



в



г

Рисунок 1.6 – Самоходные опрыскиватели:  
 а – «Туман-2М»-11», б – «ОЛС-1,0 БАРС 271», в – «ОРС-600», г – «Туман-3»

## 1.2 Свойства виброзащитных систем и анализ конструкций адаптивных подвесок, применяемых в мобильных средствах

Вибрацией называется вид механических колебаний, возникающих при передаче телу механической энергии от источника колебаний [ГОСТ 24346-80].

Вибрации возникают в системах с упругими связями и характеризуются изменением хотя бы одной из координат элемента в трехмерном пространстве.

Источниками вибрации являются практически все элементы МЭС (детали, совершающие возвратно-поступательные движения, вращение неуравновешенных масс, биение зубчатых передач и т.п.).

При создании, производстве и эксплуатации грузовых мобильных средств исходят из того, что вибрация является очень вредным фактором как для самого средства, так и для водителя. Вибрация интенсифицирует процессы износа деталей и узлов, нарушает эффективность разъемных соединений и снижает технико-эксплуатационные характеристики машин. Влияние вибрации на водителя МЭС подробно рассматривается в разделе 1.2 данной работы.

Основными факторами, оказывающими влияние на вибрационную нагруженность грузового автотранспортного средства помимо конструктивных параметров являются и условия эксплуатации:

1. Транспортные. Такие условия должны учитывать объем, вид и расстояние перевозок грузов, условия погрузки и разгрузки, организацию перевозок, а также условия технического обслуживания и ремонта.

2. Дорожные. Учитывая дорожные условия при проектировании, необходимо принимать во внимание тип дорожных одежд и виды дорожных покрытий, допустимую нагрузку на ось, расчетную скорость движения, элементы профиля с учетом рельефа местности.

3. Климатические. Анализ климатических условий позволяет определить состояние покрытия дороги, видимость и температуру окружающей среды.

Основными оценочными показателями, которые определяют уровень комфортабельности и безопасности мобильного средства является плавность хода и вибронегруженность сиденья водителя.

Хорошие показатели плавности хода и вибронегруженности водителя влияют на долговечность агрегатов и узлов, сохранность перевозимого груза, среднюю скорость и безопасность движения. С точки зрения оценки параметров плавности хода и вибронегруженности водителя является такая конструкция транспортного средства, которая обеспечивает наименьший уровень вибрации.

При выполнении работ мобильное средство подвергается воздействию неровностей опорной поверхности под колесными движителями, вибрация от которых впоследствии передается на элементы конструкции и на водителя в виде производственной вибрации.

Болезни производственных рабочих и водителей, связанные с воздействием вибрации находятся на втором месте после пылевых заболеваний по количеству случаев и тяжести заболеваний.

Воздействие вибрации на организм человека классифицируют:

- по способу передачи колебаний (общая и локальная);
- по источнику возникновения (локальная и общая);
- по направлению действия вибрации (локальная и общая);
- по характеру спектра (узкополосная, широкополосная);
- по частотному составу (низкочастотные, среднечастотные, высокочастотные);
- по временным характеристикам (постоянные и непостоянные).

Согласно данной классификации вибрация, передаваемая от элементов конструкции через сиденье к водителю относится к общей по способу передачи колебаний, источнику возникновения и направлению действия, широкополосной по характеру спектра, частотный состав такой вибрации находится во всех спектрах, по временным данная вибрация относится к постоянным. В рамках данной работы далее вибрация, имеющая такие характеристики будет называться транспортной.

При действии на организм человека общей вибрации в первую очередь страдает нервная система и анализаторы: вестибулярный, зрительный и тактильный.

Нарушение работы этих анализаторов приводят к появлению головной боли, головокружению, нарушению сна, снижению работоспособности, расстройству зрения, заболеванию суставов, снижению чувствительности.

При частоте колебаний рабочих мест, близкой к собственным частотам внутренних органов возможны травмы и разрывы внутренних органов. Низкочастотная вибрация может приводить к болезненным ощущениям в области позвоночника и внутренних органов.

Наиболее опасной для человека является толчкообразная вибрация, которая вызывает микротравмы различных тканей с последующими изменениями.

Систематическое воздействие общих вибраций, характеризующихся высоким уровнем виброскорости, приводит к вибрационной болезни, которая характеризуется физиологическими изменениями и поражением центральной нервной системы.

В таблице 1.6 представлены гигиенические нормы вибрации для рабочего дня длительностью 8 часов.

Таблица 1.6 – Влияние вибрации на организм человека

Амплитуда колебаний вибрации, мм	Частота вибрации, Гц	Результат воздействия
до 0,015	Различная	Не влияет на организм
0,016-0,050	40-50	Нервное возбуждение с депрессией
0,051-0,100	40-50	Изменение в ЦНС, сердце и органах слуха
0,101-0,300	50-150	Возможное заболевание
0,101-0,300	150-250	Вызывает виброболезнь

Для оценки влияния воздействия вибрации на водителя применяются качественные и количественные критерии. К качественным критериям относят:

- критерий «безопасность» обеспечивающий сохранение здоровья оператора, оцениваемого по объективным показателям с учетом риска возникновения профессиональной болезни и патологий, а также исключая возможность возникновения травмоопасных или аварийных ситуаций из-за воздействия вибрации

- критерий «граница снижения производительности труда», обеспечивающий поддержание нормативной производительности труда оператора, не снижающейся из-за развития усталости под воздействием вибрации;

- критерий «комфорт», обеспечивающий оператору ощущение комфортности условий труда при полном отсутствии мешающего действия вибрации.

К качественным критериям, характеризующим вибрацию относятся:

1. Частота колебаний  $f$ , (Гц). Частота колебаний означает количество колебаний за единицу времени.

2. Амплитуда колебаний  $A$ , (м). Амплитудой колебаний является наибольшее смещение колеблющейся точки от нейтрального положения.

3. Скорость вибрации  $V$ , (м/с). Скорость вибрации представляет собой первую производную перемещения во времени – частоты и амплитуды колебаний. Скорость вибрации определяется по формуле:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A, \quad (1.1)$$

где  $f$  – частота колебаний, Гц,  $A$  – амплитуда колебаний, м

4. Ускорение вибрации,  $a$  (м/с<sup>2</sup>). Ускорение вибрации представляет собой вторую производную смещения во времени – частоты и амплитуды колебаний – и выражается в долях или единицах ускорения свободного падения:

$$a = \frac{4\pi^2 f^2 A}{981}. \quad (1.2)$$

Для санитарного нормирования и контроля должны использоваться не только среднеквадратические значения виброускорения  $a$ , но и их логарифмические уровни в децибелах  $L_a$  [27].

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{1 \cdot 10^{-6}}. \quad (1.3)$$

Нормируемый диапазон частот для общей вибрации устанавливается в октавных и 1/3 октавных полос со среднегеометрическими частотами 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80 Гц. В большинстве случаев исследование производственной вибрации при работе МЭС ограничивается частотным диапазоном в октавных полосах частот от 1 до 16 Гц, т.к. в этом диапазоне сосредоточена основная энергия колебаний, возникающих вследствие воздействия неровностей опорной поверхности микропрофиля дорог.

Показатели плавности хода обычно назначают по выходной величине, которой является вертикальное виброускорение  $a$ : или вертикальная виброскорость  $V_z$ , определяемые на сиденье оператора. Здесь необходимо отметить, что при оценке вибрационной нагрузки на человека-оператора предпочтительной выходной величиной является виброускорение. Среднеквадратическое значение  $a_z$  называют «контролируемым параметром», а плавность хода машины определяют при постоянной вибрации в диапазоне частот 0,7...22,4 Гц. Нормируемыми показателями вибрационной нагрузки на человека являются как одночисловые параметры (интегральная оценка), так и спектр (раздельночастотная оценка) вибрации. К одночисловым параметрам относится скорректированное по частоте значение контролируемого параметра, с помощью которого учитывается неоднозначность восприятия человеком вибрации с различным спектром частот. Скорректированное по частоте значение контролируемого параметра и его логарифмический уровень определяются из выражений:

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot K_i)^2}; \quad (1.4)$$

$$L_U = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{U_i} + L_{K_i})}, \quad (1.5)$$

где  $U_j$ ,  $L_{vi}$  – среднеквадратическое значение виброскорости или виброускорения (или их логарифмические уровни) в  $i$ -ой частотной полосе;  $n$  – число частотных полос (1/3 или 1/1 октав) в нормируемом частотном диапазоне.

Для уменьшения вибраций на пути их распространения применяют вибродемпфирование, виброгашение и виброизоляцию. Наглядно классификацию технических методов и средств защиты от вибраций отражает схема, представленная на рисунке 1.7.

Также в настоящее время повышение рабочих скоростей автомобилей, составляет общую техническую основу увеличения ее производительности и интенсификации использования, способствует успешному развитию механизации производства, повышает эффективность материально-технической базы. Необходимо отметить, что повышение рабочих скоростей движения не противоречит, а способствует получению наиболее полного эффекта от реализации известных направлений увеличения производительности при выполнении работ. Но вместе с этим, при увеличении рабочих скоростей автомобилей увеличивается и их вибронагруженность, отрицательно влияющая на различные элементы мобильных средств, в том числе и на водителя.

Механические колебания, возникающие при движении транспортного средства, являются причиной различного рода вибраций, приводящих к усталостным разрушениям деталей кузова, подвески, установленного технологического оборудования. Кроме того, вибрация отрицательно воздействует на здоровье и состояние оператора в кабине технологического аппарата.

Уровень вибрации, воздействующей на водителя, является основным показателем комфортабельности транспортного средства и определяет утомляемость водителя, следовательно, влияет на безопасность движения. Высокие уровни вибрации ограничивают скорость движения автомобиля, что сказывается на его производительности. При высоком уровне вибронагруженности на сиденье, оператор сознательно снижает скорость движения мобильного средства.

Мехатронные системы подвески могут быть классифицированы в соответствии с их типами исполнительных механизмов, включая ширину полосы частот исполнительного механизма, потребляемую мощность исполнительных

механизмов и диапазон их управляемости, то есть ограничения для сил, которые приводят исполнительные механизмы. Соответственно, мехатронные системы подвески можно разделить на пять групп:

1. Пассивные системы подвесок (рисунок 1.7) работают квазистатически и поддерживают постоянное расстояние между шасси и дорогой, чтобы компенсировать различные уровни нагрузки транспортного средства. Система контроля уровня может быть основана на пневматических рессорах и компрессорах. Таким образом, мягкая, ориентированная на комфорт установка подвески с достаточным ходом подвески может быть реализована независимо от уровня нагрузки транспортного средства. Их потребляемая мощность находится в диапазоне 100-200 Вт.

2. Адаптивные системы подвески (рисунок 1.8) обозначают в литературе системы подвески, которые реализуют медленное изменение характеристик пружины и демпфера. Изменение запланировано, например, в соответствии со скоростью транспортного средства, чтобы понизить центр тяжести транспортного средства, чтобы обеспечить более спортивное удержание дороги. Их потребляемая мощность зависит главным образом от энергии, необходимой для изменения жесткости пружины. Подчеркивается, что в этом тезисе представлены концепции адаптивного управления подвеской для достижения высокой динамической адаптации к текущему состоянию вождения.

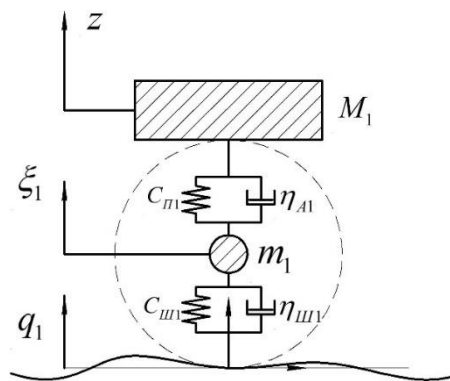


Рисунок 1.7 – Модель пассивной системы поддресоривания.

где  $M_1$  – поддресоренная масса автомобиля, приходящаяся на одно колесо;  $m_1$  – недресоренная масса автомобиля, приходящаяся на одно колесо;  $C_{шш}$  –

коэффициент вертикальной жесткости автомобильной шины колеса;  $C_{П1}$  – коэффициент вертикальной жесткости упругого элемента подвески;  $\eta_{A1}$  – коэффициент неупругого сопротивления амортизатора подвески;  $\eta_{Ш1}$  – коэффициент неупругого сопротивления автомобильной шины;  $z$  – вертикальное положение центра массы автомобиля, приходящейся на одно из колес;  $\xi_1$  – вертикальное положение недрессоренной массы;  $q_1$  – текущие по времени значение ординаты микропрофиля поверхности дороги в контакте одного колеса.

3. Подвесные системы с возможностью быстрой регулировки характеристик демпфера или жесткости пружины называются полуактивными подвесками (рисунок 1.9). Основным атрибутом полуактивных систем является то, что сила, создаваемая полуактивным элементом, зависит от направления относительного движения элемента. Полуактивные демпферы могут изменять уровень рассеивания энергии, но не подавать энергию в систему. Соответственно, они имеют очень низкую потребляемую мощность около 20-40 Вт на демпфер. Полоса пропускания полуактивных демпферов составляет до прибл. 40 Гц. Примером полуактивного пружинного элемента является стабилизатор поперечной устойчивости с переключаемыми дополнительными пружинами, который представлен ZF Lemf order GmbH.

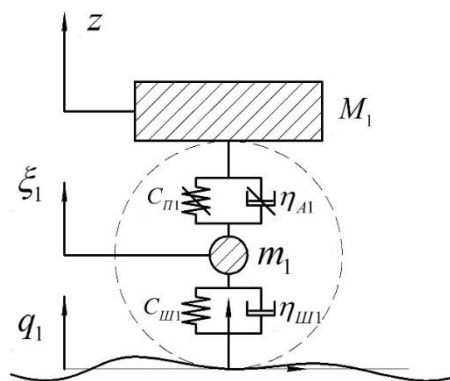


Рисунок 1.8 – Модель адаптивной системы поддрессирования.

где  $C_{П1}$  – изменяемый коэффициент вертикальной жесткости упругого элемента подвески;  $\eta_{A1}$  – изменяемый коэффициент неупругого сопротивления амортизатора подвески.

4. Медленно активные системы (рисунок 1.10) (также называемые активной системой с низкой пропускной способностью) представляют собой класс активных систем приостановки. Они характеризуются дополнительным приводом (например, электрическим линейным двигателем или гидравлическим цилиндром), который встроен в подвеску и может генерировать силы подвески независимо от относительного движения шасси и колеса. Пропускная способность медленных активных систем находится в диапазоне около 5 Гц. В медленных активных системах обычно используются исполнительные механизмы, которые последовательно соединены с первичной пружиной и имеют тенденцию к «усилению», если их пропускная способность превышена. Их потребность в энергии находится в диапазоне 1-5 кВт.

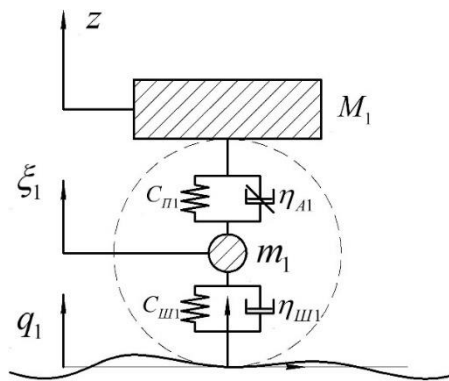


Рисунок 1.9 – Модель полуактивной системы поддресоривания.

где  $\eta_{AI}$  – изменяемый коэффициент неупругого сопротивления амортизатора подвески.

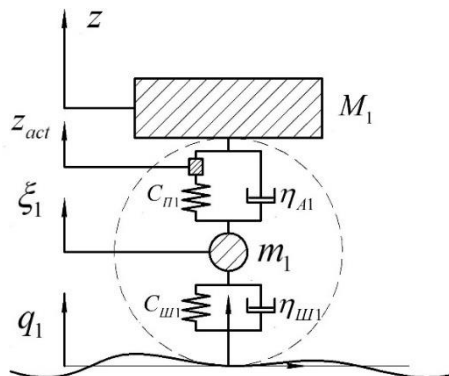


Рисунок 1.10 – Модель медленно активной системы поддресоривания.

где  $z_{act}$  – перемещение активного элемента

5. В полностью активных системах подвески (рисунок 1.11) (также называемых активными системами с высокой пропускной способностью) пассивный демпфирующий элемент заменяется или дополняется приводом с полосой пропускания 20 Гц или выше. Приводы полностью активных систем встроены параллельно первичной пружине, и в некоторых случаях пассивный демпфер отсутствует (хотя его рассмотрение Действие в модели четверти транспортного средства может быть использовано для описания эффектов трения). Однако основным недостатком полностью активных суспензий является их высокая потребность в энергии, которая колеблется от 4 до 20 кВт [4].

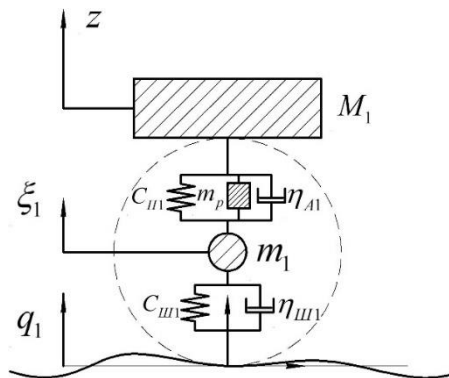


Рисунок 1.11 – Модель полностью активной системы подвески.

где  $m_p$  – активный элемент системы подвески.

Различные варианты подвесок требуют отдельного рассмотрения. Особенности моделирования каждого элемента необходимо рассматривать в совокупной системе динамической модели автомобиля. Данные схемы необходимо применять в расчетах современных автомобилей с использованием нелинейных характеристик элементов подвески.

В динамике транспортного средства функция систем подвески состоит в том, чтобы обеспечить хорошую изоляцию между границей между шиной и дорогой и

кузовом транспортного средства, а также хорошие характеристики сцепления с дорогой. Кроме того, он также должен обеспечивать хорошее рулевое управление во время маневрирования и поддерживать приемлемый отклик на поворот, торможение и ускорение [28]. Традиционные пассивные системы подвески имеют ограниченные возможности для удовлетворения двух противоречивых требований к дизайну: езда и управляемость.

Хороший комфорт при езде достигается за счет минимизации ускорения кузова, использования низких скоростей пружин и амортизаторов, что приводит к более мягкой подвеске. Наличие более мягкой подвески влечет за собой больший ход подвески, что в конечном итоге приводит к скачку колеса и нестабильному наклону кузова, вызванному различной нагрузкой. Автомобиль будет испытывать увеличение при боковой нагрузке, которая непосредственно влияет на

Снижение уровней вибрации рабочих мест и улучшение их эргономических характеристик позволит решить одну из важнейших проблем улучшения условий труда и сохранения здоровья рабочих.

Одним из основных средств борьбы с неизбежной вибрацией и обеспечения удобной рабочей позы и сравнительно дешевым средством является качественное сиденье оператора. Современное сиденье имеет две основных части – это посадочное место (само сиденье и спинка с подголовником) и подвеска сиденья (достаточно сложное устройство с пружиной – механической или пневматической, амортизатором и специальным направляющим устройством). Таким образом, совершенное сиденье оператора является сложным узлом, а защита оператора от вибрации при движении мобильного энергетического средства представляют собой важную инженерную задачу, требующую особого внимания.

### 1.3 Методы теоретических исследований плавности хода и анализ математических моделей мобильных энергетических средств

Мировая проблема голода в развивающихся странах является одной из наиболее острых по мнению ООН. Повышение урожайности культурных растений

в комплексе с расширением используемых возделываемых площадей являются одними из способов решения. Повышение производительности и эффективности использования средств защиты растений также способствуют решению данной проблемы. Так в работе [5] были обозначены основные факторы, повышающие производительность штанговых опрыскивателей, одним из факторов которой является повышение рабочих скоростей их движения.

Увеличением рабочих скоростей движения мобильных средств химизации по агрофону обусловлено увеличение вибрационной нагруженности как на сидение оператора, так штанг опрыскивателя. В материалах исследований [1] показано влияние стабильности положения и высоты штанг опрыскивателя на качество распыления, установлено, что при амплитуде колебаний на концах штанг менее 20 см. ухудшение качества распыления не наблюдается. Также отмечено, что при распылении наибольшее влияние оказывает форма и конструкция устанавливаемых распылителей.

Существенное влияние на увеличение колебаний на краях штанг опрыскивателя оказывает увеличение их длины. Так в работе [8] рассматривается моделирование вибронгруженности штангового опрыскивателя, установленного на универсально-пропашном тракторе, у которого отсутствует подвеска, поэтому имеет место значительное увеличение амплитуды колебаний на краях штанг. При этом наличие пассивной системы подрессоривания штанг опрыскивателя не позволяет их устранить.

Одним из способов снижения вибронгруженности штанг опрыскивателя является применение системы адаптивной стабилизации [2]. Системы стабилизации штанг опрыскивателя позволяют увеличить как эффективность применения средств защиты растений, так и их расход, снижая его более чем на 12%, благодаря более стабильному положению штанг при одновременном повышении качества распыления [7]. В то же время применение систем адаптивной стабилизации штанг на мобильных энергетических средствах малой грузоподъемности, оборудованных шинами сверхнизкого давления, приводит к увеличению подрессоренных масс, что приводит к снижению грузоподъемности этих средств [15].

Повышение эффективности использования опрыскивателей в ранний весенний период невозможно без применения экологичного движителя со сниженным максимальным давлением на почву [14]. Шины данного типа позволяют в значительной степени сглаживать неровности агрофона, и как следствие снижать уровень колебаний на сиденье оператора. Так, в исследовании [16] представлена модель и результаты испытаний трактора с классическими шинами. Установлено, что вибронегруженность на сиденье оператора является неудовлетворительной при частоте 2-4 Гц. Наибольшее влияние на снижение вибронегруженности на сиденье оператора оказывают радиальная жесткость шины и система подрессоривания сиденья.

Снижение вибронегруженности на сиденье оператора на транспортно-технологических средствах также достигается путем применения в подвесках активных и адаптивных систем подрессоривания. В работе [9] приведены исследования влияния магнитоэологических амортизаторов, установленных в подвеске, на виброзащитные свойства динамической системы транспортного средства малой грузоподъемности. Показана эффективность представленного полуактивного контроля и используемых алгоритмов управления. В статье [19] также рассматривается модель активного управления динамической виброзащитной системой транспортного средства. Однако активные и адаптивные системы подрессоривания в подвеске не могут быть применены на мобильных средствах малой грузоподъемности, что обусловлено малой грузоподъемностью шин сверхнизкого давления.

Заключительным звеном динамической системы мобильного средства, обеспечивающим защиту оператора, является конструкция сиденья. Активная система подрессоривания сиденья позволяет лучше гасить вертикальные колебания на сиденье оператора при достаточно широком частотном диапазоне колебаний [20]. Это подтверждают результаты исследований [11] моделирования виброзащитной системы мобильного средства с активной подвеской сиденья. Другим способом повышения плавности хода, также является применение виброзащитных систем сиденья водителя с конструкцией, имеющей переменную жесткость [10]. В статье показаны конструктивные преимущества разработанной системы подвески сиденья, повышающие условия труда водителя в кабине транспортного средства. Однако

применение подвески сиденья на мобильном энергетическом средстве малой грузоподъемности не целесообразно, так как применение шин сверхнизкого давления в совокупности с независимой подвеской позволяют добиться высоких показателей по плавности хода.

Снижение вибронегруженности сиденья также достигается путем применения различных материалов подушек сиденья. В работе [3] представлены результаты вертикальных ускорений и плавность хода на сиденье тракторов, которые свидетельствуют о значительном влиянии конструкции подушки сиденья и материала его изготовления на вибронегруженность.

Математическое моделирование виброзащитных систем современных мобильных средств невозможно без учета многомассовой модели с несколькими степенями свободы, учитывающей вибрационные воздействия, приходящиеся на каждое из колес транспортного средства [4]. Материалы исследований [17] рассматривают динамическую модель автомобиля с отрывом и дальнейшим ударным воздействием двигателя на опорную поверхность с трёхуровневым рассмотрением модели. Но при рассмотрении движения мобильного энергетического средства, оборудованного шинами сверхнизкого давления, по случайным неровностям в полевых условиях, отрыв шин от опорной поверхности не рассматривается.

В процессе движения на мобильные средства с высокорасположенной координатой центра масс большое влияние оказывают силы и воздействия, направленные поперек продольной оси движения. Автор статьи [18] рассматривает модель воздействия различных факторов, в том числе и ветрового возмущения на плавность хода, устойчивость и безопасность движения транспортного средства. При одинаковой скорости движения автомобиля и условиях боковой ветровой нагрузки со скоростью 10 м/с легкий грузовик более склонен к проблемам с комфортом езды и авариям с потерей устойчивости, в то время как легковой автомобиль более склонен к авариям с боковым скольжением. Однако применение штангового опрыскивателя во время выполнения технологических операций со скоростью ветра более 6 м/с не может быть рассмотрено, так как резко ухудшаются показатели по распылению рабочей жидкости.

Динамическая модель виброзащитной системы транспортного средства, обладающая высокой достоверностью получаемых данных, должна учитывать гистерезисные потери в подвеске, оказывающих значительное влияние на виброзащитные свойства [6, 18]. Однако потери и рассеивание энергии такого рода может быть рассмотрено также и в шинах сверхнизкого давления, и в виброизоляторах кабины оператора.

Таким образом на динамическую систему самоходного опрыскивателя оказывают влияние жесткость и конструкция шин, наличие активных и адаптивных систем поддресоривания в подвеске, и конструктивные особенности сиденья оператора. Оптимизация указанных параметров позволит наиболее эффективно использовать самоходные опрыскиватели увеличивая их годовую загрузку и повысить рабочие скорости движения.

#### 1.4 Воздействие на растения ходовых аппаратов мобильных средств сельскохозяйственного назначения

Мировой опыт ведения сельского хозяйства показывает, что повышение урожайности сельскохозяйственных культур определяется в основном уровнем химизации. Механизированные процессы защиты растений от сорняков, болезней и вредителей, являются неотъемлемой частью современных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, требуют одновременного строгого соблюдения агротехнического регламента применения пестицидов, в большей степени используемых при опрыскивании.

В настоящее время наибольшее распространение получили технологии опрыскивания различными самоходными мобильными средствами химизации. Улучшением существующих и разработкой новых технологий обусловлено создание мобильных средств химизации нового поколения для их реализации. Требования к колесным движителям средств химизации весьма различные и противоречивые. При обработке полей в ранний весенний период на почвах с высокой влажностью и движении по посевам озимых в разных стадиях роста, движители должны

не только удовлетворять требованиям по урону контактного давления, но и обеспечивать минимальное сопротивление качению. Одно из главных жестких требований к колесному движителю средств химизации при проведении подкормки озимых культур и обработке полей гербицидами заключается в том, что они не должны повреждать культурные растения при их обработке.

Первые исследования, посвященные воздействию движителей на растительный покров, были проведены в СНФ ВИМ на самоходных машинах химизации МХТ-6 и МХТ-14 [109]. В работе приведена методика проведения полевого эксперимента, учитывающая сравнение густоты стояния растений, влажность почвы и биологическую урожайность. Отмечено значительное влияние экспериментального агрегата на жизнеспособность озимой пшеницы по следу колес, их сильное отставание в развитии и снижение урожайности в 2 раза, по сравнению с контрольными участками. Более комплексный подход к изучению проблем взаимодействия движителя с растениями и переуплотнения почв рассматривался Русановым В.А. [108], методика которого развивала исследования, проводимые в СНФ ВИМ.

Исследования воздействия шин сверхнизкого давления на растительный покров производились и на серийных МЭС при проведении технологических операций ранней весной. Так сравнительные полевые исследования воздействия шин сверхнизкого давления на почвенно-растительный покров при производстве семян подсолнечника при использовании УТЭС-271 «Барс» показывают рост урожайности на 41,2% [119]. Влияние параметров уплотнения почв и механического повреждения стеблей и корневой системы растений на снижение урожайности рассматривалось Поливаевым О.И. в Воронежском государственном аграрном университете. Результаты проведенного полевого эксперимента при внесении минеральных удобрений самоходным разбрасывателем УТЭС-271 «Барс», оборудованного шинами сверхнизкого давления, свидетельствуют об отсутствии повреждения растений озимой пшеницы в фазе кущения [93, 103].

Теоретические исследования проблемы влияния шин мобильных средств на растения проводились Н.Д. Янцовым и А.Г. Вабищевичем в Белорусском государственном аграрном техническом университете. Ими рассматривалась проблема

недобора урожайности сельскохозяйственных культур за счет механических повреждений движителем при выполнении технологических операций, обосновывалось влияние буксования колес и типа рисунка протектора на почву [128]. Теоретические исследования характера взаимодействия колесного движителя с культурными растениями на основе SPH-метода динамики частиц приведены в работе [100]. В работе учитывались фазы роста растений и степень их повреждаемости при однократном перекачивании колеса с различными этапами взаимодействия. Однако полная верификация разработанной модели была проведена не в полной мере.

Таким образом, мобильные средства химизации, оборудованные шинами сверхнизкого давления, обеспечивают сохранность посевов при ранневесенней обработке полей пестицидами и проведении подкормки. Однако, механическое повреждение растений в результате воздействия колесного движителя ранее другими исследователями производилась только в результате полевых экспериментов. Существующие теоретические исследования проводились без учета сравнения и их верификации с экспериментальными данными. Поэтому, проблема воздействия колесного движителя на растительный покров изучена недостаточно и требует более тщательного рассмотрения, учитывающего комплексные теоретические и экспериментальные исследования.

### 1.5 Выводы по главе 1

1. Выполнен анализ конструктивных схем существующих мобильных энергетических средств на шинах сверхнизкого давления и самоходных штанговых опрыскивателей, выполненных на их базе установлено

2. Установлено, что основными критериями для повышения их производительности является увеличение грузоподъемности и ширины захвата штанг, что также влечет за собой увеличение числа опорных колес и расширение базы шасси.

3. Определено отсутствие на рынке сельскохозяйственной техники нет достаточно эффективных самоходных опрыскивателей малой грузоподъемности, с колесной формулой 4x4 и вынесенной вперед кабиной оператора за ось передних

колес, позволяющей равномерно распределить нагрузку между ведущими мостами шасси опрыскивателя

4. Проанализированы возможные пути снижения динамической нагруженности системы поддрессоривания, улучшения плавности хода МЭС и обеспечения более эффективной виброзащиты рабочего места оператора.

5. Выполнен анализ существующих математических моделей мобильных средств, определены их достоинства и недостатки.

6. Установлено сниженное воздействие шин сверхнизкого давления при повреждении почвенно-растительного покрова в процессе эксплуатации мобильных энергетических средств.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА НА ШИНАХ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

### 2.1 Разработка математической модели мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем

#### 2.1.1 Общие положения модели

В рамках данной работы разработана трехмерная восьмимассовая модель мобильного средства, движущегося по неровной опорной поверхности (рисунок 2.1). Несмотря на простоту, модель позволяет передать основные особенности колебательного движения мобильного средства и оценить влияние характера неровностей на виброн нагруженность мобильного средства и штанг опрыскивателя [55].

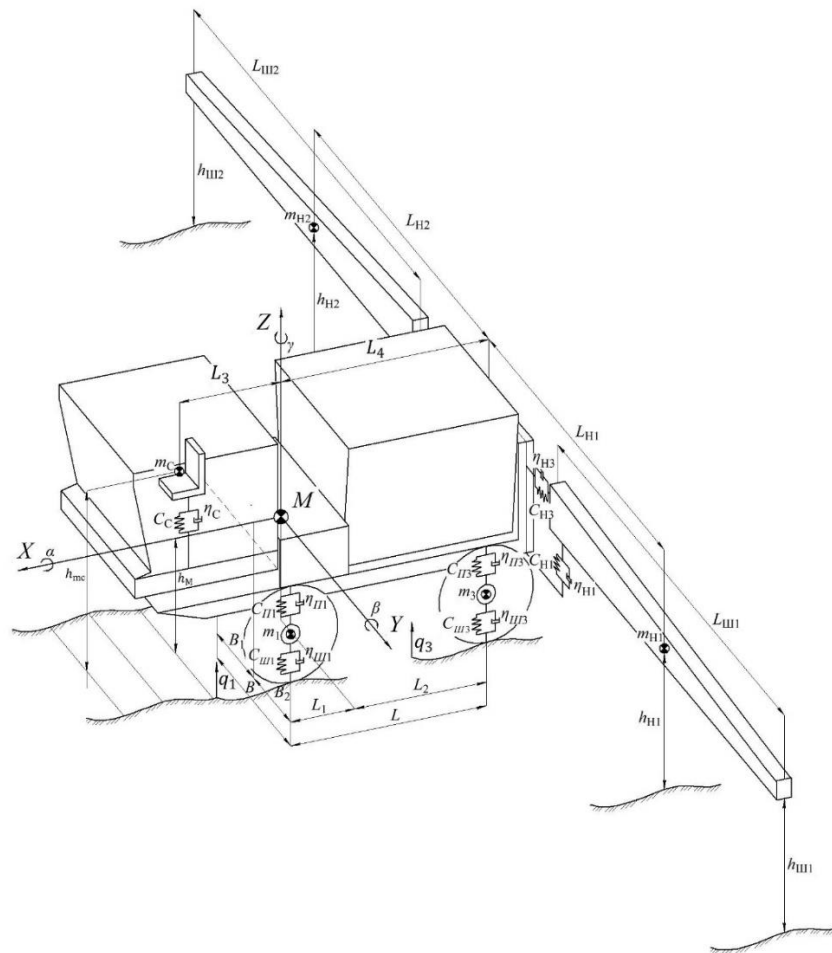


Рисунок 2.1 – Расчетная схема для построения трехмерной динамической модели МЭС-600 (показаны только колеса левого борта)

В модели колеса мобильного средства приведены к точечной массе  $m$ . Корпус мобильного средства считается абсолютно твердым телом и характеризуется массой  $M$ , моментом инерции относительно центра тяжести  $J$ . Колеса в модели считаются материальными точками, движущимися относительно корпуса вдоль оси  $OZ$ . Положение мобильного средства в пространстве характеризуется декартовыми координатами его центра тяжести  $(X, Y, Z)$  (указан точкой в нижней части корпуса на рисунке 2.1), а также углами отклонения локальной системы координат от общей базовой  $(\alpha, \beta, \gamma)$ . Шины задаются упруго-вязким взаимодействием между опорной поверхностью и центром колес. Упругое взаимодействие характеризуется коэффициентом жесткости  $c_{ш}$ , вязкое взаимодействие характеризуется коэффициентом демпфирования  $d_{ш}$ . По мере движения колеса по опорной поверхности вертикальная координата точки контакта с опорной поверхностью изменяется, то есть является функцией. Для случайной неровной поверхности данная функция представляется линейной комбинацией элементарных гауссовых функций. Появление упруго-вязких сил между опорной поверхностью и центрами колес вызывает движение центра корпуса МЭС что, в свою очередь, и, далее, – движение кресла водителя. Движение мобильного средства в модели описывается системой дифференциальных уравнений (2.1), составленной на базе основных законов динамики поступательного и вращательного движения.

Для разработки колебательной системы мобильного средства сделаем следующие допущения:

- колебания кузова и колес малые;
- характеристики всех элементов линейны;
- рама (неподдрессоренная масса) в местах крепления с подвеской и по всей длине представляет собой жесткое тело;
- контакт колес с поверхностью качения точечный, безотрывный;
- перемещение всех масс происходит только в вертикальной плоскости;
- масса на сиденье оператора включает в себя массу водителя.

$$\left\{ \begin{aligned}
m_1 \ddot{\xi}_1 &= \eta_{III1} (\dot{\xi}_1 - \dot{q}_1) + C_{III1} (\xi_1 - q_1) + \eta_{III1} (\dot{Z} - \dot{\xi}_1 - L_1 \dot{\beta} - B_2 \dot{\alpha}) + C_{III1} (Z - \xi_1 - L_1 \beta - B_2 \alpha); \\
m_2 \ddot{\xi}_2 &= \eta_{III2} (\dot{\xi}_2 - \dot{q}_2) + C_{III2} (\xi_2 - q_2) + \eta_{III2} (\dot{Z} - \dot{\xi}_2 - L_1 \dot{\beta} - B_1 \dot{\alpha}) + C_{III2} (Z - \xi_2 - L_1 \beta - B_1 \alpha); \\
m_3 \ddot{\xi}_3 &= \eta_{III3} (\dot{\xi}_3 - \dot{q}_3) + C_{III3} (\xi_3 - q_3) + \eta_{III3} (\dot{Z} - \dot{\xi}_3 - L_2 \dot{\beta} - B_2 \dot{\alpha}) + C_{III3} (Z - \xi_3 - L_2 \beta - B_2 \alpha); \\
m_4 \ddot{\xi}_4 &= \eta_{III4} (\dot{\xi}_4 - \dot{q}_4) + C_{III4} (\xi_4 - q_4) + \eta_{III4} (\dot{Z} - \dot{\xi}_4 - L_2 \dot{\beta} - B_1 \dot{\alpha}) + C_{III4} (Z - \xi_4 - L_2 \beta - B_1 \alpha); \\
m_c \ddot{z}_c &= C_c (z_c - Z - L_3 \alpha) + \eta_c (\dot{z}_c - \dot{Z} - L_3 \dot{\alpha}); \\
m_{H1} \ddot{z}_{H1} &= \eta_{H1} (\dot{Z} - \dot{z}_{H1} - L_{H1} \dot{\alpha} - L_4 \dot{\beta}) + C_{H1} (Z - z_{H1} - L_{H1} \alpha - L_4 \beta); \\
m_{H2} \ddot{z}_{H2} &= \eta_{H2} (\dot{Z} - \dot{z}_{H2} - L_{H2} \dot{\alpha} - L_4 \dot{\beta}) + C_{H2} (Z - z_{H2} - L_{H2} \alpha - L_4 \beta); \\
M \ddot{Z} &= C_{III1} (Z - \xi_1 - L_1 \beta - B_2 \alpha) + C_{III2} (Z - \xi_2 - L_1 \beta - B_1 \alpha) + C_{III3} (Z - \xi_3 - L_2 \beta - B_2 \alpha) + \\
&+ C_{III4} (Z - \xi_4 - L_2 \beta - B_1 \alpha) + \eta_{III1} (\dot{Z} - \dot{\xi}_1 - L_1 \dot{\beta} - B_2 \dot{\alpha}) + \eta_{III2} (\dot{Z} - \dot{\xi}_2 - L_1 \dot{\beta} - B_1 \dot{\alpha}) + \\
&+ \eta_{III3} (\dot{Z} - \dot{\xi}_3 - L_2 \dot{\beta} - B_2 \dot{\alpha}) + \eta_{III4} (\dot{Z} - \dot{\xi}_4 - L_2 \dot{\beta} - B_1 \dot{\alpha}) - C_c (z_c - Z + L_3 \alpha) - \\
&- \eta_c (\dot{z}_c - \dot{Z} + L_3 \dot{\alpha}) - \eta_{H1} (\dot{Z} - \dot{z}_{H1} - L_{H1} \dot{\alpha} - L_4 \dot{\beta}) - C_{H1} (Z - z_{H1} - L_{H1} \alpha - L_4 \beta) - \\
&- \eta_{H2} (\dot{Z} - \dot{z}_{H2} - L_{H2} \dot{\alpha} - L_4 \dot{\beta}) - C_{H2} (Z - z_{H2} - L_{H2} \alpha - L_4 \beta); \\
J_Y \ddot{\alpha} &= C_{III3} B_2 (Z - \xi_3 - L_2 \beta - B_2 \alpha) + \eta_{III3} B_2 (\dot{Z} - \dot{\xi}_3 - L_2 \dot{\beta} - B_2 \dot{\alpha}) + \\
&+ C_{III4} B_1 (Z - \xi_4 - L_2 \beta - B_1 \alpha) + \eta_{III4} B_1 (\dot{Z} - \dot{\xi}_4 - L_2 \dot{\beta} - B_1 \dot{\alpha}) + C_{III1} B_2 (Z - \xi_1 - L_1 \beta - B_2 \alpha) + \\
&+ C_{III2} B_1 (Z - \xi_2 - L_1 \beta - B_1 \alpha) + \eta_{III1} B_2 (\dot{Z} - \dot{\xi}_1 - L_1 \dot{\beta} - B_2 \dot{\alpha}) + \eta_{III2} B_1 (\dot{Z} - \dot{\xi}_2 - L_1 \dot{\beta} - B_1 \dot{\alpha}) + \\
&+ C_{H1} L_{H1} (Z - z_{H1} - L_{H1} \alpha - L_4 \beta) + \eta_{H1} L_{H1} (\dot{Z} - \dot{z}_{H1} - L_{H1} \dot{\alpha} - L_4 \dot{\beta}) + \\
&+ C_{H2} L_{H2} (Z - z_{H2} - L_{H2} \alpha - L_4 \beta) + \eta_{H2} L_{H2} (\dot{Z} - \dot{z}_{H2} - L_{H2} \dot{\alpha} - L_4 \dot{\beta}); \\
J_X \ddot{\beta} &= C_{III3} L_2 (Z - \xi_3 - L_2 \beta - B_2 \alpha) + \eta_{III3} L_2 (\dot{Z} - \dot{\xi}_3 - L_2 \dot{\beta} - B_2 \dot{\alpha}) + \\
&+ C_{III4} L_2 (Z - \xi_4 - L_2 \beta - B_1 \alpha) + \eta_{III4} L_2 (\dot{Z} - \dot{\xi}_4 - L_2 \dot{\beta} - B_1 \dot{\alpha}) + C_{III1} L_1 (Z - \xi_1 - L_1 \beta - B_2 \alpha) + \\
&+ C_{III2} L_1 (Z - \xi_2 - L_1 \beta - B_1 \alpha) + \eta_{III1} L_1 (\dot{Z} - \dot{\xi}_1 - L_1 \dot{\beta} - B_2 \dot{\alpha}) + \eta_{III2} L_1 (\dot{Z} - \dot{\xi}_2 - L_1 \dot{\beta} - B_1 \dot{\alpha}) + \\
&+ C_{H1} L_4 (Z - z_{H1} - L_{H1} \alpha - L_4 \beta) + \eta_{H1} L_4 (\dot{Z} - \dot{z}_{H1} - L_{H1} \dot{\alpha} - L_4 \dot{\beta}) + C_c L_3 (z_c - Z - L_3 \alpha) + \\
&+ C_{H2} L_4 (Z - z_{H2} - L_{H2} \alpha - L_4 \beta) + \eta_{H2} L_4 (\dot{Z} - \dot{z}_{H2} - L_{H2} \dot{\alpha} - L_4 \dot{\beta}) + \eta_c L_3 (\dot{z}_c - \dot{Z} - L_3 \dot{\alpha}).
\end{aligned} \right. \quad (2.1)$$

где  $M$  – центр подрессоренной массы;  $J_X, J_Y, J_Z$  – момент инерции подрессоренной массы;  $X, Y, Z$  – вертикальное, продольное и поперечное положение центра масс МЭС соответственно;  $\alpha, \beta, \gamma$  – угла поворота подрессоренной массы относительно центра масс по оси  $X, Y$  и  $Z$  соответственно;  $m_1, m_2, m_3$  и  $m_4$  – неподдресоренные массы, приходящиеся на передние и задние колеса правого и левого борта соответственно;  $m_c$  – масса сиденья с оператором;  $m_{H1}$  и  $m_{H2}$  – центры масс штанг

опрыскивателя;  $L$  – база мобильного средства;  $L_1$  и  $L_2$  – расстояния от центра масс подрессоренной массы до осей передних и задних колес по горизонтали;  $L_3$  – расстояние от центра масс до сиденья с оператором;  $L_4$  – расстояние от центра масс МЭС до оси расположения масс навески;  $L_{H1}$  и  $L_{H2}$  – расстояние от центра масс мобильного средства до центра масс штанг в плоскости  $YZ$ ;  $L_{Ш1}$  и  $L_{Ш2}$  – длина штанг от места крепления к раме;  $B$  – колея мобильного средства;  $B_1$  и  $B_2$  – расстояния от центра масс подрессоренной массы до осей колес правого и левого борта соответственно;  $h_m$  – высота до центра подрессоренной массы от опорной поверхности;  $h_{mc}$  – высота до центра масс сиденья с оператором от опорной поверхности;  $h_{H1}$  и  $h_{H2}$  – высота от центра масс каждой штанги до опорного основания;  $h_{Ш1}$  и  $h_{Ш2}$  – расстояние от края каждой штанги до опорного основания;  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  и  $\zeta_4$  – вертикальное положение неподдресоренных масс колес;  $q_1, q_2, q_3$  и  $q_4$  – текущие по времени значения ординат микропрофиля поверхности в контакте с колесом;  $z_C$  – вертикальное положение массы сиденья с оператором;  $z_{H1}$  и  $z_{H2}$  – вертикальное положение центра масс каждой штанги;  $Z$  – вертикальное положение центра масс подрессоренной массы;  $C_{Ш1}, C_{Ш2}, C_{Ш3}$  и  $C_{Ш4}$  – коэффициенты нормальной жесткости шин;  $C_{П1}, C_{П2}, C_{П3}$  и  $C_{П4}$  – коэффициенты вертикальной жесткости подвески;  $\eta_{П1}, \eta_{П2}, \eta_{П3}$  и  $\eta_{П4}$  – коэффициенты неупругого сопротивления амортизаторов подвески;  $\eta_{Ш1}, \eta_{Ш2}, \eta_{Ш3}$  и  $\eta_{Ш4}$  – коэффициенты неупругого сопротивления шин;  $\eta_C$  – коэффициенты неупругого сопротивления на сиденье;  $C_C$  – коэффициенты вертикальной жесткости сиденья;  $\eta_{H1}, \eta_{H2}, \eta_{H3}, \eta_{H4}$  – коэффициенты неупругого сопротивления колебаниям штанг опрыскивателя;  $C_{H1}, C_{H2}, C_{H3}, C_{H4}$  – коэффициенты жесткости колебания штанг опрыскивателя.

Таблица 2.1 – Основные параметры модели

№ п/п	Параметр	Значение	Комментарии
1	$M$	1025 кг	подрессоренная масса МЭС
2	$m_1 = m_2 = m_3 = m_4$	72 кг	неподрессоренная масса колес МЭС
3	$m_{H1} = m_{H2}$	46 кг	масса штанг опрыскивателя
4	$m_c$	80 кг	масса сиденья с оператором
5	$L$	2200 мм	база мобильного средства
6	$L_1$	764 мм	расстояние от центра масс подрессоренной массы до оси передних колес
7	$L_2$	1436 мм	расстояние от центра масс подрессоренной массы до оси задних колес
8	$L_3$	1026 мм	расстояние от центра масс до сиденья с оператором
9	$L_4$	2048 мм	расстояние от центра масс МЭС до оси расположения масс навески
10	$L_{H1} = L_{H2}$	4360 мм	расстояние от центра масс мобильного средства до центра масс штанг в плоскости YZ
11	$B$	1610 мм	колея мобильного средства
12	$B_1 = B_2$	805 мм	расстояния от центра масс подрессоренной массы до осей колес правого и левого борта
13	$h_m$	1065 мм	высота до центра подрессоренной массы от опорной поверхности в состоянии покоя
14	$h_{mc}$	1290 мм	высота до центра масс сиденья с оператором от опорной поверхности в состоянии покоя
15	$h_{H1} = h_{H2}$	1240 мм	высота от центра масс каждой штанги до опорного основания в состоянии покоя
16	$h_{Ш1} = h_{Ш2}$	1150 мм	расстояние от края каждой штанги до опорного основания в состоянии покоя
17	$C_{Ш1} = C_{Ш2} = C_{Ш3} = C_{Ш4}$	92,6 кН/м	коэффициент нормальной жесткости шин
18	$C_{П1} = C_{П2} = C_{П3} = C_{П4}$	61,5 кН/м	коэффициент вертикальной жесткости подвески
19	$\eta_{П1} = \eta_{П2} = \eta_{П3} = \eta_{П4}$	18,6 кН с/м	коэффициенты неупругого сопротивления амортизаторов подвески
20	$C_c$	24,8 кН/м	коэффициенты вертикальной жесткости сиденья
21	$C_{H1} = C_{H2} = C_{H3} = C_{H4}$	423 кН/м	коэффициенты жесткости колебания штанг опрыскивателя

### 2.1.2 Моделирование прямолинейного движения мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем

Для первых оценочных исследований использовали упрощенную модель колеса: считали, что изменение расстояния от корпуса до опорной поверхности связано с одновременной, эффективной, работой шины и подвески (рисунок 2.2).

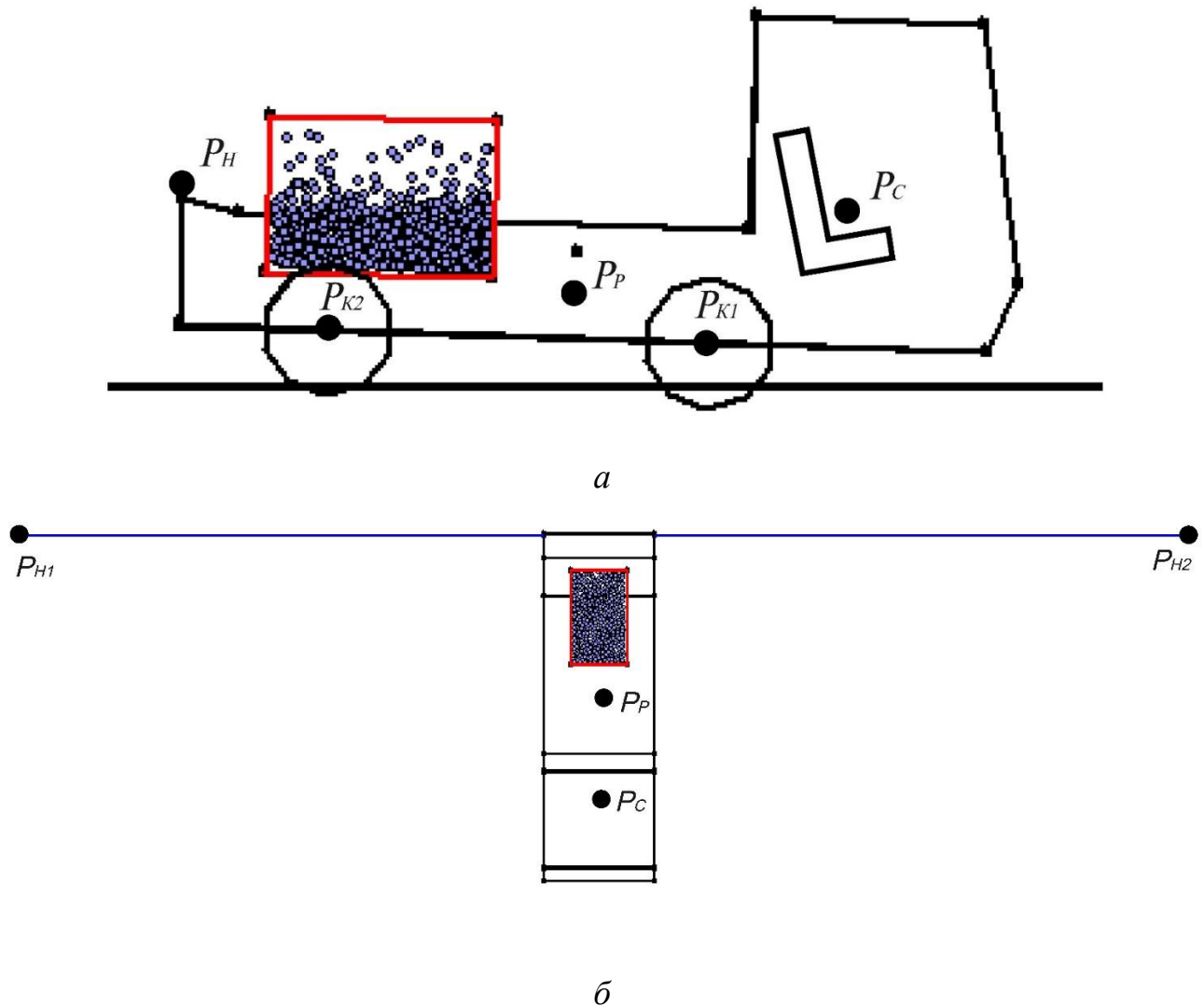


Рисунок 2.2 – Представление мобильного средства в модели: *a* – проекция XZ; *б* – проекция XY.  $P_C$ ,  $P_P$ ,  $P_H$ ,  $P_K$  – точки измерения ускорения сиденья, рамы, навески и колёс соответственно

Для первых оценочных исследований использовали упрощенную модель колеса: считали, что изменение расстояния от корпуса до опорной поверхности связано с одновременной, эффективной, работой шины и подвески [117]. Основная

сила (сила опоры) со стороны колеса на корпус мобильного средства рассчитывалась в приближении вязкоупругого взаимодействия:

$$F_i^z = c_i (z_{\Pi i}(x_i, y_i) + R_K - z_{Ki}) - d_i \left( \frac{\partial z_{\Pi i}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{Ki}}{\partial t} \right), \quad (2.2)$$

где  $i$  – индекс колеса;  $z_{\Pi i}(x, y)$  – вертикальная координата поверхности под колесом, равная координате нижней точки колеса;  $z_{Ki}$  – вертикальная координата точки крепления колеса к корпусу;  $R_K$  – радиус колеса;  $c_i$ ,  $d_i$  – коэффициенты жесткости и демпфирования вязкоупругого взаимодействия.

Моделирование движения жидкости в бункере производится в трехмерном пространстве. Жидкость представляется совокупностью элементов круглой формы (рисунок 2.3).

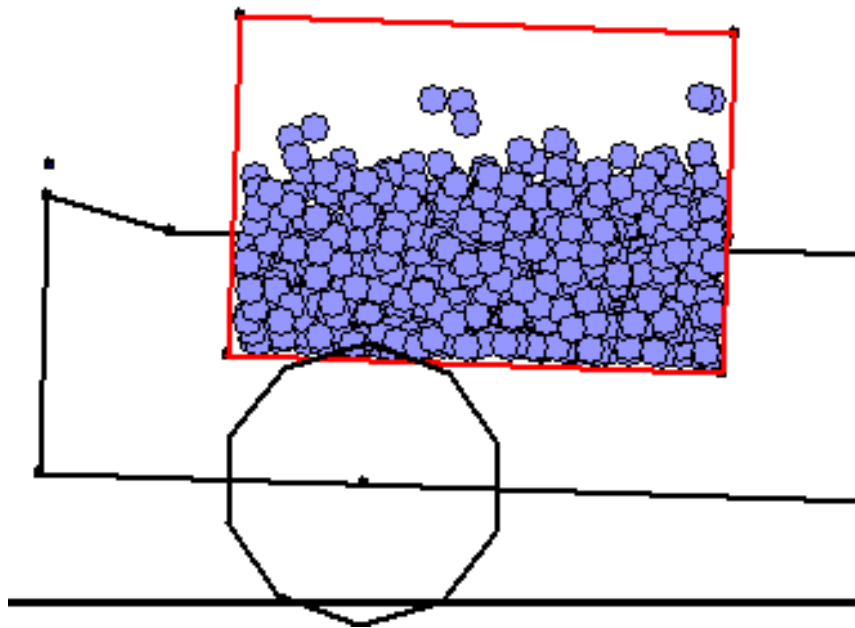


Рисунок 2.3 – Представление в модели бункера с технологической жидкостью

Характер взаимодействия элементов считается вязкоупругим. Свойства среды (объемная плотность, модуль упругости, внутреннее трение, поверхностное натяжение) были пересчитаны в свойства отдельных элементов [42]. Движение элементов в пространстве описывается вторым законом Ньютона. Численное

интегрирование уравнений движения производится модифицированным методом Эйлера-Коши. Количество элементов в модели составляет от 150 до 100000, в зависимости от выбранной детализации и разумного времени компьютерных вычислений.

Движение каждого элемента в пространстве описывается вторым законом Ньютона:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\text{Э}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{Э}}} \left( \left( \left\{ \begin{array}{l} c(d_{\text{Э}} - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}}, \quad r_{ij} < d_0 \\ 0, \quad r_{ij} \geq d_0 \end{array} \right\} + k(r_{ij} - d_0)(v_{xi} - v_{xj}) \right); \\ m_{\text{Э}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{Э}}} \left( \left( \left\{ \begin{array}{l} c(d_{\text{Э}} - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}}, \quad r_{ij} < d_0 \\ 0, \quad r_{ij} \geq d_0 \end{array} \right\} + k(r_{ij} - d_0)(v_{yi} - v_{yj}) \right); \\ m_{\text{Э}} \frac{d^2 z_i}{dt^2} = -m_{\text{Э}} g + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{Э}}} \left( \left( \left\{ \begin{array}{l} c(d_{\text{Э}} - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}}, \quad r_{ij} < d_0 \\ 0, \quad r_{ij} \geq d_0 \end{array} \right\} + k(r_{ij} - d_0)(v_{zi} - v_{zj}) \right), \end{array} \right. \quad (2.3)$$

где  $m_{\text{Э}}$  и  $d_{\text{Э}}$  – масса и диаметр элемента;  $x_i, y_i, z_i$  – декартовы координаты элемента;  $t$  – время;  $N_{\text{Э}}$  – количество элементов;  $c$  и  $k$  – параметры вязкоупругого взаимодействия (коэффициенты жесткости и вязкости);  $r_{ij}$  – расстояние между центрами двух элементов  $i$  и  $j$ ;  $d_0$  – расстояние ограничения взаимодействия;  $v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}$  – декартовы координаты элемента; Дополнительно к силовому взаимодействию между элементами добавляется взаимодействие со стенками бака, которое описывается аналогичным образом в упруго-вязком приближении.

Часть исследований разворота мобильного средства проведены для опорной поверхности со случайной возмущающей функции  $z(x)$ , где  $x$  – горизонтальная координата. Так как в модели напрямую координата  $x$  не участвует, она пересчитывается во время контакта колес передней или задней оси с данной точкой поверхности по формуле  $x = v t$ .

Наиболее естественным с точки зрения физики и геометрии аналитическим представлением функции поверхности является суперпозиция большого количества гауссовых пиков:

$$z(t) = \sum_{i=1}^{N_n} H_i \exp\left(-\frac{(v \cdot t - x_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (2.4)$$

где  $N_n$  – количество неровностей гауссовой формы на контрольном участке заданной длины  $L_k$ ;  $H_i$  – высота  $i$ -й неровности;  $x_i$  – координата центра  $i$ -й неровности;  $\sigma_i$  – характерная ширина  $i$ -й неровности (имеет смысл среднеквадратичного отклонения).

Для исследуемых дорожно-грунтовых условий можно задать линейную плотность неровностей  $\lambda = N_n / L_k$ , а также функции распределение случайных геометрических параметров неровностей [54]. Данные параметры обычно приведены в таблицах основных геометрических параметров и функций распределения высот неровностей и протяженностей прямолинейных участков. Примеры сгенерированных поверхностей с неровностями различных параметров представлены на рисунке 2.4.

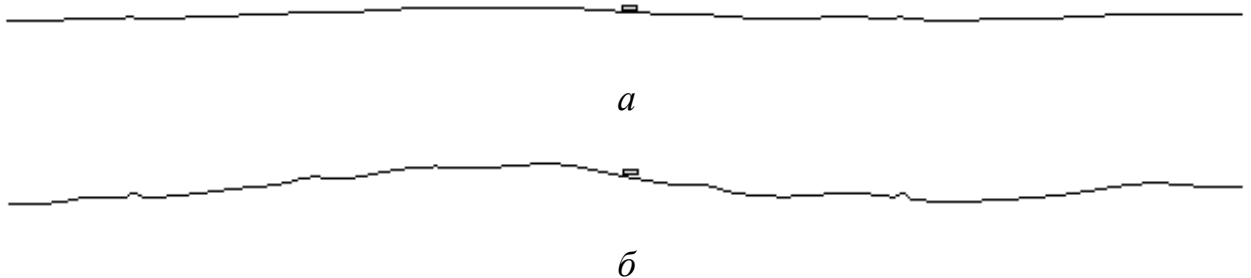


Рисунок 2.4 – Рельеф поверхности при различной средней высоте неровностей  $H_p$ :  
 $a - H_p = 0,02$  м;  $b - H_p = 0,1$  м. Прямоугольником отмечено пятно контакта колес передней оси с опорной поверхностью

Механическое движение мобильного средства в рамках данной модели описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка. Для решения системы уравнений используется численный метод Рунге-Кутты второго порядка, являющийся универсальным, позволяющим достигнуть необходимой точности за малое время компьютерных вычислений, являющийся относительно простым при программной реализации.

Численное решение дифференциальных уравнений заключается в дискретизации времени  $t$  на равные шаги, нумеруемые переменной  $\tau$ , с длительностью шага  $\Delta t$ . На каждом шаге интегрирования рассчитываются силы, действующие на тела, то есть «правые части» дифференциальных уравнений, представляющие собой возмущающие функции. После этого, по известным координатам и скоростям движения тел на текущем шаге интегрирования  $\tau$  рассчитываются координаты и скорости тел на следующем шаге интегрирования  $\tau + 1$ .

В частности, для декартовой компоненты  $x$  численное интегрирование уравнений движения определенного тела в рамках рассматриваемого метода производится следующим образом.

$$\begin{cases} x_{\tau+1} = x_{\tau} + v_{x\tau} \cdot \Delta t + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \\ v_{x\tau+1} = v_{x\tau} + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \Delta t, \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $x_{\tau}$  и  $v_{x\tau}$  – координата и скорость движения тела массой  $m$  вдоль декартового направления  $x$  на предыдущем шаге интегрирования по времени  $\tau$ ;  $x_{\tau}$  и  $v_{x\tau}$  – то же, на последующем шаге интегрирования по времени  $\tau + 1$ . Аналогично, численное интегрирование выполняется для второго декартового компонента  $y$ , при этом интегрирование производится для восьми тел: рамы МЭС, четырех колес, кресла с водителем и навески штанг опрыскивателя.

В результате решения дифференциальных уравнений численным методом получают таблично заданные функции зависимости от времени координат центров масс тел (а также угла ориентации корпуса мобильного средства). Эти функции анализируются далее для оценки показателей разворота.

Для количественной характеристики плавности хода и оценки эффекта от изменения характера упругих элементов подвески используются следующие функции и показатели.

Непосредственно в результате моделирования движения МЭС получаются функции зависимости от времени координат центров масс  $z$  исследуемых тел: кресла с водителем  $z_{\text{в}}(t)$ , корпуса  $z_{\text{а}}(t)$ , колес  $z_{\text{к}}(t)$ . По данным функциям можно оценить амплитуду перемещения и эффект оснащения подвески упругими элементами с прогрессивной или регрессивной характеристиками.

Также, плавность хода оценивалась по зависимостям от времени вертикальных ускорений тел: кресла с водителем  $\ddot{z}_{\text{в}}(t)$ , корпуса  $\ddot{z}_{\text{а}}(t)$ , колес  $\ddot{z}_{\text{к}}(t)$ . По амплитуде изменения данных функций можно судить о резкости движения кресла водителя и несущей системы мобильного средства в вертикальном направлении.

Разработанная модель позволяет определить показатели, количественно характеризующие вибронегруженность мобильного средства и штанг опрыскивателя. В качестве основных показателей вибронегруженности выбраны максимальные за время компьютерного эксперимента значения вертикальных компонентов ускорения в контрольных точках ( $P_{\text{с}}$ ,  $P_{\text{р}}$ ,  $P_{\text{н}}$  на рисунке 2.2).

$$a_{\text{с}} = \max_{\tau=0 \dots \left[ \frac{t_{\text{кэ}}}{\Delta t} \right]} \frac{z_{P_{\text{с}}}^{\tau-1} - 2z_{P_{\text{с}}}^{\tau} + z_{P_{\text{с}}}^{\tau+1}}{(\Delta t)^2}; \quad (2.6)$$

$$a_{\text{р}} = \max_{\tau=0 \dots \left[ \frac{t_{\text{кэ}}}{\Delta t} \right]} \frac{z_{P_{\text{р}}}^{\tau-1} - 2z_{P_{\text{р}}}^{\tau} + z_{P_{\text{р}}}^{\tau+1}}{(\Delta t)^2}; \quad (2.7)$$

$$a_{\text{н}} = \max_{\tau=0 \dots \left[ \frac{t_{\text{кэ}}}{\Delta t} \right]} \frac{z_{P_{\text{н}}}^{\tau-1} - 2z_{P_{\text{н}}}^{\tau} + z_{P_{\text{н}}}^{\tau+1}}{(\Delta t)^2}; \quad (2.8)$$

$$a_{\text{к1}} = \max_{\tau=0 \dots \left[ \frac{t_{\text{кэ}}}{\Delta t} \right]} \frac{z_{P_{\text{к1}}}^{\tau-1} - 2z_{P_{\text{к1}}}^{\tau} + z_{P_{\text{к1}}}^{\tau+1}}{(\Delta t)^2}; \quad (2.9)$$

$$a_{\text{к2}} = \max_{\tau=0 \dots \left[ \frac{t_{\text{кэ}}}{\Delta t} \right]} \frac{z_{P_{\text{к2}}}^{\tau-1} - 2z_{P_{\text{к2}}}^{\tau} + z_{P_{\text{к2}}}^{\tau+1}}{(\Delta t)^2}; \quad (2.10)$$

$$a_{\text{к3}} = \max_{\tau=0 \dots \left[ \frac{t_{\text{кэ}}}{\Delta t} \right]} \frac{z_{P_{\text{к3}}}^{\tau-1} - 2z_{P_{\text{к3}}}^{\tau} + z_{P_{\text{к3}}}^{\tau+1}}{(\Delta t)^2}; \quad (2.11)$$

$$a_{\text{к4}} = \max_{\tau=0 \dots \left[ \frac{t_{\text{кэ}}}{\Delta t} \right]} \frac{z_{P_{\text{к4}}}^{\tau-1} - 2z_{P_{\text{к4}}}^{\tau} + z_{P_{\text{к4}}}^{\tau+1}}{(\Delta t)^2}. \quad (2.12)$$

где  $\tau$  и  $\Delta t$  – номер и величина шага интегрирования по времени уравнений движения;  $t_{кэ}$  – длительность компьютерного эксперимента;  $[ \dots ]$  – оператор выделения целой части числа;  $z_i^{\tau_{P_i}}$  – вертикальная координата контрольной точки мобильного средства  $P_i$  (индекс  $i$  может принимать значения «с» – сиденье, «р» – рама, «н» – навеска, «к» – колесо) на шаге интегрирования по времени  $\tau$ .

Для детального анализа характера колебаний МЭС в вертикальном направлении были рассчитаны спектры колебаний  $A_z(f)$  (амплитудно-частотные характеристики – АЧХ). Для расчета АЧХ производили Фурье-преобразование функции  $z_M(t)$  следующим образом:

$$A_i(f) = \sqrt{\left( \int_0^{t_{кэ}} z_i(t) \sin(2\pi ft) dt \right)^2 + \left( \int_0^{t_{кэ}} z_i(t) \cos(2\pi ft) dt \right)^2}, \quad (2.13)$$

где  $f$  – частота колебаний. Так как функции  $z_i(t)$  заданы таблично, интегралы в формуле для спектра рассчитываются численным методом – методом прямоугольников.

Аналогичным образом рассчитывался спектр вертикальных ускорений:

$$a_i(f) = \sqrt{\left( \int_0^{t_{кэ}} \ddot{z}_i(t) \sin(2\pi ft) dt \right)^2 + \left( \int_0^{t_{кэ}} \ddot{z}_i(t) \cos(2\pi ft) dt \right)^2}. \quad (2.14)$$

По расположению пиков на шкале частот спектра можно установить неблагоприятные частотные диапазоны, а по высоте пиков можно определить интенсивность неблагоприятного воздействия.

Для исследования разработанной математической модели разработана компьютерная программа "Программа для моделирования вибронагруженности штанг опрыскивателя мобильного средства на шинах сверхнизкого давления" на языке Object Pascal в среде программирования Borland Delphi 7 (рисунок 2.5).

Программа предназначена для проведения компьютерных экспериментов по движению мобильного средства на шинах сверхнизкого давления по опорной поверхности со случайными неровностями.

Программа позволяет исследовать влияние скорости и давления в шинах мобильного средства на ускорения сиденья, рамы и штанг опрыскивателя.

Программа применима для различных типов мобильных средств на шинах сверхнизкого давления в широком диапазоне параметров движения.

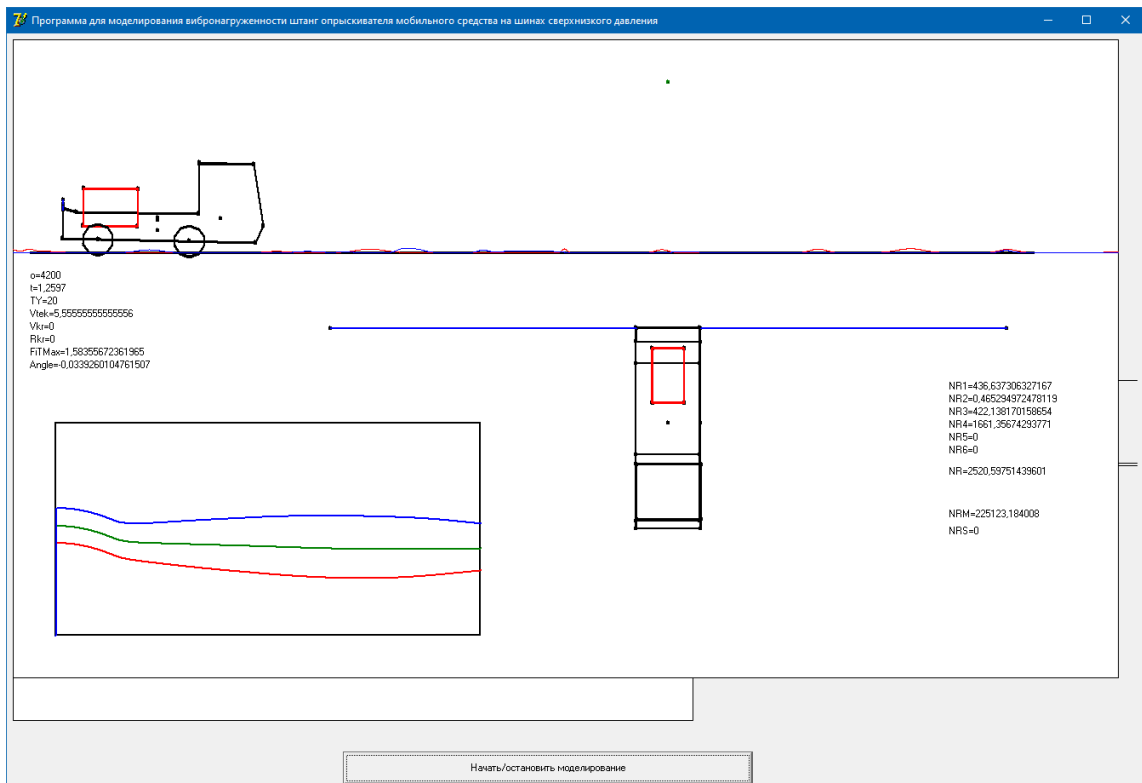


Рисунок 2.5 – Вывод на экран результатов моделирования в разработанной программе для ЭВМ

### 2.1.3 Результаты моделирования прямолинейного движения мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем

Для исследования вибронгруженности МЭС провели несколько серий компьютерных экспериментов. В каждом компьютерном эксперименте МЭС двигалось 400 м по опорной поверхности со случайными неровностями.

В качестве факторов использованы следующие два параметра мобильного средства (рисунок 2.6):

$P_w$  – давление воздуха в шинах;

$v_a$  – скорость движения мобильного средства.

$m_a$  – масса мобильного средства.

Получаемыми являются три показателя вибронгруженности – максимальные за время компьютерного эксперимента вертикальные ускорения:

$a_c$  – в месте расположения сидения водителя;

$a_p$  – на раме в центре тяжести МЭС;

$a_n$  – на подвеске в месте крепления штанг опрыскивателя.

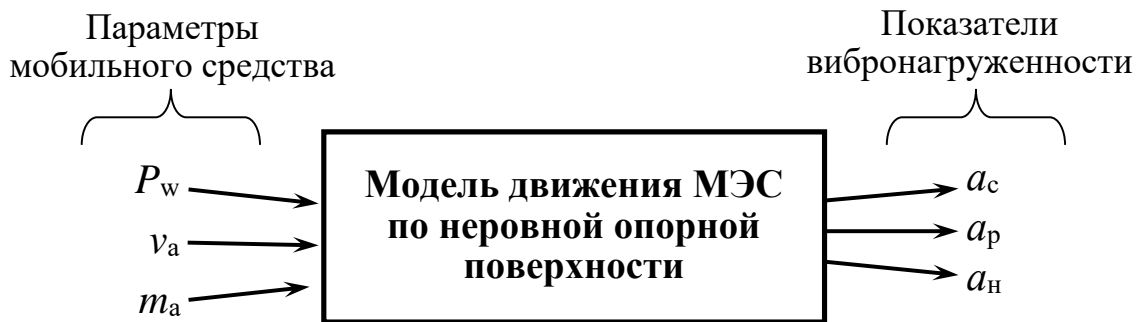


Рисунок 2.6 – Входные параметры и выходные показатели математической модели

Варьируя одновременно в компьютерных экспериментах три параметра мобильного средства, можно добиться различных значений максимальных ускорений  $a_c$ ,  $a_p$ ,  $a_n$ .

В начальный момент времени  $t = 0$  МЭС в модели размещалась над опорной поверхностью (около 0,4 м от нижней точки колес до поверхности). С началом интегрирования уравнений движения МЭС под действием силы тяжести начинала двигаться вниз, и в результате контакта с опорной поверхностью приходила в динамическое равновесие за время около 1 с. Из-за данного переходного процесса на графиках зависимости ускорений отдельных точек МЭС от времени (рисунок 2.7) наблюдаются пики большой амплитуды при  $t < 1$  с.

Оценку вибронгруженности МЭС производили по графикам зависимости от времени ускорений точек расположения сиденья водителя (рисунок 2.7, а), рамы (рисунок 2.7, б), навески (рисунок 2.7, в). Графики построены для давления воздуха

в шинах 40 кПа и скорости движения 6 м/с. По каждому графику определялось (автоматически в компьютерной программе) максимальное за время компьютерного эксперимента ускорение. В частности, для приведенных на рисунке 2.7 графиков, максимальные за время компьютерного эксперимента ускорения составляют: на сиденье  $a_c = 0,54 \text{ м/с}^2$ , на раме  $a_p = 0,75 \text{ мм/с}^2$ , на навеске  $a_n = 1,52 \text{ м/с}^2$ .

Полученные по отдельным графикам значения максимальных ускорений сиденья водителя, рамы и навески штанг опрыскивателя при движении по опорной поверхности со случайными неровностями объединили в таблице 2.2. Дополнительно, исходя из положения штанг опрыскивателя по крайним точкам определили амплитуду колебаний (рисунок 2.8).

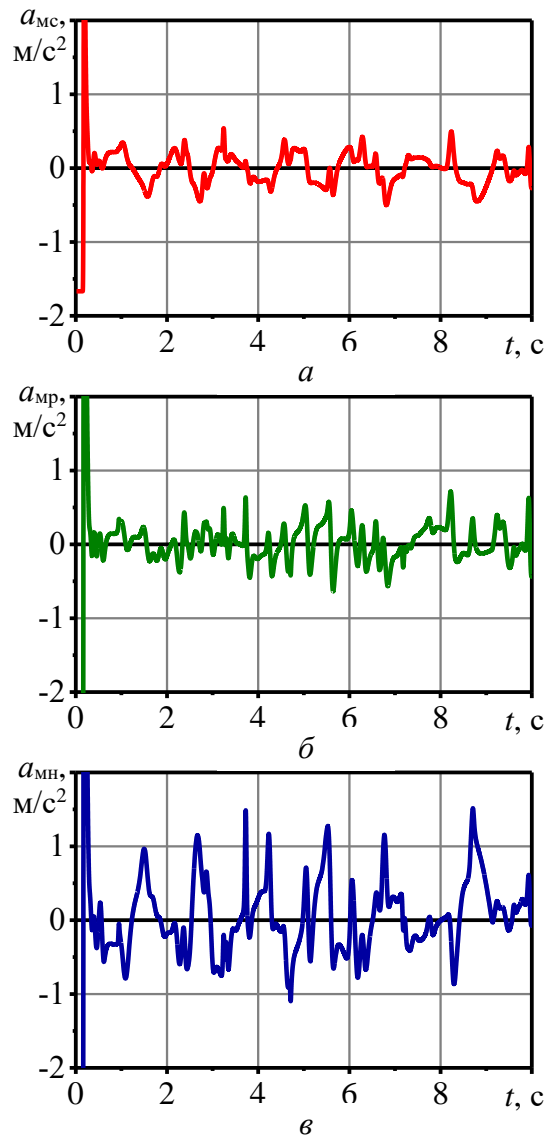


Рисунок 2.7 – Зависимость от времени мгновенного ускорения на сиденье водителя (а), раме (б), навеске (в)

Таблица 2.2 – Результаты компьютерного моделирования движения МЭС

№ комп. эксперимента	Заполнение бака опрыскивателя, %	Скорость движения МЭС $v_a$ , м/с	Макс. ускорение сиденья $a_c$ , м/с <sup>2</sup>	Макс. ускорение рамы $a_p$ , м/с <sup>2</sup>	Макс. ускорение навески $a_n$ , м/с <sup>2</sup>	Амплитуда колебаний штанг, мм
1	0	3	0,366	0,444	0,273	80
2	0	6	0,547	0,817	0,376	107
3	0	9	0,806	1,462	0,462	133
4	0	12	1,045	2,307	0,538	159
5	50	3	0,206	0,256	0,553	51
6	50	6	0,312	0,519	0,779	74
7	50	9	0,452	0,847	1,019	94
8	50	12	0,605	1,453	1,218	112
9	100	3	0,190	0,253	0,509	45
10	100	6	0,258	0,461	0,664	61
11	100	9	0,365	0,658	0,839	76
12	100	12	0,463	1,205	0,991	89

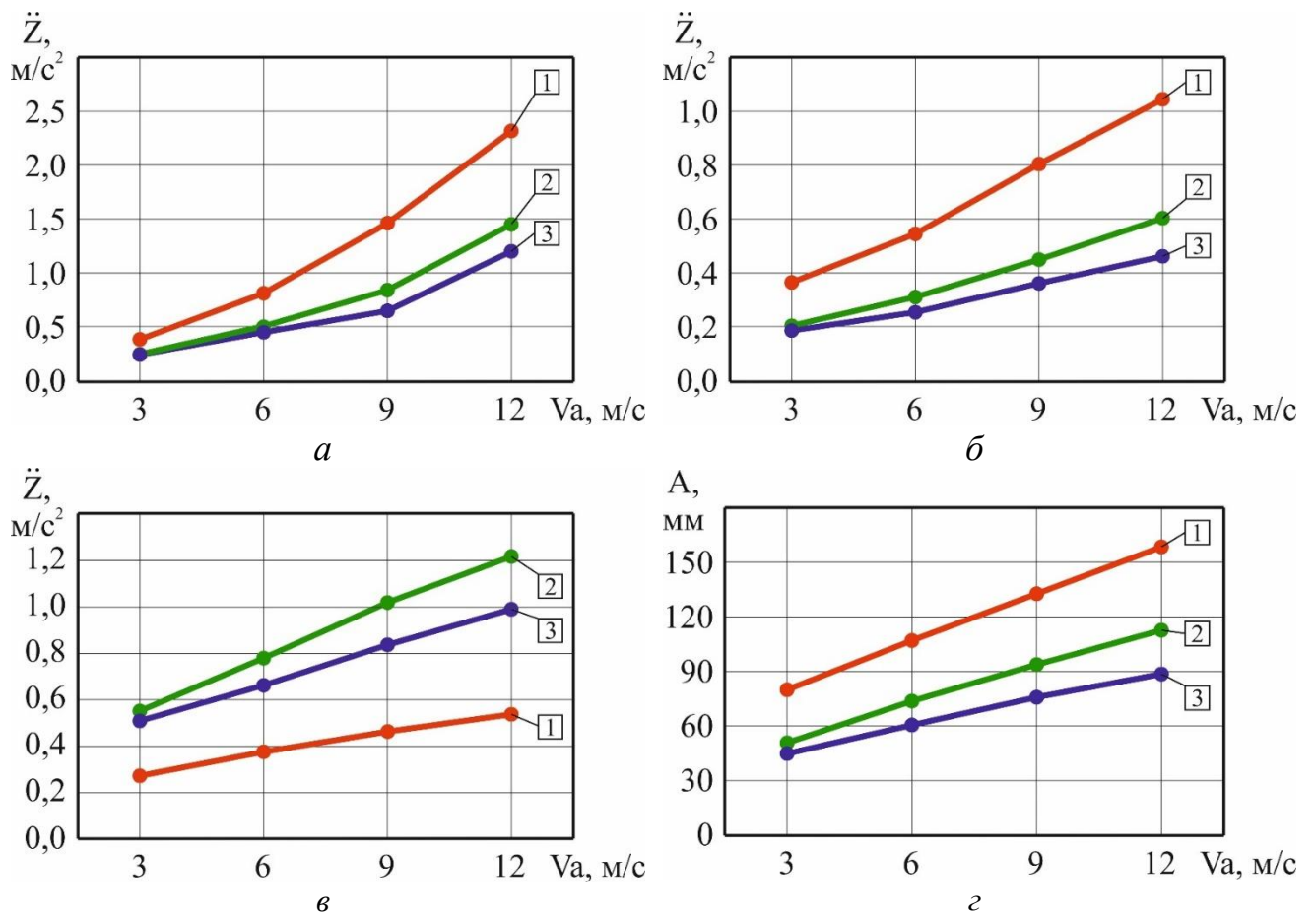


Рисунок 2.8 – Зависимость вибронгруженности МЭС от скорости движения при уровне заполнения бака: 1 – 0%; 2 – 50%; 3 – 100%.

$a$  – на раме;  $б$  – на сиденье;  $в$  – на навеске;  $г$  – на штангах.

#### 2.1.4 Работа математической модели разворота мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем

Для первых оценочных исследований использовали упрощенную модель колеса: считали, что изменение расстояния от корпуса до опорной поверхности связано с одновременной, эффективной, работой шины и подвески. Основная сила (сила опоры) со стороны колеса на корпус мобильного средства рассчитывалась в приближении вязкоупругого взаимодействия:

$$F_i^z = c_i (z_{\text{Пi}}(x_i, y_i) + R_{\text{К}} - z_{\text{Ки}}) - d_i \left( \frac{\partial z_{\text{Пi}}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{\text{Ки}}}{\partial t} \right), \quad (2.15)$$

где  $i$  – индекс колеса;  $z_{\text{Пi}}(x, y)$  – вертикальная координата поверхности под колесом, равная координате нижней точки колеса;  $z_{\text{Ки}}$  – вертикальная координата точки крепления колеса к корпусу;  $R_{\text{К}}$  – радиус колеса;  $c_i, d_i$  – коэффициенты жесткости и демпфирования вязкоупругого взаимодействия.

Разработанная модель позволяет определить показатели, количественно характеризующие неблагоприятный наклон мобильного средства и вероятность задеть опорную поверхность краем штанги.

Максимальный угол наклона мобильного средства на повороте определяется по формуле:

$$\varphi_{\text{М}} = \max_{t=0 \dots t_{\text{кэ}}} \varphi(t), \quad (2.16)$$

где  $\varphi(t)$  – зависимость от времени угла бокового наклона мобильного средства при совершении разворота, полученная в компьютерном эксперименте;  $t_{\text{кэ}}$  – длительность компьютерного эксперимента по совершению разворота мобильным средством. Минимальное расстояние  $z_{\text{кМ}}$  от края штанги до опорной поверхности рассчитывается по формуле:

$$z_{KM} = \min_{t=0 \dots t_{KЭ}} z_K(t), \quad (2.17)$$

где  $z_K(t)$  – зависимость от времени вертикальной координаты точки края штанги. Амплитуда  $A_p$  раскачивания наклоненной к опорной поверхности штанги в процессе разворота определяется по формуле

$$A_p = z_{max2} - z_{KM}, \quad (2.18)$$

где  $z_{max2}$  – максимальная координата края штанги при отклонении "вверх" после основного отклонения "вниз" после начала поворота.

Для исследования разработанной математической модели разработана компьютерная программа «Программа для моделирования разворота мобильного средства, перевозящего технологическую жидкость» на языке Object Pascal в среде программирования Borland Delphi 7 (рисунок 2.9).

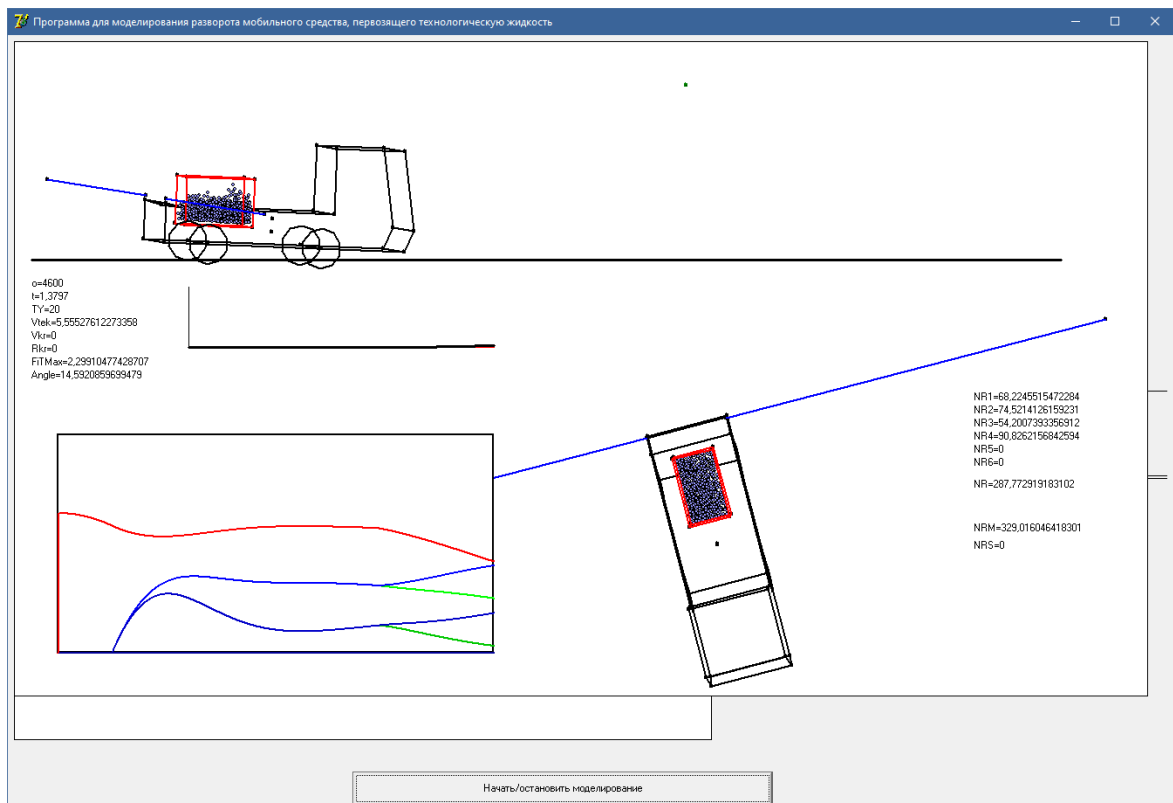


Рисунок 2.9 – Вывод на экран результатов моделирования в разработанной программе для ЭВМ

Программа предназначена для проведения компьютерных экспериментов по развороту мобильного средства на широкопрофильных шинах низкого давления с технологической жидкостью в бункере.

Программа позволяет исследовать влияние скорости и радиуса разворота, объема технологической жидкости и других параметров мобильного средства, жидкости, опорной поверхности на характер наклона мобильного средства и вероятность контакта края одной из штанг с опорной поверхностью.

Программа применима для различных типов мобильных средств, перевозящих технологическую жидкость, в широком диапазоне параметров процесса разворота. Для работы программы рекомендуется компьютер с тактовой частотой не ниже 2,6 ГГц, объемом оперативной памяти не менее 4 ГБ. Объем исходного кода программы составляет 34 кбайт.

#### 2.1.5 Результаты моделирования разворота мобильного средства, оборудованного штанговым опрыскивателем

Разработанная математическая модель разворота мобильного средства обладают достаточными детализацией и высокой физической адекватностью, что позволяет изучить влияние целого ряда параметров мобильного средства, технологической жидкости, условий движения, опорной поверхности на вероятность касания краем штанги опорной поверхности. Наиболее важные переменные модели, анализируемые в теоретическом исследовании показаны на рисунке 2.10.

Первая группа переменных представляет собой параметры мобильного средства, наиболее сильно определяющие характер разворота:

$V_{ж}$  – объем технологической жидкости в бункере;

$P_w$  – давление воздуха в шинах.

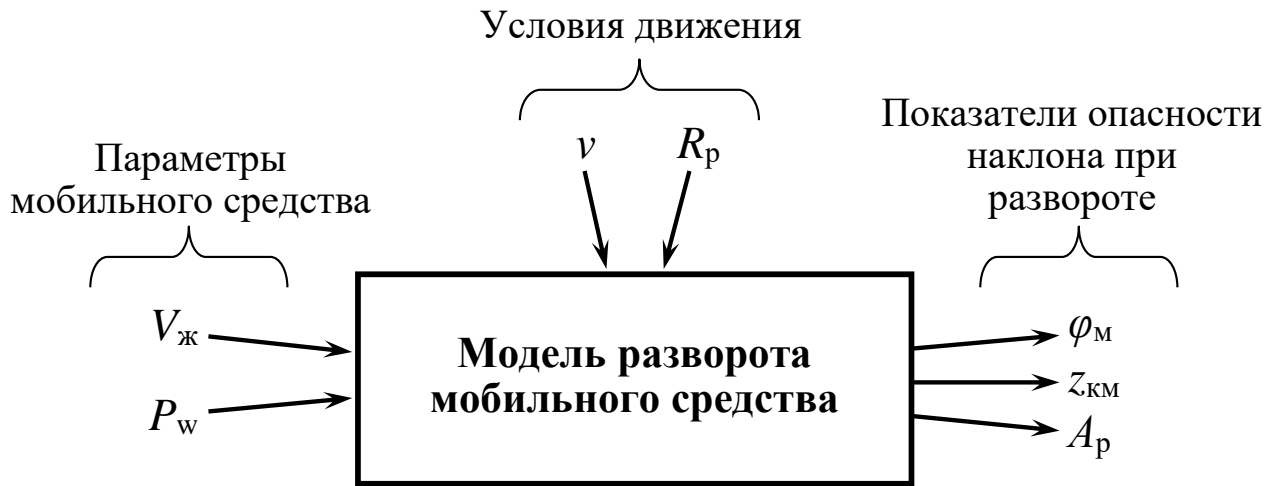


Рисунок 2.10 – Входные параметры и выходные характеристики разработанной математической модели

Вторая группа переменных представляет кинематические и геометрические условия разворота мобильного средства:

$v$  – скорость мобильного средства при совершении разворота в тангенциальном направлении к траектории движения;

$R_p$  – радиус разворота: целевой, без учета бокового сноса и продольного проскальзывания мобильного средства, также воспроизводящихся в модели.

Опасность наклона мобильного средства при развороте оценивается следующими показателями:

$\varphi_M$  – максимальный угол крена мобильного средства в процессе разворота;

$z_{км}$  – минимальная в процессе разворота высота края штанги над опорной поверхностью;

$A_p$  – амплитуда раскачивания края штанги в процессе разворота, обусловленная механическим колебанием транспортного средства как упругой механической системы, а также воздействием технологической жидкости.

Дальнейшее теоретическое исследование заключается в поочередном изменении параметров мобильного средства и условий движения с целью изучения их влияния на показатели опасности неблагоприятного наклона при развороте. В процессе теоретического исследования изменяли поочередно исследуемые параметры относительно их базовых значений.

В начале компьютерного эксперимента происходило приведение в равновесие механической системы «технологическая жидкость»-«мобильное средство»-«колеса»-«опорная поверхность». Для этого изначально помещали мобильное средство на высоте около 0,5 м над опорной поверхностью и начинали интегрировать уравнения движения. В результате этого мобильное средство под действием силы тяжести двигалось вниз и при контакте с опорной поверхностью совершало затухающие колебания в вертикальном направлении до практически полного их прекращения. Мобильное средство приходило в условно-равновесное состояние примерно за 1 с. После этого в модели начинался разворот: передние колеса МЭС поворачивались на заданный угол (около 30 градусов), обеспечивающий необходимый радиус разворота (9 м).

На графике зависимости  $z_k(t)$  при этом наблюдается глобальный минимум  $z_{км}$  (рисунок 2.11).

При начале разворота (рисунок 2.12, а) мобильное средство наклоняется в сторону, противоположную центру разворота (рисунок 2.12, б). В некоторый момент времени наклон достигает наибольшего значения, и край штанги максимально приближается к опорной поверхности (рисунок 2.12, в).

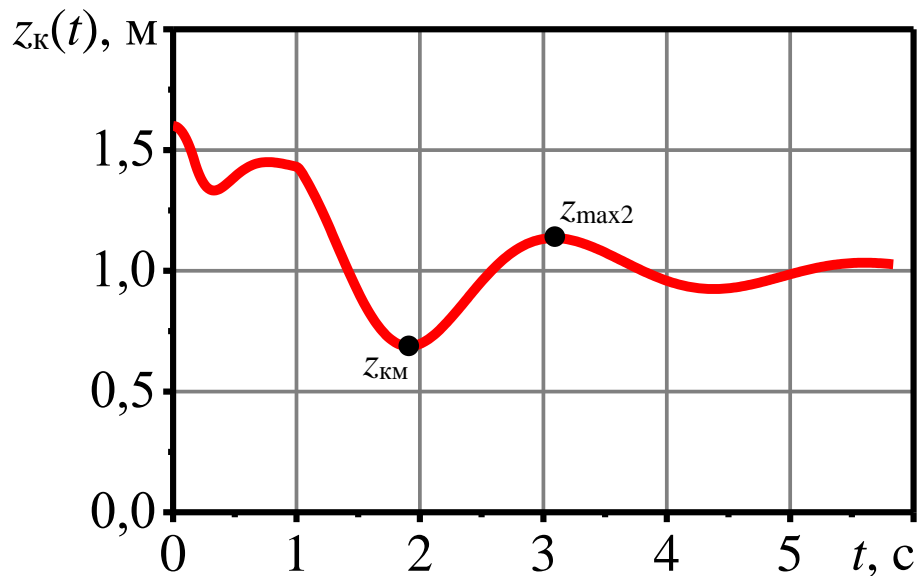


Рисунок 2.11 – Зависимость от времени  $t$  расстояния  $z_k(t)$  от края штанги до опорной поверхности

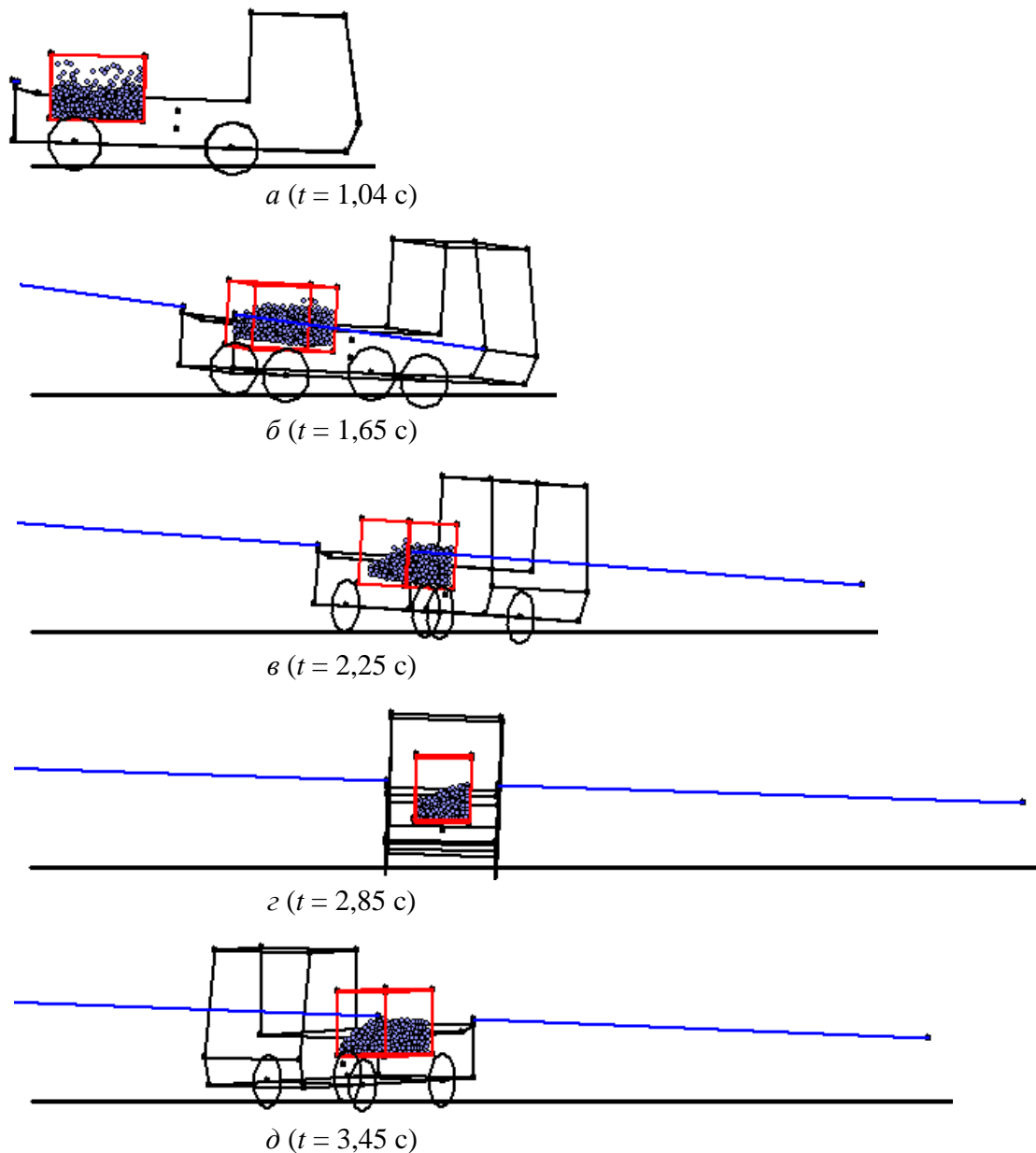


Рисунок 2.12 – Последовательность состояний мобильного средства и технологической жидкости в процессе совершения разворота

В процессе разворота технологическая жидкость перетекает к дальней от центра разворота стенке бункера (рисунок 2.12,  $z$ ). При этом наклоняется поверхность жидкости. Центр тяжести жидкости оказывается смещенным в процессе всего разворота вплоть до его окончания (рисунок 2.12,  $d$ ).

По расположению точек  $z_{\text{км}}$  и  $z_{\text{max2}}$  на графике  $z_{\text{к}}(t)$  определяются показатели опасности наклона при развороте: минимальное расстояние от края штанги до опорной поверхности составило  $z_{\text{км}} = 0,65 \text{ м}$ ; амплитуда раскачивания штанги составила  $A_p = 0,55 \text{ м}$ .

От уровня заполненности бункера технологической жидкостью зависит расположение центра тяжести мобильного средства, перемещение центра тяжести в процессе разворота, динамическое воздействие колеблющейся жидкости. Для изучения влияния уровня заполненности бункера  $V_{ж}/V_б$  проведена серия из четырех компьютерных экспериментов, в которой придавали переменной  $V_{ж}/V_б$  значения 0,0, 0,5, 1,0.

При частичном заполнении бункера жидкость в процессе формирует наклонную поверхность, раскачивающуюся в поперечном к мобильному средству направлении (рисунок 2.13). Из-за этого, помимо перемещения центра тяжести жидкости, происходит колебание центра тяжести жидкости, которое накладывается на колебательное раскачивание корпуса мобильного средства из стороны в сторону, что может вызвать опасно низкое расположение краев штанг.

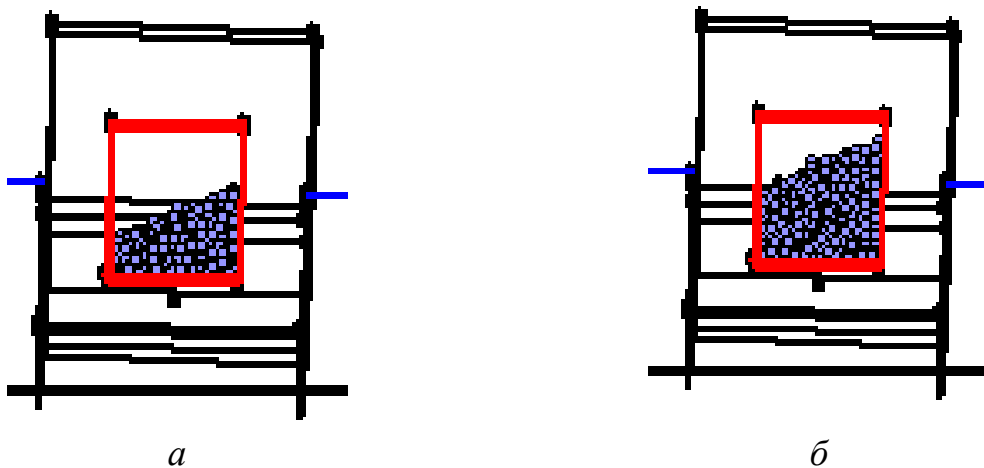


Рисунок 2.13 – Состояние технологической жидкости в бункере в процессе разворота при различном уровне заполненности бункера жидкостью  $V_{ж}/V_б$ : *a* – 0,33; *б* – 0,67

В целом, наблюдается значительный вклад технологической жидкости в опасный наклон мобильного средства при развороте (таблица 2.3), хотя и меньший вклад самого мобильного средства как геометрической и механической системы.

С увеличением заполненности бункера технологической жидкостью с 0% до 100 % увеличивается минимальное расстояние отклонения штанги от нейтрального положения с 0,97 до 0,7 м на скорости 6 м/с (рисунок 2.14). Наибольшее уменьшение с 1,03 до 1,3 м наблюдается при скорости 7,5 м/с.

Таблица 2.3 – Результаты компьютерного моделирования движения МЭС на разворотном участке.

Заполнение бака опрыскивателя, %	Отклонение положения штанг от нейтрального положения, мм				
	1,5 м/с	3 м/с	4,5 м/с	6 м/с	7,5 м/с
100	27	43	67	97	130
50	18	35	59	88	122
0	0	18	42	70	103

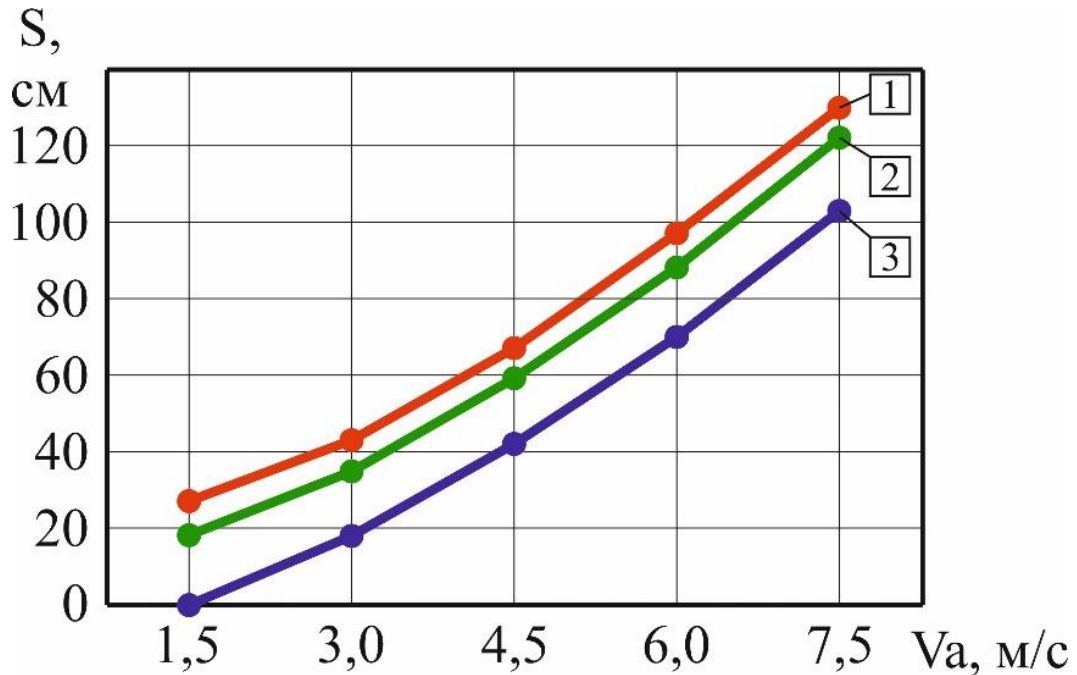


Рисунок 2.14 – Зависимость вертикального ускорения на раме МЭС от скорости движения при уровне заполнения бака: 1 – 100%; 2 – 50%; 3 – 0%.

## 2.2 Разработка модели взаимодействия шины сверхнизкого давления мобильного с культурными растениями

Решение поставленной цели невозможно без проведения теоретических исследований. Для этого разработана модель шины сверхнизкого давления SPH-методом (Smoothed Particle Hydrodynamics) в виде оболочки с тороидальной поверхностью, имеющей возможность изгибать поверхность при воздействии внешних сил, вызванных неровностями опорного основания и внутренних сил от внутреннего давления воздуха в шине. Применение SPH-метода обусловлено обеспечением моделирования взаимодействия высокоэластичной шины с растениями, при сохранении сглаживающих свойств [118]. Обеспечение возможности деформации оболочки модели

шины осуществляется совокупностью элементов шарообразной формы. К узлам сетки привязаны физические свойства резиновой оболочки: каждый узел имеет некоторую массу, а взаимодействие с соседними узлами производится вязкоупругими силами, для которых коэффициенты жесткости и демпфирования рассчитываются заранее с учетом свойств резины и толщины оболочки. На узлы действуют силы давления со стороны воздуха, заключенного в оболочку, при этом используется специальный алгоритм расчета, а также силы со стороны почвы и растительного покрова. Под действием этих сил тороидальная оболочка деформируется аналогично деформации реального колеса.

Задачи со сложными геометрическими формами обычно решают разбиением сложного тела на большое количество отдельных однотипных элементов. В соответствии с этим подходом, каждый стебель разбили на шарообразные элементы (рисунок 2.15). Состояние каждого элемента  $i$  определяется шестью переменными: координатами его центра  $(x_i, y_i, z_i)$  и тремя составляющими скорости  $(v_{xi}, v_{yi}, v_{zi})$ . Взаимодействие элементов между собой носит вязкоупругий характер: как в продольном направлении, так и по отношению к изгибу, что позволяет адекватно учитывать упругость стебля. Кроме того, в модели элементы стебля первоначально связаны между собой, и при удалении двух элементов друг от друга на некоторое критическое расстояние (например, при буксовании колеса) или изгибе на некоторый критический угол (излом стебля) происходит "отрыв" – вязкоупругое взаимодействие отключается.

В модели производится движение колеса через ряд из 30–40 стеблей. В процессе численного эксперимента на экран монитора выводится текущее изображение взаимодействия колеса с растениями. Пространственное исполнение обеспечивает наглядность моделирования реального процесса.

Расчет сил, действующих на элементы стебля, производится следующим образом. Каждый элемент  $i$  испытывает силовое воздействие со стороны окружающих его элементов  $j$ :

$$F_i = \sum_{j=1}^{N_3} (F_{ij}^Y + F_{ij}^B + F_i^H), \quad (2.19)$$

где  $F_{ij}^Y$  и  $F_{ij}^B$  – силы упругого и вязкого взаимодействия элементов  $i$  и  $j$ ;  $F_i^M$  – сила, возникающая вследствие изгиба стебля;  $N_{\text{Э}}$  – общее количество элементов в модели стебля.

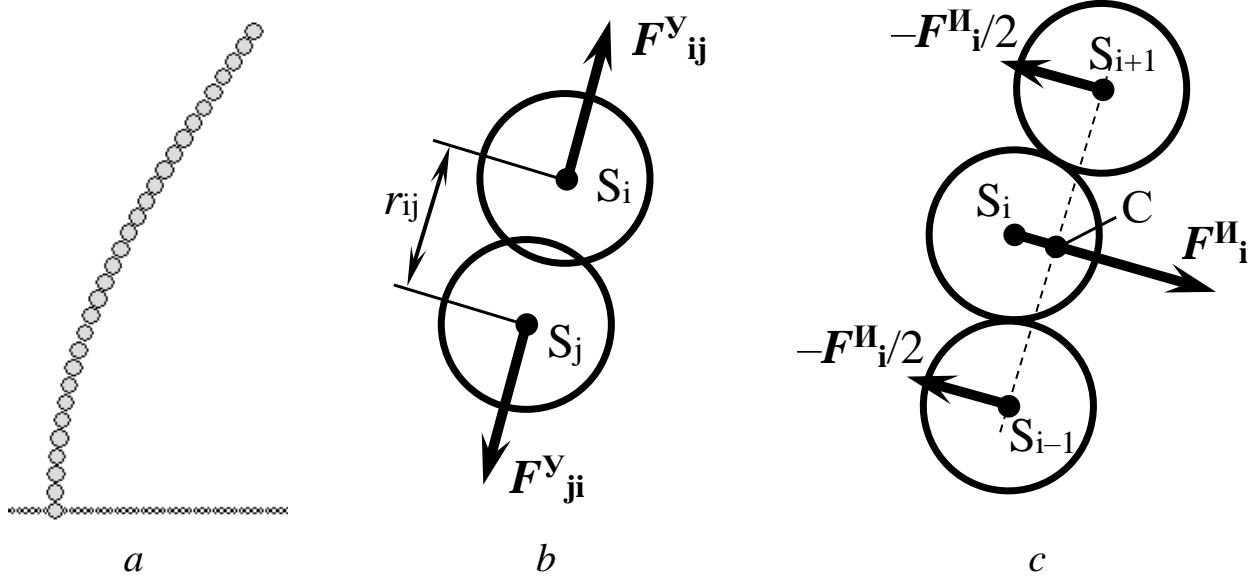


Рисунок 2.15 – Модель растения: а – стебель растения в виде отдельных шарообразных элементов; б – схема для расчета упругих сил при деформации элементов стебля; в – схема для расчета возвращающих сил при изгибе стебля.

При расчете сил для каждой пары элементов предварительно вычисляется расстояние  $r_{ij}$  между их центрами  $S_i(x_i, y_i, z_i)$  и  $S_j(x_j, y_j, z_j)$  (рис. 2.15 б):

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}. \quad (2.20)$$

Элементы, находящиеся на расстояниях  $r_{ij} > d_{\text{Э}} + d_{\text{ЭП}}$  (где  $d_{\text{Э}}$  – диаметр шара-элемента,  $d_{\text{ЭП}}$  – расстояние притяжения), считаются не взаимодействующими ( $F_{ij}^Y = 0$ ,  $F_{ij}^B = 0$ ). При меньших расстояниях декартовы составляющие  $F_{xij}^Y$ ,  $F_{yij}^Y$ ,  $F_{zij}^Y$  упругой силы  $F_{ij}^Y$  вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} F_{xij}^Y &= c_c(d_{\text{Э}} - r_{ij})(x_i - x_j)/r_{ij}, \\ F_{yij}^Y &= c_c(d_{\text{Э}} - r_{ij})(y_i - y_j)/r_{ij}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$F_{zij}^Y = c_c(d_{\mathcal{E}} - r_{ij})(z_i - z_j)/r_{ij},$$

где  $c$  – жесткость упругого взаимодействия элементов.

Декартовы составляющие вязких сил рассчитываются следующим образом.

$$\begin{aligned} F_{xij}^B &= k_B(r_{ij} - (d_{\mathcal{E}} + d_M))(v_{xi} - v_{xj}); \\ F_{yij}^B &= k_B(r_{ij} - (d_{\mathcal{E}} + d_M))(v_{yi} - v_{yj}); \\ F_{zij}^B &= k_B(r_{ij} - (d_{\mathcal{E}} + d_M))(v_{zi} - v_{zj}), \end{aligned} \quad (2.22)$$

где  $v_{xi}$ ,  $v_{yi}$ ,  $v_{zi}$  и  $v_{xj}$ ,  $v_{yj}$ ,  $v_{zj}$  – декартовы составляющие скоростей  $i$ -го и  $j$ -го элемента;  $k_B$  – коэффициент демпфирования (коэффициент вязкого трения).

Для  $F_{ij}^B$  выбрана общепринятая прямо-пропорциональная зависимость вязкой силы от скорости движущегося в среде тела, при этом введен дополнительный коэффициент  $(r_{ij} - (d_{\mathcal{E}} + d_{\text{ЭП}}))$ , характеризующий взаимное проникновение элементов друг в друга.

При изгибе стебля некоторый элемент  $i$  отклоняется от прямой, соединяющей предыдущий  $(i - 1)$  и последующий  $(i + 1)$  элементы. При этом в модели возникают возвращающие силы, стремящиеся вернуть центры всех трех элементов на одну прямую. Значение возвращающей силы принято пропорциональным отклонению центра  $S_i$  от середины  $C_i$  отрезка  $S_1S_2$  (рис. 2.15 в).

В рамках предложенного подхода есть возможность моделировать два вида повреждения стебля: разрыв (при превышении расстояния между элементами свыше критического происходит их отрыв) и излом (при превышении угла между тремя последовательными элементами свыше заданного, происходит потеря изгибной жесткости).

Рассчитав силу  $F_{ij}$ , действующую со стороны элемента  $i$  на элемент  $j$ , в соответствии с третьим законом Ньютона, сила со стороны элемента  $j$  на элемент  $i$  такая же по модулю и противоположная по направлению, то есть  $F_{ji} = -F_{ij}$ . Уравнения

движения  $i$ -го элемента имеют вид:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Э}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{Э}}} (F_{xij}^Y + F_{xij}^B + F_{xi}^H) ; \\
 m_{\text{Э}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{Э}}} (F_{yij}^Y + F_{yij}^B + F_{yi}^H) ; \\
 m_{\text{Э}} \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{Э}}} (F_{zij}^Y + F_{zij}^B + F_{zi}^H) - m_{\text{Э}} g ;
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

где  $m_{\text{Э}}$  – масса элемента;  $t$  – время;  $g$  – ускорение свободного падения.

Данные уравнения движения (2.23) описывают эволюцию стебля с течением времени. При описании взаимодействия элементов шины со стеблем отделение элементов стебля происходит в результате геометрического контакта элементов шины с элементами стебля

В качестве исходных данных компьютерной программы внесли параметры ширины шины сверхнизкого давления  $B_{\text{ш}}=420$  мм,  $D_{\text{ш}}=1020$  мм, вертикальная нагрузка на шину 5 кН. Высота стояния растений составила 100 мм, количество растений – 30 шт. Давление воздуха в шинах варьировалась от 20кПа до 80кПа. В эксперименте учитывался многократный проход движителя по одному следу с различными этапами взаимодействия с растительным покровом.

В рамках проводимого исследования разработан математический аппарат и создана компьютерная программа «Программа для моделирования воздействия шины сверхнизкого давления мобильного транспортного средства на растительный покров» (рисунок 2.16).

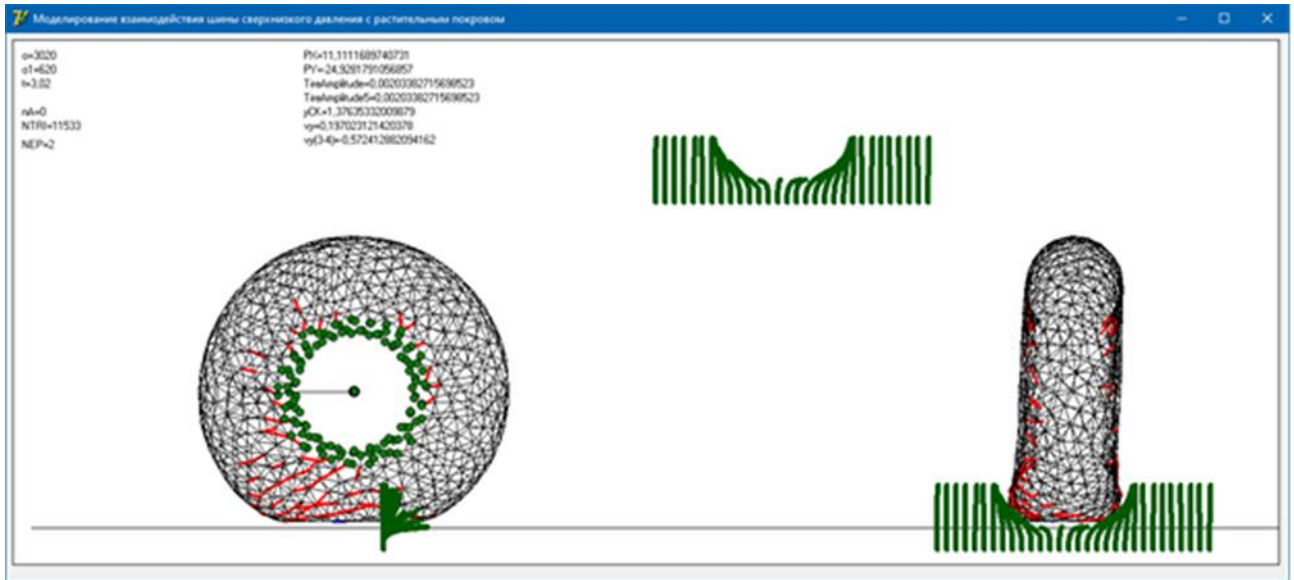


Рисунок 2.16 – Интерфейс разработанной программы и вывод результатов моделирования на экран компьютера.

Разработанная программа предназначена для моделирования характера воздействия движущейся шины сверхнизкого давления с растением. В процессе работы программа выводит на экран схематичное изображение шины и ряда стеблей растений в двух проекциях, а также текущих значений показателей эффективности процесса. После преодоления колесом ряда стеблей производится расчет коэффициента полеглости и доля стеблей, не восстановивших исходную форму (оставшихся сломанными или сильно согнутыми). Программа применима в широком диапазоне давлений воздуха в шинах, скоростей движения мобильного средства, параметров растительного покрова.

Полевые экспериментальные исследования по определению воздействия шин сверхнизкого давления (ШСНД) БЕЛ-79 размерностью 1020x420-18 на растения озимой пшеницы в фазе кущения выполнялись на поле одного из сельхозпроизводителей (51.819700, 39.918348) при проведении комплексной технологической операции по защите растений путем проведения гербицидной и фунгицидной обработки растений с применением экспериментального мобильного энергетического средства МЭС-600, оборудованного штанговым опрыскивателем (рисунок 2.17). Техническая характеристика объекта исследований приведена в таблице 1. Выбор времени и даты проведения исследований определялся исходя из

производственной необходимости и выбранной агротехнологии предприятия. Технологическая операция проводилась в фазе кущения озимой пшеницы. Высота стояния растений колебалась от 90 до 105 мм.

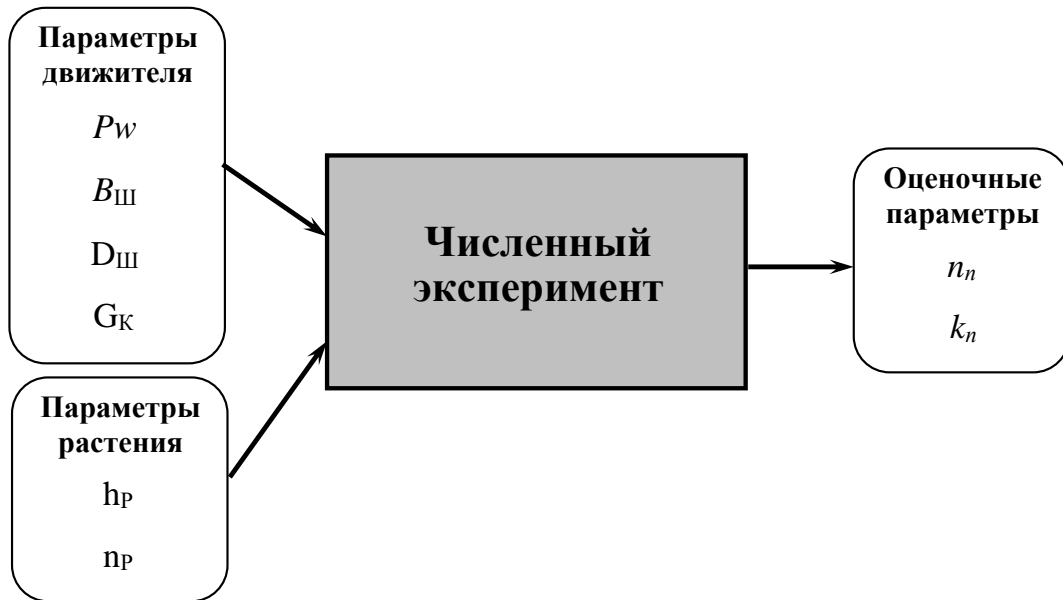


Рисунок 2.17 – Параметры проведения эксперимента и получаемые результаты:  $P_w$  – внутреннее давление воздуха в шинах;  $B_{ш}$  – ширина протектора шины;  $D_{ш}$  – диаметр шины;  $G_k$  – вертикальная нагрузка на шину;  $h_p$  – высота стояния растений;  $n_p$  – густота стояния растений;  $n_n$  – количество примятых растений;  $k_n$  – коэффициент полеглости растений.

С использованием разработанной программы провели серию экспериментов по проезду пневмоколесного движителя через ряд растений. Взаимодействие ШСНД с растительным покровом характеризуется этапами взаимодействия, показанными на рисунке 2.18.

Во время касания движителя растений происходит воздействие на листовые пластинки в верхней части, вследствие этого растение наклоняется по ходу перекачивания движителя. В момент входа движителя на ряд растений воздействие ШСНД также осуществляется и на прикорневую часть растения с давлением, нарастающим по величине по мере прокатывания. Верхняя часть растения в то же время пригибается ещё ниже, занимая положение, близкое к горизонтальному. На этапе прокатывания шины сверхнизкого давления по моделируемому ряду растений оказывается полное максимальное воздействие на все растение одновременно:

как на прикорневую часть, так и на верхнюю часть растения, прижимаемому к опорному основанию. В момент после прохода первого движителя исходя из заданного в программе вязкоупругого взаимодействия частей моделируемого растения между собой, происходит частичное восстановление высоты стояния растений.

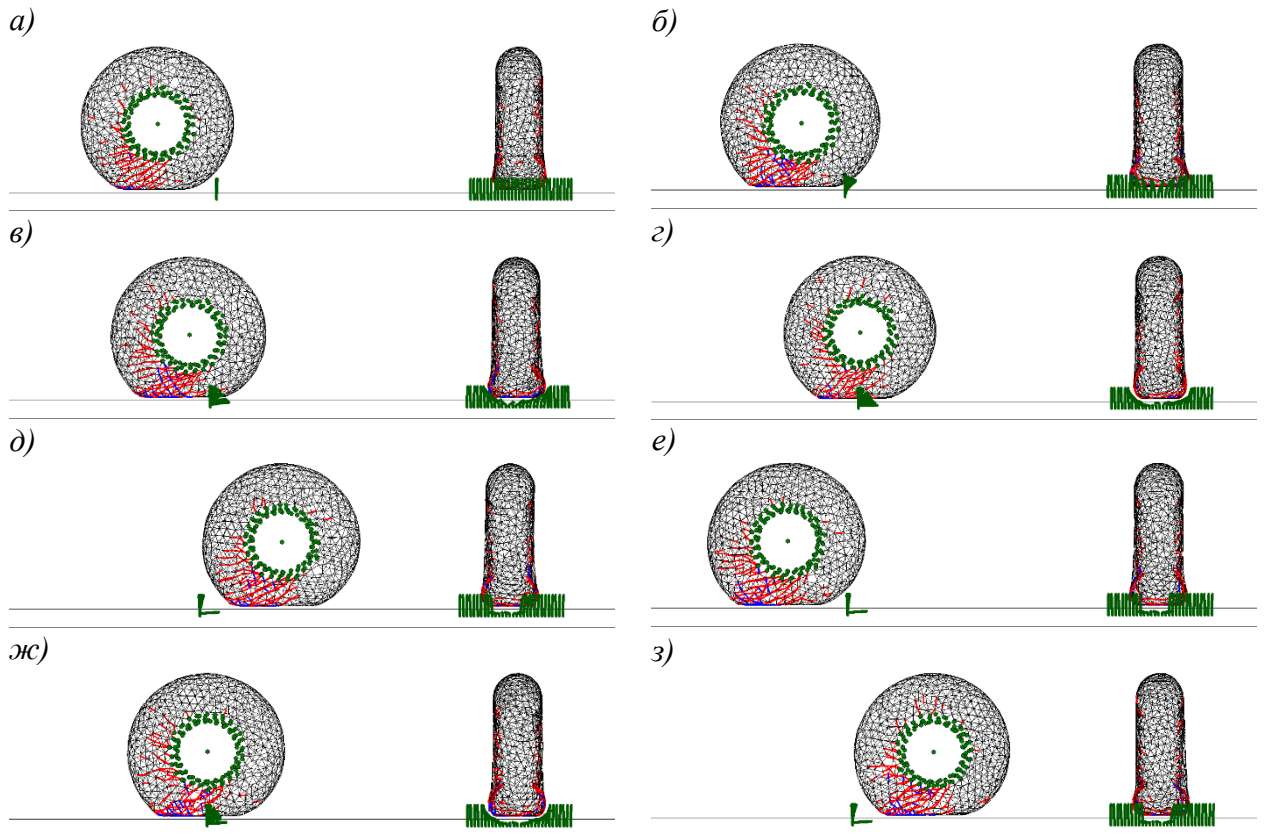


Рисунок 2.18 – Этапы воздействия пневмоколесного движителя на растительный покров при давлении  $P_w=20$  кПа: а) до воздействия; б) касание движителя; в) вход движителя 1; г) прокатывание движителя 1; д) после прохода движителя 1; е) перед проходом движителя 2; ж) прокатывание движителя 2; з) после прохода движителя 2.

Повторный проход второго пневмоколесного движителя также описывается этапами, указанными на схеме, как и для первого, однако наибольшее влияние на уже примятые растения оказывает этап прокатывания, когда воздействие ШСНД осуществляется с максимальным давлением на все растение. После прохода второго движителя также происходит частичное восстановление высоты примятых растений, однако на величину меньшую, чем после прохода первого.

В результате получили наименьший процент полеглых растений после воздействия ШСНД с внутренним давлением воздуха в шине 20 кПа равный 60% как

после проезда движителя при первом, так и при втором проходе (рисунок 2.19). В то же время наибольший процент полеглых растений после первого прохода движителя при давлении воздуха 80 кПа получили 73%, а после прохода второго движителя 80%. Воздействие шины сверхнизкого давления с внутренним давлением воздуха 40 кПа после первого прохода оказывает влияние на полеглость растений в 67%, а после проезда по тем же растениям второго движителя полеглость уже составляет 73%.

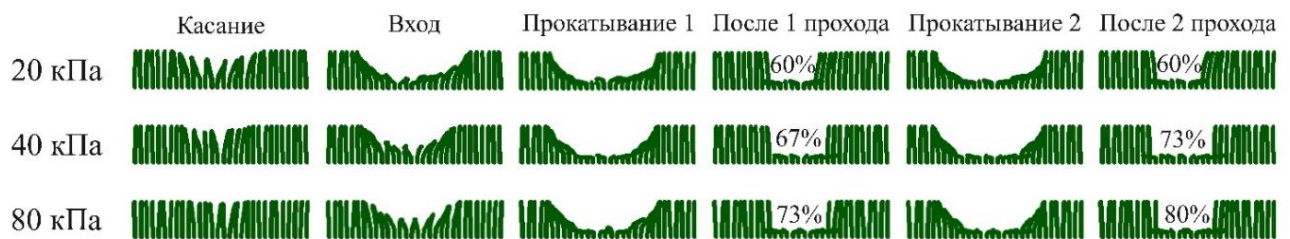


Рисунок 2.19 – Результаты воздействия шин сверхнизкого давления на растения при двукратном проходе.

Снижение внутреннего давления воздуха в шинах позволяет значительно снизить воздействие на растения колосовых культур. Оценка взаимодействия вращающегося движителя мобильного средства и растения возможна с использованием разработанной программы. Программа обладает высокой достоверностью при условии исследования воздействия высокоэластичных широкопрофильных шин и растений колосовых культур в фазе кущения.

### 2.3 Выводы по главе 2

1. Разработана математическая модель мобильного энергетического средства на шинах сверхнизкого давления, оборудованного штанговым опрыскивателем, учитывающая упругие и рассеивающие характеристики шин сверхнизкого давления, подвески средства и сиденья оператора, а также массово-инерционные характеристики штанг и переменную массу технологической жидкости.

2. Оптимальное давление в шинах составляет 20 ... 40 кПа, оптимальная скорость движения мобильного средства составляет 3 ... 12 м/с. При этом обеспечиваются максимальные уровни ускорения на сиденье – не более 0,5 м/с<sup>2</sup>, на раме – не более 1,3 м/с<sup>2</sup>, на штангах опрыскивателя – не более 1,3 м/с<sup>2</sup>.

3. Разработана компьютерная программа «Моделирование взаимодействия шины сверхнизкого давления с растительным покровом», позволяющая оценивать воздействие шин сверхнизкого давления на колосовые сельскохозяйственные культуры, учитывающая многократный проход движителя, внутреннем давлении в шине, вертикальную нагрузку и фазу развития растения.

3. Разработана компьютерная программа «Программа для моделирования воздействия шины сверхнизкого давления мобильного транспортного средства на растительный покров», позволяющая оценивать воздействие шин сверхнизкого давления на колосовые сельскохозяйственные культуры, обладает достаточно высокой достоверностью, подтверждающейся наибольшим расхождением теоретических и экспериментальных значений по воздействию ШСНД на растительный покров на переувлажненных почвах в 6% при внутреннем давлении воздуха 40 кПа.

4. В результате проведения компьютерного моделирования воздействия ШСНД на культурные растения получили процент полеглости растений после двукратного прохода движителя при различном внутреннем давлении воздуха в шинах. Снижение давления воздуха в шине с 80 кПа до 20 кПа позволяет снизить воздействие на озимую пшеницу в фазе кущения в 1,33 раза.

### ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОБИЛЬНОГО СРЕДСТВА НА ШИНАХ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

#### 3.1 Цели, задачи и объекты экспериментальных исследований

Стендовые лабораторные испытания проводились с целью получения их упругодемпфирующих характеристик шины, упругих элементов подвески и виброизоляторов кабины, которые в дальнейшем используются для создания имитационной модели виброзащитной системы поддресоривания МЭС.

Целью проведения лабораторно-полевых исследований является экспериментальная оценка влияния параметров динамической системы мобильного энергетического средства, оборудованного шинами сверхнизкого давления на его виброзащитные свойства и динамическую нагруженность конструкции.

Объектом исследований являлось мобильное энергетическое средство МЭС-600 на шинах сверхнизкого давления, оборудованное штанговым опрыскивателем (рисунок 3.1). Техническая характеристика объекта исследований приведена в таблице 3.1. Отличительной особенностью МЭС-600 является короткая база, кабина оператора, для улучшения обзорности и повышения вместимости технологической площадки, вынесена вперёд за ось передних управляемых колёс. МЭС-600 имеет передние и задние управляемые колеса и колёсную формулу 4К4.



Рисунок 3.1 – Мобильное энергетическое средство МЭС-600.

Таблица 3.1 – Техническая характеристика объекта исследований МЭС-600

Показатель	Значение
<b>Двигатель</b>	
Тип двигателя	Бензиновый
Мощность (л.с/ об. мин)	73/5600
Крутящий момент (Нм / об.мин)	106/3600
<b>Трансмиссия</b>	
Колесная формула / ведущие колеса	4К4
Коробка передач	механическая
Число передач	5
<b>Рулевое управление</b>	
Тип РУ	Гидрообъемный
Производительность насоса ГУР	6 л/мин
Марка исполнительного ГЦ	T-40M1-3429010
<b>Подвеска</b>	
Тип подвески	независимая, пружинная, на поперечных рычагах, с гидравлическими телескопическими амортизаторами
<b>Габаритные размеры</b>	
Длина	4680 мм
Ширина	2210 мм
Высота	2400 мм
Колея передних/задних колес	1610/1610 мм
База	2200 мм
Клиренс	410 мм
Снаряженная масса	1405 кг
<b>Эксплуатационные характеристики</b>	
Грузоподъемность	700 кг
Диапазон рабочих скоростей	5-40 км/ч
Размер шин	Арктиктранс Бел-79 16.8-18
<b>Характеристики штангового опрыскивателя</b>	
Производительность	до 25 га/ч
Ширина захвата	18 м
Объем бака	600 л
Расход рабочей жидкости	10-180 л/га

### 3.2 Методика проведения лабораторных испытаний

Лабораторные испытания шины сверхнизкого давления 1020x420-18, устанавливаемой на мобильном энергетическом средстве МЭС-600, проводились на универсальном шинном испытательном стенде (рисунок 3.2). В настоящее время шины 1020x420-18 с экологичным протектором высотой в 10 мм, являются наименее изученным классом шин низкого давления. В процессе испытаний проводилась радиальная обжимка, определялись массово-геометрические показатели, снимались отпечатки площадей шин, измерялись удельные давления и определялись агротехнические и экологические показатели по ГОСТ 26955-86.

Динамические воздействия от неровностей дороги к подрессоренной части автомобиля передаются через подвеску, которая состоит из трех основных частей: упругого элемента, гасителя колебаний и направляющего устройства. Свойства подвески в целом и отдельных её элементов можно оценить по статическим и динамическим характеристикам.

Отношение производной нормальной нагрузки по деформации называется коэффициентом нормальной жёсткости или нормальной жёсткостью упругого элемента, и определяется с учетом масштаба, как тангенс угла наклона касательной к характеристике



Рисунок 3.2 – Универсальный шинный испытательный стенд с шиной 1020x420-18

Следует отметить, что из-за внутренних потерь (преодоление сил трения, термодинамические потери, внутримолекулярное трение и т. п.) линии при нагружении и разгрузении упругого элемента не совпадают, образуя замкнутую петлю гистерезиса.

В ходе экспериментальных исследований определялись массово-геометрические параметры, проводилась радиальная обжимка, определение упругих характеристик при действии боковой силы и тормозного момента, снимались отпечатки площадей контакта, определялись тяговые характеристики шин, измерялись удельные давления и экологические показатели по ГОСТ 26955-86.

Лабораторные испытания шины сверхнизкого давления 1020x420-18 модели Бел-79 проводились по «Единой методике испытаний и оценки тракторных шин в лабораторных и полевых условиях» на универсальном стенде СИБ-1М (рис. 3.3) [49, ].

Зависимость радиального прогиба шины от нагрузки и давления воздуха в шине представлялась в виде эмпирической зависимости [37]:

$$h_z = h_{z0} + \alpha \frac{G_z}{\sqrt{P_w}}, \quad (3.1)$$

где  $h_z$  – радиальный прогиб шины, или шины с грунтом;  $h_{z0}$  – постоянный для данной шины коэффициент, мм;  $\alpha$  – постоянный для данной шины коэффициент, кг·кПа<sup>-0,5</sup>;  $G_z$  – нормальная нагрузка на шину, кг  $P_w$  – внутреннее давление воздуха в шине, кПа.

Радиальная жесткость шины определялась по формуле [37]:

$$C_z = \frac{\sqrt{P_w}}{\alpha}, \text{ кН/м} \quad (3.2)$$

где  $P_w$  – давление воздуха в шине.

Влияние давления воздуха на коэффициент рассеивания энергии в шине оценивалось путем расчета коэффициента гистерезисных потерь [12, 88]:

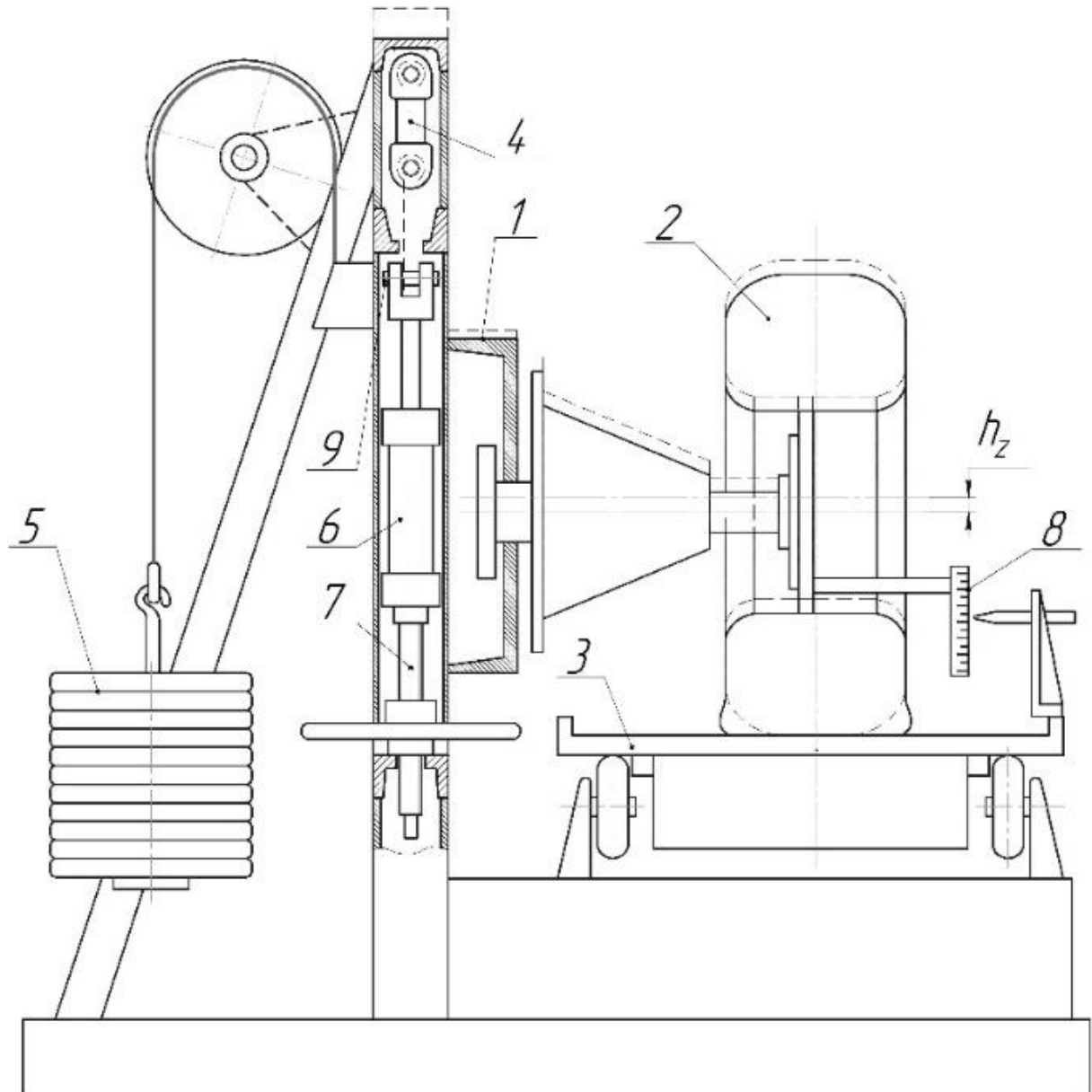
$$\psi = \frac{S_n}{S_{оч}}, \quad (3.3)$$

где  $S_n$  и  $S_{оч}$  – площадь петли гистерезиса и площадь криволинейного треугольника под петлей гистерезиса при заданном давлении воздуха, в координатах  $G_z = f(h_z)$  см<sup>2</sup>.

Аппроксимация экспериментальной зависимости коэффициента гистерезисных потерь от давления воздуха представлялась в виде зависимости []:

$$\psi = \psi_0 + \frac{K}{P_w}, \quad (3.4)$$

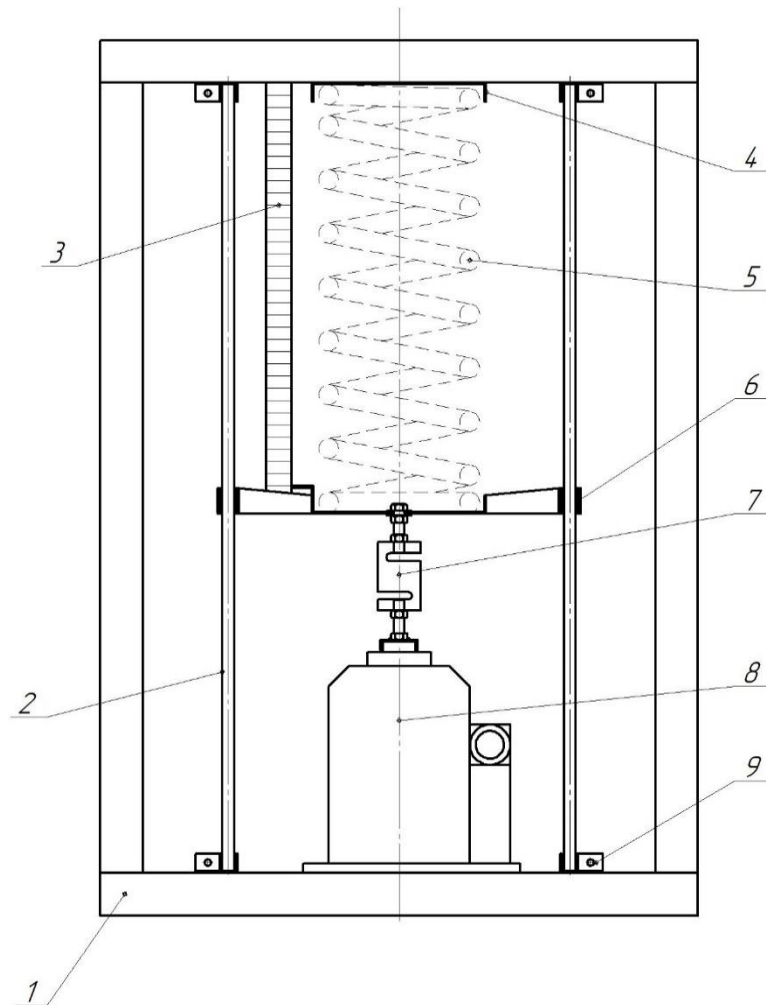
где  $K$  – постоянный для конкретной шины коэффициент, кПа  $\psi_0$  – постоянный безразмерный коэффициент, характеризующийся асимптотой, к которой стремится гипербола при бесконечном увеличении давления воздуха в шине.



1 – подвижная каретка; 2 – испытуемая шина; 3 – стол станда; 4 – тензозвено радиальной нагрузки; 5 – груз на противовесе; 6 – гидроцилиндр нагрузки; 7 – винт; 8 – измерительная линейка; 9 – палец фиксирующий

Рисунок 3.3 – Конструктивно-принципиальная схема определения нагрузочной характеристики шины

Стенд для определения характеристики нормальной упругости пружины подвески и коэффициента нормальной жёсткости представлен на рисунке 3.4.



1 – рама; 2 – направляющая; 3 – линейка измерительная; 4 – опора верхняя; 5 – упругий элемент (пружина); 6 – втулка линейная; 7 – тензометрический датчик прибора АЦД 1; 8 – гидравлический домкрат; 9 – кронштейн

Рисунок 3.4 – Схема стенда для снятия характеристик упругого элемента

Нагрузка на рессору осуществляется с помощью гидравлического домкрата 5, установленного на станину 1. Перемещение пружины фиксируется мерительным инструментом, установленным на стойке станины.

Измерение усилия, которое воздействует на рессору, осуществляется с помощью тензометрического датчика 4, установленного на гидравлическом домкрате, который показывает величину усилия, создаваемого гидравлической системой домкрата.

Для получения данных при математическом моделировании необходимо определить влияние изменения координаты центра масс от уровня наполнения технологической ёмкости самоходного опрыскивателя в транспортном и рабочем режиме использования. Фрагмент проведения исследований приведен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Приборы и оборудование для проведения эксперимента

Объектом исследования является процесс изменения координаты центра масс на двухосных мобильных средствах в зависимости от величины загрузки и его влияние на эксплуатационные показатели.

В качестве конкретного примера для проведения лабораторных исследований выбрано мобильное энергетическое средство МЭС-600, оборудованное шинами сверхнизкого давления и штанговым опрыскивателем с технологической ёмкостью. Общие геометрические параметры приведены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Определение общих геометрических параметров

Колесная база L	Ширина колеи B	Радиус колеса, $r_{ст}$	$h_{п, м}$	$h_{з, м}$
2,2 м	1,61 м	0,485	1,2	1,2

Установить МЭС на горизонтальной опорной поверхности, под колеса установить подставки одинаковой высоты. на элементах кабины и бункера МЭС наносятся 4 отметки на одинаковой высоте, как показано на рисунке 3.6. Определить вертикальные нагрузки под каждым из колес с помощью весов, результаты занести

в таблицу (при проведении опыта при каждом уровне загрузки бункера МЭС определить значения реакций при сложенных и разложенных штангах опрыскивателя).

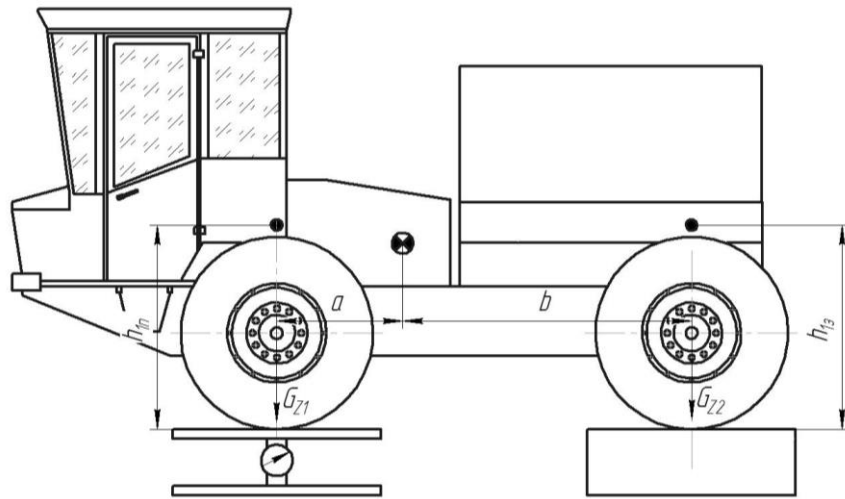


Рисунок 3.6 – Определение горизонтальной координаты центра масс

Для определения высоты центра тяжести автомобиль без нагрузки устанавливается передними колесами на весы, а задними на площадку увеличенной высоты (рисунок 3.7)

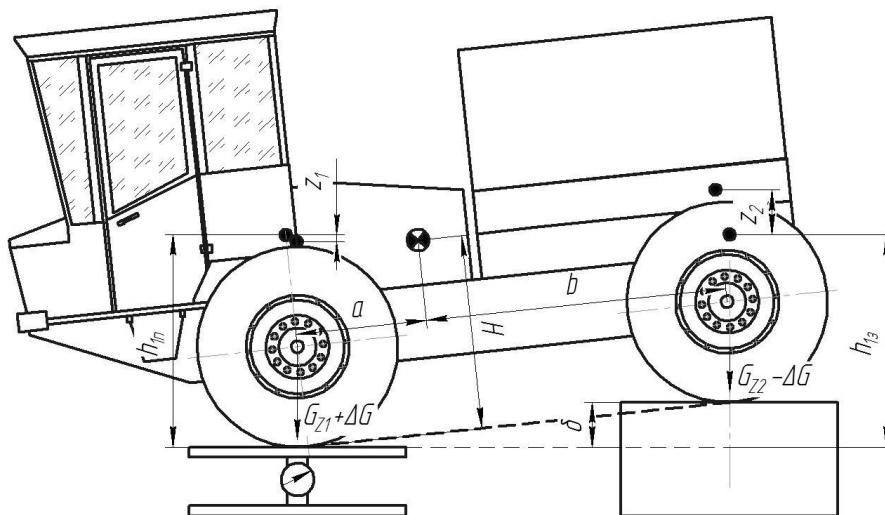


Рисунок 3.7 – Определение вертикальной координаты центра масс

Расстояние центра масс от передней и задней осей определяется по формулам:

$$A = \frac{G_2}{G_a} \cdot L; \quad (3.5)$$

$$B = \frac{G_1}{G_a} \cdot L; \quad (3.6)$$

При подъеме задней оси на некоторую высоту  $\delta$  определяется приращение вертикальной нагрузки на передних колесах и средние вертикальные перемещения меток  $z_1$   $z_2$  на кабине и бункере МЭС. Угол наклона МЭС должен находиться в пределах 6-8°.

### 3.3 Методика проведения лабораторно-полевых и полевых испытаний МЭС-600

Для изучения процессов колебания различных элементов подрессоренных и непрорессоренных частей подвески при проведении лабораторно-полевых испытаний использовался приборный комплекс «АССИСТЕНТ TOTAL» (SIU V3RT), являющийся анализатором спектра вибрации и шума. В состав комплекса входит блок измерительный с анализатором вибрации и вибро-преобразователь AP38P. Для определения общего уровня вибрации на сиденье оператора использовался полужёсткий установочный диск (ПУД), соответствующий требованиям ГОСТ ИСО 10326-1. Анализатор вибрации с виброметром, позволяет определять скорректированный уровень общей и локальной вибрации для октавной и третьоктавной полосы частот. Для обработки полученных данных от анализатора и их перевода в формат Microsoft Excel использовалась специальная разработанная программа для приборного комплекса «АССИСТЕНТ TOTAL» – «Assistent Data Center».

Для проведения лабораторно-полевых испытаний был подобран горизонтальный участок дороги с асфальтобетонным покрытием, с максимальным углом наклона на отдельных участках, не превышающих 2%, с отсутствием естественных неровностей (рисунок 3.8). Длина испытательного участка составляет 1200 метров, ширина проезжей части составляла 2,9 метра. По обе стороны от проезжей части на расстоянии 10 метров от края было соблюдено условие отсутствия вертикальных

неровностей высотой более 0,2 метра во избежание столкновения штанг опрыскивателя с неподвижным препятствием и их выходом из строя.

Также при проведении лабораторно-полевых испытаний для оценки воздействия неровностей поверхности качения шины при движении была разработана искусственная неровность (рисунок 3.9). Неровность имеет трапециевидный профиль с длиной нижнего основания 700 мм, высотой 75 мм и длиной верхнего основания 100 мм. Общая длина неровности составляет 800 мм. Искусственные неровности размещены на участке испытаний на расстоянии, соответствующей колее колёс передней оси мобильного средства МЭС-600. Сами препятствия, для предотвращения их смещения и получения стабильных результатов, были прикреплены к асфальто-бетонному покрытию при помощи клеящего состава.



Рисунок 3.8 – Участок для проведения лабораторно-полевых испытаний с объектом испытания

Для оценки влияния неровностей на колебательную систему мобильного энергетического средства МЭС-600, оборудованного шинами сверхнизкого давления, были проведены лабораторно-полевые испытания по проезду через искусственные неровности (рисунок 3.9). Установка искусственных неровностей трапециевидного сечения высотой осуществлялась по центру проезжей части, с соблюдением перпендикулярности расположения гребней неровностей относительно продольного направления движения МЭС-600 (рисунок 3.10).



Рисунок 3.9 – Трапециевидная искусственная неровность высотой 75 мм.



*а*



*б*

Рисунок 3.10 – Фрагмент лабораторно-полевых испытаний мобильного энергетического средства МЭС-600

Вибропреобразователь АР38Р, для определения уровня вертикальной вибрации на неподдресоренных частях подвески, крепится на поворотной цапфе левого переднего колеса (рисунок 3.11 а). Для определения уровня вертикальных ускорений на раме мобильного энергетического средства над передними управляемыми колёсами, вибропреобразователь АР38Р устанавливается на уголковом двухточечном кронштейне внутренней части верхнего рычага подвески переднего левого колеса (рисунок 3.11 б). С целью определения максимального вертикального виброускорения на сиденье оператора был установлен ПУД, внутри которого был зафиксирован вибропреобразователь АР38Р (рисунок 3.12 а). При этом блок измерительный с анализатором вибрации располагался при проведении эксперимента в непосредственной близости от оператора МЭС на специальных виброгасителях (рисунок 3.12 б).



Рисунок 3.11 – Точки фиксации вибро-преобразователя АР38Р:  
а – на кулаке колеса; б – на раме у переднего левого колеса.



Рисунок 3.12 – Места установки измерительно-регистрающей аппаратуры:  
а – полужесткий установочный диск с вибропреобразователем АР38Р;  
б – блок измерительный с анализатором вибрации.

Для оценки влияния переменного объема технологической жидкости в баке опрыскивателя на плавность хода мобильного энергетического средства были проведены испытания МЭС-600 при следующих переменных параметрах:

- уровень заполнения технологического бака опрыскивателя;
- скорость движения МЭС;
- величина давления в шинах.

Уровень заполнения бака варьировался от полностью 100% заполненного состояния (600 л.) до полностью порожнего (0% и 0 л. соответственно) с интервалом в 50% (300 л.). Контроль уровня заполнения производился на горизонтальной площадке по специальным отметкам с двух боковых сторон бака. Для проверки

достоверности определяемых данных мобильное средство взвешивалось на автомобильных весах, позволяющим свидетельствовать о высокой точности контроля уровня жидкости с максимальной погрешностью, не превышающей 3-5%.

Минимальная скорость движения МЭС-600 при проведении испытаний подбиралась исходя из возможности обеспечения достоверного контроля движения при помощи GPS приёмника компьютера для полевых опрыскивателей серии «bravo 180S». Минимальная скорость составила 3 м/с. Максимальная скорость мобильного энергетического средства в ходе проведения испытаний была ограничена до 12 м/с, исходя из безопасности проведения эксперимента. Промежуточные значения для лабораторно-полевых испытаний задавались от минимальной до максимальной скорости движения с интервалом 3 м/с.

Лабораторно-полевые испытания по определению вибронгруженности навески штангового опрыскивателя производились при помощи приборного комплекса «АССИСТЕНТ TOTAL» (SIU V3RT), состоящего из измерительного блока с анализатором вибрации, размещенного в кабине оператора и вибропреобразователя AP38P, крепление которого осуществлялось резьбовым соединением к нижней части навески, проходящей по оси штанг опрыскивателя (рисунок 3.13 а). Дополнительно выполнялись испытания по определению амплитуды колебаний на концах штанг опрыскивателя, которые поворачивались при раскрытых штангах и опущенных на расстоянии 700 мм от опорной поверхности. На концах штанг устанавливались специальные маркеры, регистрация производилась с применением стационарно установленной высокоскоростной видеокамеры, установленной на расстоянии 12 м от края штанги (рисунок 3.13 б). Обработка полученных данных от анализатора и их перевода в формат Microsoft Excel производилась с применением программ для приборного комплекса «АССИСТЕНТ TOTAL» – «Assistant Data Center».



Рисунок 3.13 – Проведение лабораторно-полевых исследований виброн нагруженности штанг опрыскивателя МЭС-600: а – место крепления вибропреобразователя АР38Р; б – фрагмент с объектом исследования с испытательного участка.

Во время проведения лабораторно-полевых испытаний определялись и записывались следующие параметры мобильного энергетического средства:

- скорость движения МЭС во время прохождения искусственной неровности;
- уровень заполнения технологического бака штангового опрыскивателя;
- давление в шинах сверхнизкого давления;
- вертикальное ускорение поворотного кулака переднего левого колеса;
- вертикальное ускорение рамы над передним левым колесом;
- вертикальное ускорение на сиденье оператора мобильного средства;
- вертикальное ускорение на навеске штанг опрыскивателя.

Обработка результатов измерений выполнялась по следующей методике [121, 122, 124]:

1. Проведение измерений вертикальных ускорений на элементах конструкции МЭС-600 осуществлялось приборным комплексом АССИСТЕНТ ТОТАЛ с вибропреобразователем АР38Р.

2. Производится расчет выборочного среднего значения:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (3.7)$$

где  $x_i$  – результат измерения  $i$ -го х,  $n$  – число отсчетов.

3. Выполняется расчет среднего квадратичного отклонения:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (3.8)$$

4. Производился расчет выборочного среднего квадратичного отклонения:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (3.9)$$

5. Выявление грубых погрешностей (промахов) производилось по критерию Романовского, согласно которому:

$$\left| \frac{\bar{x} - x_i}{\sigma} \right| = \beta; \quad (3.10)$$

где вычисленное значение  $\beta$  сравнивают с теоретическим  $\beta_{кр}$  – при выбираемом уровне вероятности  $P$  ( $P = 0,95$ ). Причем среднее значение и среднеквадратическое отклонение рассчитываем без учета сомнительного результата измерений. Если  $\beta \geq \beta_{кр}$ , то результат отбрасывается.

6. Выполнялось построение доверительных границ случайной составляющей погрешности результата измерения с принятой доверительной вероятностью  $P$ :

$$\varepsilon = t\sigma_{\bar{x}}; \quad (3.11)$$

где  $t$  – безразмерный коэффициент доверия (коэффициент Стьюдента).

7. При учете числа произведенных испытаний ( $n = 5$ ) и для доверительной вероятности  $P = 0,95$ , находим коэффициент доверия  $t = 2,7764$ .

8. Находим полную погрешность прямых измерений [60]:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_u^2 + \Delta_{сл}^2}; \quad (3.12)$$

где  $\Delta_u$  – инструментальная погрешность;  $\Delta_{сл}$  – случайная погрешность.

Исходя из указанной в паспорте прибора АССИСТЕНТ ТОТАЛ класса точности 1.0 и указанных абсолютных погрешностей, выполним расчет относительной погрешности в зависимости от значения ускорения. Дополнительно рассчитаем относительную погрешность и для ускорения, выраженного в  $\text{м/с}^2$ . Уровень

виброускорения в  $\text{м/с}^2$  связан с значением виброускорения в децибелах следующим соотношением:

$$a = 10^{(La-120)/20}; \quad (3.13)$$

где  $La$  – уровень ускорения, дБ

В таком случае, полученные значения виброускорения в  $\text{м/с}^2$  объединим в таблице 3.3, с указанием абсолютной погрешности по верхнему и по нижнему пределам. Зависимость уровня ускорения от виброускорения, с указанием абсолютной погрешности приведены на рисунке 3.14.

Таблица 3.3 – Абсолютная погрешность приборного комплекса АССИСТЕНТ

Уровень ускорения, дБ	Абсолютная погрешность уровня ускорения, + - дБ	Относительная погрешность уровня ускорения, %	Виброускорение, $\text{м/с}^2$	Абсолютная погрешность виброускорения при + 1 дБ, $\text{м/с}^2$	Абсолютная погрешность виброускорения при - 1 дБ, $\text{м/с}^2$
90	1	1,11	0,0316	0,00386	0,003439
95	1	1,05	0,0562	0,00686	0,006115
100	1	1,00	0,1	0,01220	0,010875
105	1	0,95	0,1778	0,02170	0,019339
110	1	0,91	0,3162	0,03859	0,034389
115	1	0,87	0,5623	0,06862	0,061154
120	1	0,83	1	0,12202	0,108749
125	1	0,80	1,7783	0,21698	0,193386
130	1	0,77	3,1623	0,38586	0,343895
135	1	0,74	5,6234	0,68616	0,611541
140	1	0,71	10	1,22018	1,087491

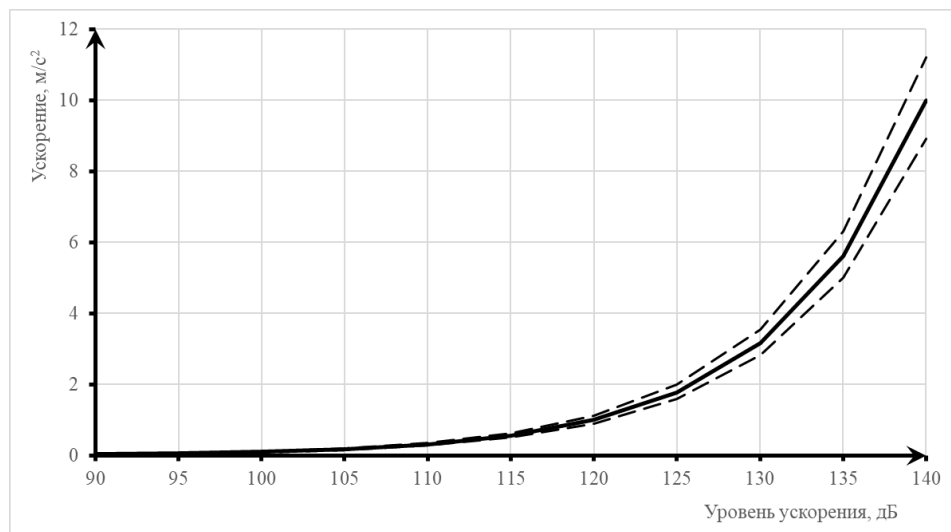


Рисунок 3.14 – Зависимость уровня ускорения (дБ) от виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ), с указанием абсолютной погрешности прибора АССИСТЕНТ ТОТАЛ.

### 3.4 Методика проведения полевых и испытаний МЭС-600

Проведение полевых исследований по оценке виброзащитных свойств МЭС-600 выполнялось на участке одного из агропредприятий при движении по естественному агрофону (рисунок 3.15). Оценивались показатели среднеквадратичных вертикальных ускорений на поворотной цапфе колес передней оси МЭС, на раме над осью переднего моста, в кабине на сиденье оператора и на навеске штанг опрыскивателя. Методика выполнялась аналогично лабораторно-полевым исследованиям. В качестве приборного комплекса применялся анализатор шума и вибрации «АССИСТЕНТ ТОТАЛ» с вибропреобразователем AP38P. На сиденье оператора датчик устанавливался в специальный ПУД (полужесткий установочный диск). Параметры эксперимента ограничивались: скоростью движения от 3 м/с до 12 м/с, переменной загрузкой бака от 0% до 100%, внутренним давлением воздуха в шинах 40 кПа.



Рисунок 3.15 – Фрагмент проведения полевых исследований вибронагруженности МЭС-600 при движении по естественному агрофону

Для оценки вибронагруженности штанг опрыскивателя дополнительно определили амплитуду колебаний на их краях при движении на прямолинейных участках (рисунок 3.16 а). Величина колебаний определялась методом скоростной съемки со скоростью 60 кадров в секунду. Камера устанавливалась на штативе на высоте 1,2 метра от опорной поверхности. Расстояние от объектива записывающего устройства до мишени, закрепленной на крае штанг, составляло 11 м. При помощи навески,

высота положения штанг фиксировалась на высоте 1150 мм от уровня опорной поверхности. В качестве варьируемых параметров проведения эксперимента менялись показатели: скорости движения от 3 м/с до 12 м/с, уровня заполнения бака от 100% до 0%, и давления воздуха в шинах 40 кПа.

Дополнительно определили высоту расположения краев штанг опрыскивателя МЭС при прохождении разворотных участков (рисунок 3.16 б). Параметры проведения эксперимента подобраны аналогичными, как и при движении на прямолинейных участках. Скорость движения до проведения исследований (исходя из требований к безопасности) ограничивалась 7,5 м/с. Радиус прохождения поворотов определялся шириной захвата штанг, который составлял 18 м.



Рисунок 3.16 – Фрагмент проведения полевых исследований вибронегруженности МЭС-600 при движении по естественному агрофону

Полученные данные обрабатывались на компьютер при помощи специальной программы «Kinovea». Результаты полученных значений амплитуды колебаний и положения штанг опрыскивателя записывались в таблицу результатов эксперимента.

Полевые экспериментальные исследования по определению воздействия шин сверхнизкого давления (ШСНД) БЕЛ-79 размерностью 1020x420-18 на растения озимой пшеницы в фазе кущения выполнялись на поле одного из сельхозпроизводителей (51.819700, 39.918348) при проведении комплексной технологической операции по защите растений путем проведения гербицидной и фунгицидной обработки растений с применением экспериментального мобильного энергетического средства МЭС-600, оборудованного штанговым опрыскивателем. Выбор

времени и даты проведения исследований определялся исходя из производственной необходимости и выбранной агротехнологии предприятия. Проведение полевых экспериментальных исследований и учет количества поврежденных растений производились с 26 марта 2023 года по 06 апреля 2023 года. Технологическая операция проводилась в фазе кущения озимой пшеницы. Высота стояния растений колебалась от 90 до 105 мм.

Во время проведения эксперимента фиксировались показатели метеорологических условий, включающих в себя показатели минимальной и максимальной суточных температур, влажности воздуха и количества осадков (таблица 3.4).

Отбор образцов для определения влажности почвы термостатно-весовым методом производился в нескольких слоях на глубине до 200 мм с трехкратной повторностью, определяемых в начале и конце проведения исследований. Результаты, приведенные в таблице 3.5, свидетельствуют о высокой влажности почвы, составляющей 33,4% на глубине почвы 100 мм и 31,3% на глубине до 200 мм.

Таблица 3.4 – Метеорологические условия во время проведения эксперимента.

Дата	Температура суточная макс. С	Температура суточная мин. С	Влажность воздуха макс, %	Влажность воздуха мин, %	Осадки, мм
26.03.2023	+17,1	+5,4	91	49	-
27.03.2023	+11,5	+6,4	92	62	-
28.03.2023	+14,1	+1,4	94	41	-
29.03.2023	+9,3	+6,9	96	64	12
30.03.2023	+7,4	+4,6	96	93	6
31.03.2023	+8,4	+0,1	95	89	19
01.04.2023	+6,8	+0,3	96	71	1
02.04.2023	+14,6	+4,8	81	34	-
03.04.2023	+15,4	+2,7	86	38	-
04.04.2023	+13,5	+8,4	95	58	2
05.04.2023	+15,2	+1,4	98	48	-
06.04.2023	+18,1	+2,5	95	39	-

Таблица 3.5 – Показатели влажности почвы при проведении исследований.

Горизонт почвы, мм	Влажность почвы, %			Средняя влажность, %
	1	2	3	
0-100	33,2	33,6	33,5	33,4
100-200	31,6	31,1	31,2	31,3

Подбор испытательных участков осуществлялся на участках колеи, после проезда самоходного опрыскивателя на шинах сверхнизкого давления на прямолинейных участках движения и на разворотных участках с учетом расположения границ соседних делянок не менее 30 м друг от друга. Отмеченные участки на разворотной полосе располагались на внешней части колеи, относительно центра поворота, на которую приходится большая распределенная нагрузка из-за крена МЭС при прохождении поворота. Место расположения испытательного участка на самой колее определялось произвольно, но с учетом удаления не менее 50 м. от расположения разворотного участка [57, 58].

Степень воздействия ШСНД определялась сравнительно путем подсчета количества и высоты растений до и после прохода колесного движителя на отмеченном участке делянки с пятикратным повторением площадью 0,25 м<sup>2</sup>, со стороной квадрата 0,5 м. Размер учетной площадки обосновывается существующей номенклатурой ширины профиля существующих шин сверхнизкого давления и конкретной шириной профиля установленной БЕЛ-79 16.8-18 на самоходный опрыскиватель, имеющей ширину профиля 420 мм.

Оценивается количество и высота стояния растений после проезда вращающегося колесного движителя самоходного опрыскивателя. Степень снижения высоты может быть выражена в процентах от их изначального положения или от высоты растений на контрольных участках. Дополнительно оценивалось время, необходимое для полного восстановления высоты стояния колосовых культур.

Регистрация высоты стояния растений контролировалось при помощи измерительной линейки и штангенциркуля. Измерялось расстояние от уровня почвы до верхней выступающей части растения. После проведения подсчета количества и высоты стояния растений дополнительно оценивалось время восстановления первоначальной густоты и состояния, не отличающегося от контрольных участков. Окончанием эксперимента считалась дата полного выпрямления примятых колесным движителем растений до полного отсутствия всех признаков угнетения. Если восстановление высоты стояния колосовых культур не наблюдалось, то

фиксирувалась степень повреждения и процент поврежденных растений на учетном участке.

### 3.5 Выводы по главе 3

1. Определена методика проведения лабораторных исследований. Исследование упругих характеристик элементов подвески выполняется на разработанном стенде. Лабораторные испытания шины сверхнизкого давления 1020x420-18 модели Бел-79 проводились на универсальном стенде СИБ-1М. Определение координат центра масс МЭС-600 выполнялось на платформенных весах.

2. Сформулирована методика проведения лабораторно-полевых и полевых исследований при проезде объекта исследований через единичную неровность. Для получения среднеквадратичных вертикальных ускорений использовался приборный комплекс «АССИСТЕНТ TOTAL» с вибропреобразователем AP38P.

3. Доработана методика степени воздействия шин сверхнизкого давления мобильных энергосредств на культурные растения в условиях повышенной влажности почвы. Методика учитывает прохождение колесного движителя на разворотных и прямолинейных участках.



При определении рабочего диапазона относительных деформаций (рисунок 4.1) ШСНД 1020х420-18 на нагрузочной характеристике отмечались рабочие эксплуатационные параметры шины 1020х420-18 мод. Бел-79 согласно рекомендациям завода-изготовителя. Так для максимальной допустимой нагрузки на шины  $G_z=500$  кг при давлении воздуха в шине  $P_w=80$  кПа радиальная деформация составляет  $h_z=37$  мм, а при давлении воздуха  $P_w=20$  кПа и нагрузке  $G_z=400$  кг радиальная деформация составляет  $h_z=62$  мм.

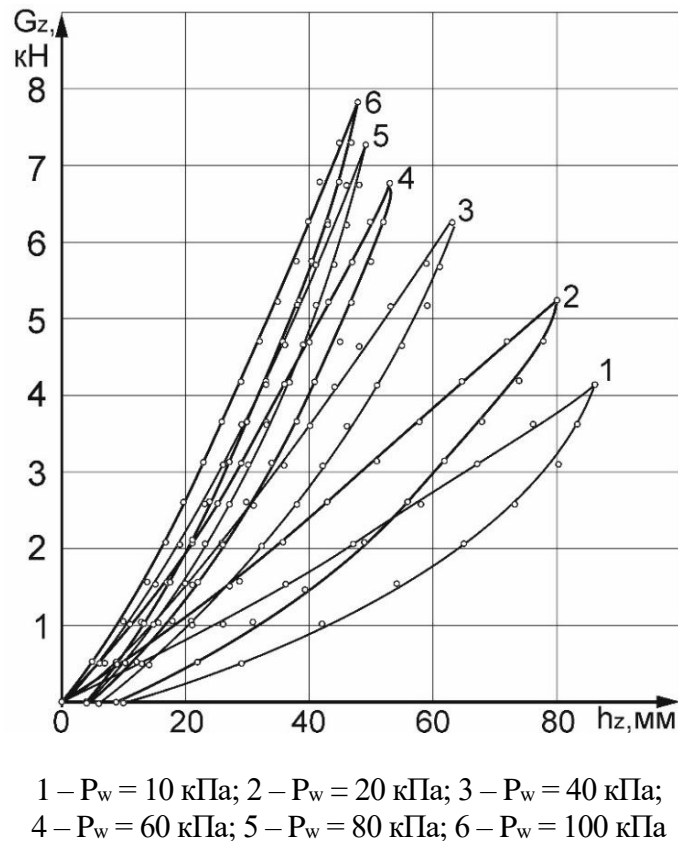


Рисунок 4.1 – Зависимость изменения нормальной деформации от нагрузки на шину 1020х420-18 мод. Бел-79

На основании проведенных исследований установлено, что для шины 1020х420-18 модели Бел-79 оптимальный диапазон относительных деформаций находится в пределах  $12 \leq h_z \leq 20,3\%$ , таким образом при полной нагрузке диапазон рабочих давлений находится в пределах 60-80 кПа, а при частичной нагрузке 20-40 кПа. При этом отмечается, что для кратковременного режима работы при преодолении труднопроходимых участков с повышенной влажностью допускается уменьшение давления воздуха в шине ниже рекомендованных [57].

## 4.1.2 Определение характеристик упругих элементов подвески

По результатам проведения лабораторных испытаний получили зависимости нагрузки от деформации упругого элемента подвески (таблица 4.2) и виброгасителя кабины оператора (таблица 4.3).

Таблица 4.2 – Результаты лабораторных исследований пружины

Нагрузка, Н	Деформация, мм	
	нагрузка	разгрузка
0	0	4
50	9	13
100	18	22
150	26	31
200	34	39
250	42	47
300	50	55
350	58	62
400	65	69
450	72	76
500	79	83
550	86	90
600	93	97
650	100	103
700	107	110
750	114	116
800	121	121

Таблица 4.3 – Результаты лабораторных исследований виброизолятора

Деформация, мм	Нагрузка, кН	
	нагрузка	разгрузка
0	0	0
1	0,19	0
2	0,39	0,3
3	0,63	0,18
4	0,88	0,38
5	1,11	0,56
6	1,31	0,72
7	1,56	0,93
8	1,82	1,15
9	2,12	1,36
10	2,50	1,81
11	3,19	2,59
12	4,26	4,26

Нагрузочная и разгрузочная характеристики упругого элемента подвески (рисунок 4.2) имеют нелинейный прогрессивный характер. При ходе сжатия жесткость пружины изменяется от 62,5 кН/м до 66,1 кН/м (5,5%). Аналогично при ходе отбоя подвески жесткость изменяется в пределах от 66,1 кН/м до 58,5 кН/м (11,5%).

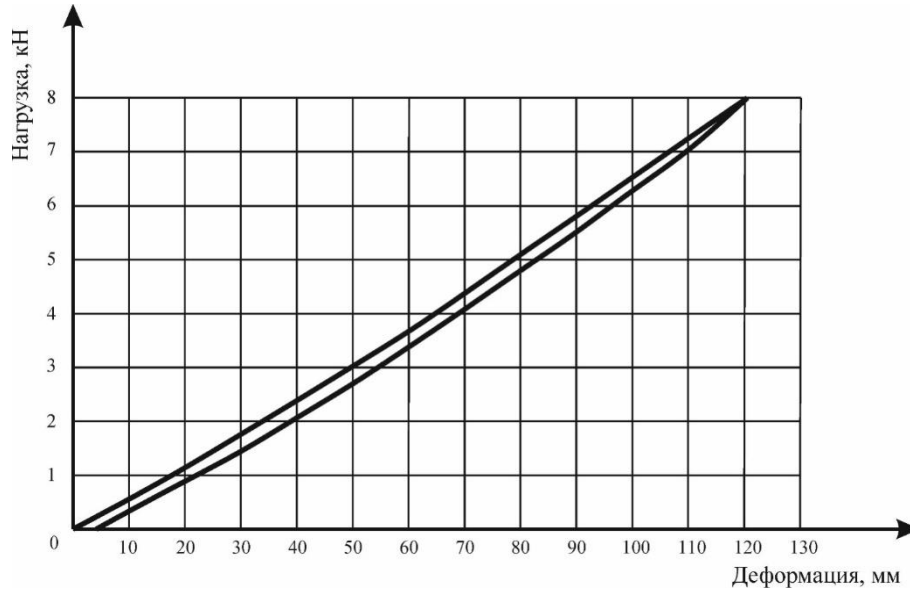


Рисунок 4.2 – Упругодемпфирующие характеристики упругого элемента подвески

Упругодемпфирующая характеристика виброгасителя кабины оператора (рисунок 4.3) имеет более нелинейный характер. При нагрузке жесткость увеличивается с 217,4 кН/м до 362,5 кН/м (на 40 %). Во время разгрузки демпфера жесткость снижается с 362,5 кН/м до 137 кН/м (на 62,2%).

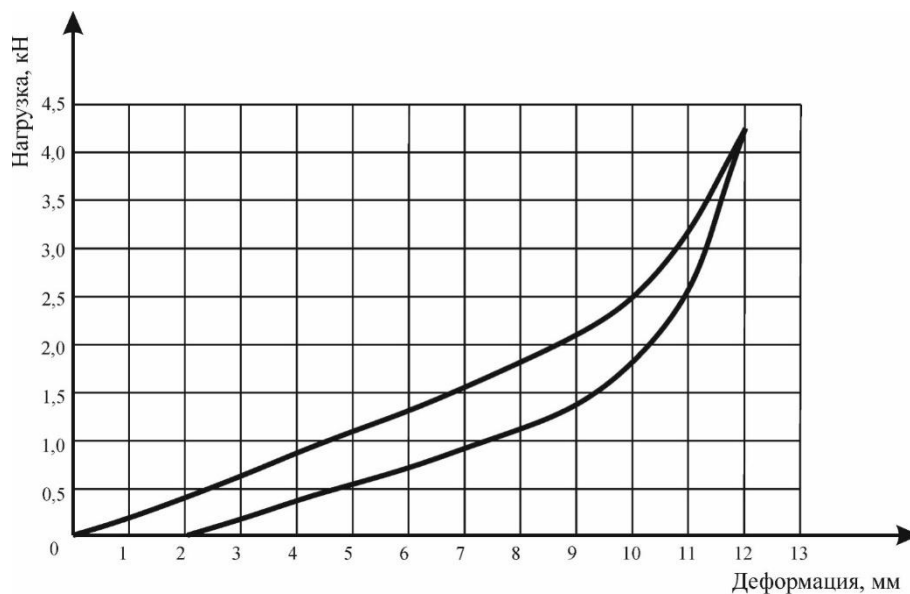


Рисунок 4.3 – Упругодемпфирующие характеристики демпфера подрессоривания

По результатам проведения лабораторных испытаний получили зависимости нагрузки от деформации упругого элемента подвески. В результате аппроксимации получены следующие аналитические выражения:

для пружины, нагрузка:

$$\Delta x(F_H) = -3,104 \cdot 10^{-5} F_H^2 + 0,1762 F_H; \quad (4.1)$$

для пружины, разгрузка:

$$\Delta x(F_H) = -4,331 \cdot 10^{-5} F_H^2 + 0,1810 F_H + 4; \quad (4.2)$$

для виброизолятора, нагрузка:

$$\Delta x(F_H) = -5,960 \cdot 10^{-5} F_H^2 + 0,05341 F_H; \quad (4.3)$$

для виброизолятора, разгрузка:

$$\Delta x(F_H) = -8,338 + \frac{12,085 + 8,338}{1 + \exp\left(\frac{-F_H}{83,57}\right)}; \quad (4.4)$$

где  $\Delta x$  измеряется в мм,  $F_H$  – в кг.

Полученные аналитические выражения позволили интерполировать и сгладить экспериментальные данные (рисунок 4.4). С использованием аналитических выражений были определены коэффициенты потерь  $\psi$ :

для пружины  $\psi = 0,05149$ ;

для виброизолятора  $\psi = 0,2004$ .

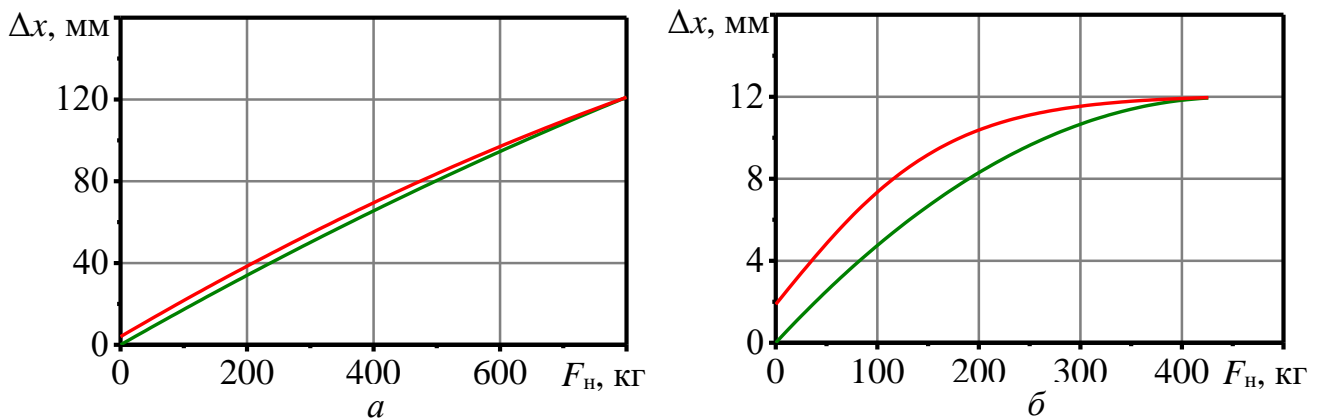


Рисунок 4.4 – Упругодемпфирующие характеристики пружины (а) и виброизолятора (б)

## 4.1.3 Результаты определения координат центра масс при переменной массе

В ходе проведения лабораторных исследований по определению координат центра масс объекта исследований получены следующие результаты расчета, приведенные в таблицах 4.4, 4.5 и 4.6.

Таблица 4.4 – Вертикальные нагрузки под каждым из колес

Технологическое состояние (штанги разложены)								
G <sub>пл</sub> , кг			G <sub>пл</sub> , кг			G <sub>пл</sub> , кг		
462	459	458	470	463	463	470	474	476
G <sub>пп</sub> , кг			G <sub>пп</sub> , кг			G <sub>пп</sub> , кг		
456	455	456	445	447	448	461	460	460
G <sub>зл</sub> , кг			G <sub>зл</sub> , кг			G <sub>зл</sub> , кг		
236	235	235	360	359	360	469	469	471
G <sub>зп</sub> , кг			G <sub>зп</sub> , кг			G <sub>зп</sub> , кг		
253	252	249	381	384	382	487	486	487
G <sub>a</sub> = 1402			G <sub>a</sub> =1654			G <sub>a</sub> = 1890		

Таблица 4.5 – Расстояние центра масс при разложенных штангах

Показатель	Технологическое состояние (штанги разложены)		
	0% загрузки	50 % загрузки	100% загрузки
G <sub>пл</sub>	459,67	465,33	473,33
G <sub>пп</sub>	455,67	446,67	460,33
G <sub>зл</sub>	235,33	359,67	469,67
G <sub>зп</sub>	251,33	382,33	486,67
G <sub>a</sub>	1402,0	1654,0	1890,0
A	0,764	0,987	1,113
B	1,436	1,213	1,087

Результаты испытания заносятся в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты испытаний на разложенных штангах

Показатель	Технологическое состояние (штанги разложены)		
	0% загрузки	50 % загрузки	100% загрузки
G <sub>z1</sub>	486,67	742	956,33
ΔG	40,33	62	81,67
δ, град	6,22	6,22	6,22
tgα	0,109	0,109	0,109
H, м	1,065	1,54	1,36

Высота центра тяжести определяется по формуле:

$$H = r + \frac{\Delta GL}{G_a \operatorname{tg} \alpha}; \quad (4.5)$$

Результаты проведенного эксперимента приведены на рисунках 4.5 и 4.6.

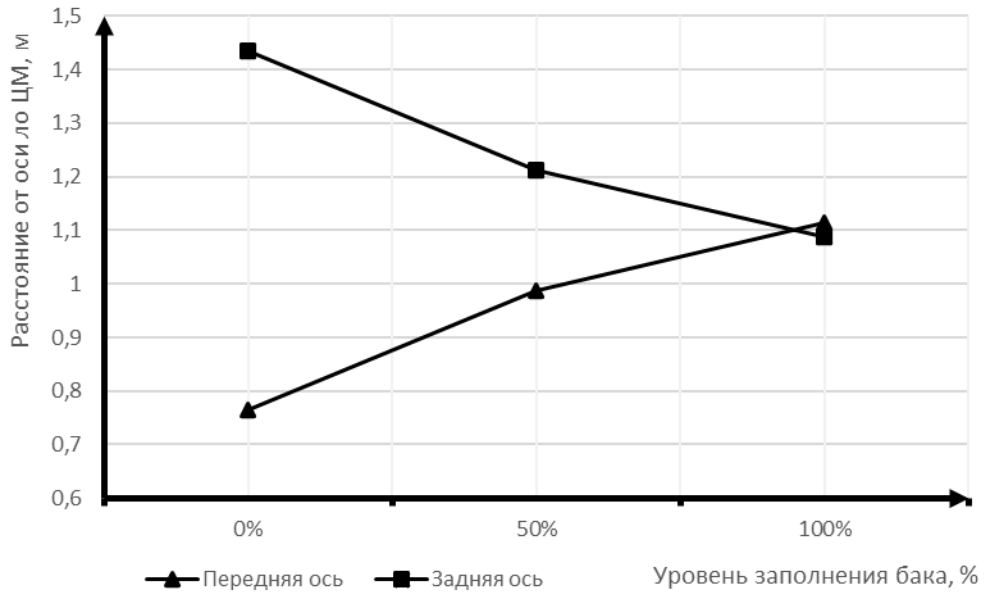


Рисунок 4.5 – Зависимость продольных координат центра масс от загрузки бака в технологическом состоянии МЭС

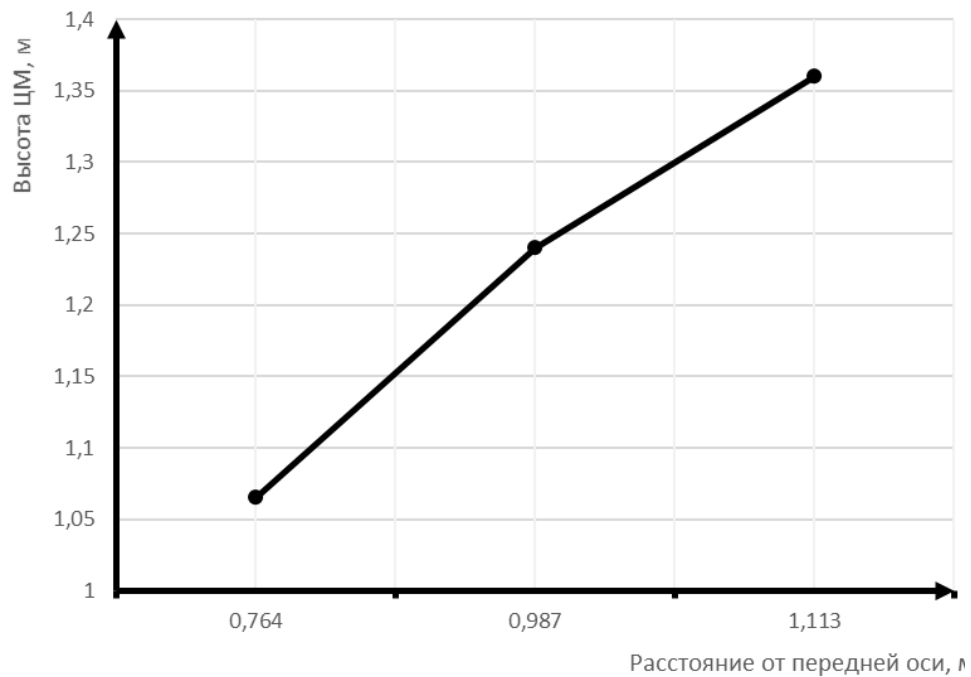


Рисунок 4.6 – Изменение положения центра масс мобильного средства в зависимости от уровня загрузки бака

При полной 100% загрузке бака опрыскивателя водой центр масс, находящийся в 1,032 м от передней оси на высоте 1,36 м смещается при загрузки в 0% технологической ёмкости до 0,764 м от оси передних колес по длине и 1,065 м по высоте.

## 4.2 Лабораторно-полевые испытания мобильного средства

### 4.2.1 Исследование виброзащитных свойств мобильного средства на сиденье оператора при проезде через единичную неровность

Для оценки воздействия единичных неровностей на вибронгруженность МЭС-600, была проведена серия экспериментов, позволяющих определить уровень колебаний поддрессоренных и неподдрессоренных масс, а также на сиденье оператора. Результаты испытаний по оценке влияния давления воздуха в шинах и скорости движения МЭС-600 на уровень колебаний неподдрессоренных и поддрессоренных масс при движении по искусственным неровностям приведены на рис. 2 -3. Анализ данных зависимостей показывает, что характеристики имеют явно выраженный ступенчатый вид с тремя характерными участками: I – до резонансный; II – резонансный и III – за резонансный. В до резонансной и за резонансной зонах имеет место пропорциональный рост ускорений на оси колеса и на раме над передним мостом. В резонансной зоне характеристики имеют прогрессивно-регрессивную зависимость.

Анализ зависимостей максимальных вертикальных ускорений на оси колеса МЭС-600 при различной степени заполнения бака технологической жидкостью показал (рис.4.7), что при движении по искусственным неровностям в диапазоне скоростей 3-6 м/с и 8-12 м/с имеет место пропорциональный рост ускорений на оси колеса. В диапазоне скоростей 6-8 м/с имеет место интенсивный рост ускорений, что объясняется возникновением резонансного режима в динамической системе. При этом с увеличением давления воздуха в шинах резонансная зона незначительно увеличивается.

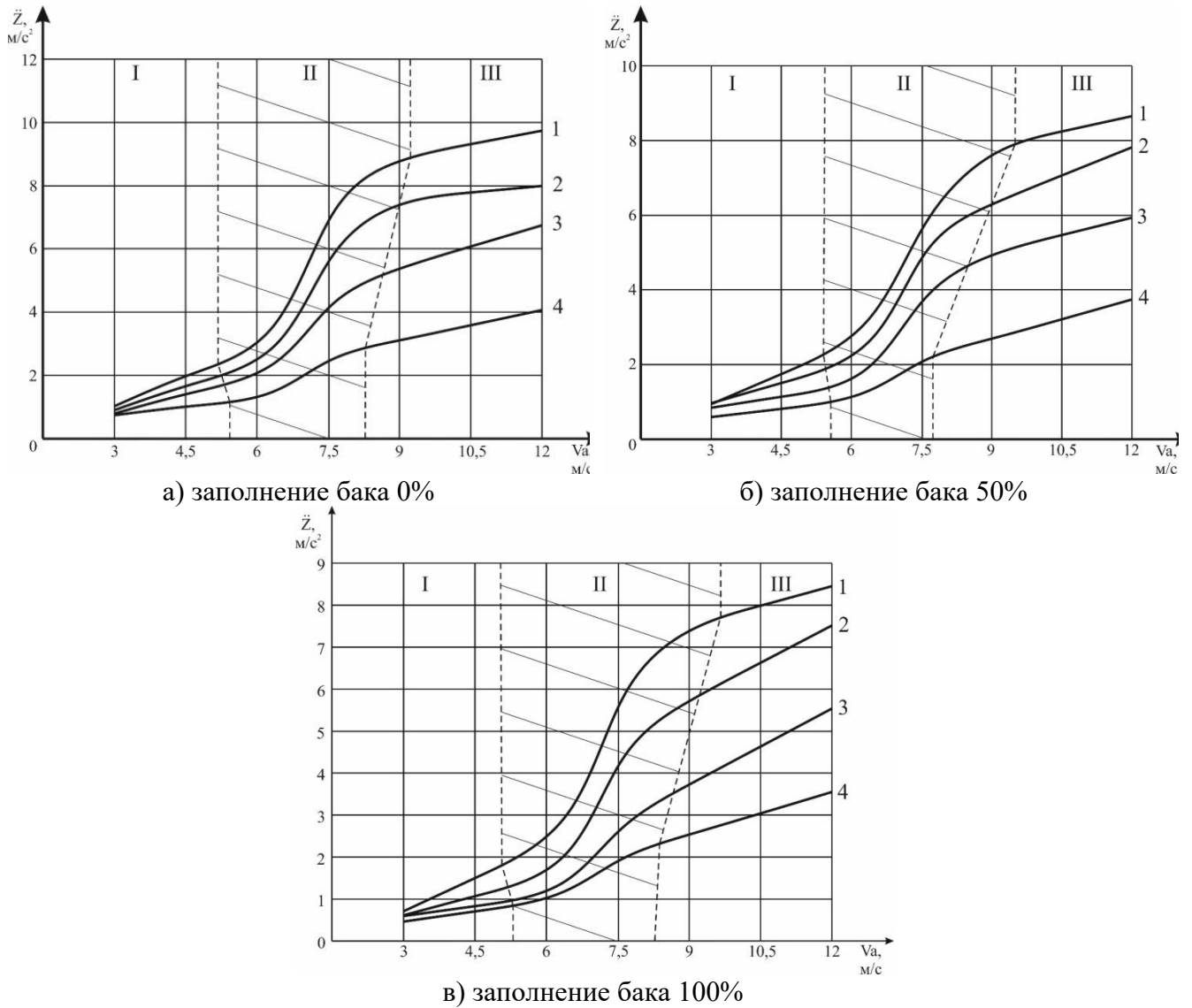


Рисунок 4.7 – Максимальное вертикальное ускорение МЭС-600 на оси колеса при заполнении бака: а - заполнение 0%; б - заполнение 50%; в - заполнение 100%; и давлении в шинах 1 – 80 кПа; 2 – 60 кПа; 3 – 40 кПа; 4 – 20 кПа.

При движении без технологической жидкости в баке со скоростью 12 м/с, снижение давления воздуха в шинах с 80 кПа до 20 кПа позволило уменьшить уровень колебаний на оси передних колес в 3,2 раза. Установлено, что с увеличением скорости с 3 м/с до 12 м/с при давлении воздуха в шинах 80 кПа ускорения на оси колеса возрастают в 9 раз, а при давлении воздуха в шинах 20 кПа – в 5 раз. При движении со скоростью 12 м/с и различной степенью заправки бака технологической жидкостью снижении давления воздуха в шинах с 80 кПа до 20 кПа позволяет уменьшить уровень колебаний на оси передних колес в среднем в 2, 2 - 2,5 раза, то есть степень заправки бака оказывает меньшее влияния на снижение уровня колебаний. Для

скоростей движения 6 м/с, 9 м/с и 12 м/с также наблюдается увеличение вертикального ускорения на неподрессоренных частях соответственно - 23%, 19% и 15%.

Результаты испытаний по оценке влияния давления воздуха в шинах и скорости движения МЭС на уровень ускорений на раме над осью колес при движении по искусственным неровностям и различной степени заправки бака технологической жидкостью приведены на рис. 4.8. Характеристики так же имеет явно выраженные три характерные участка.

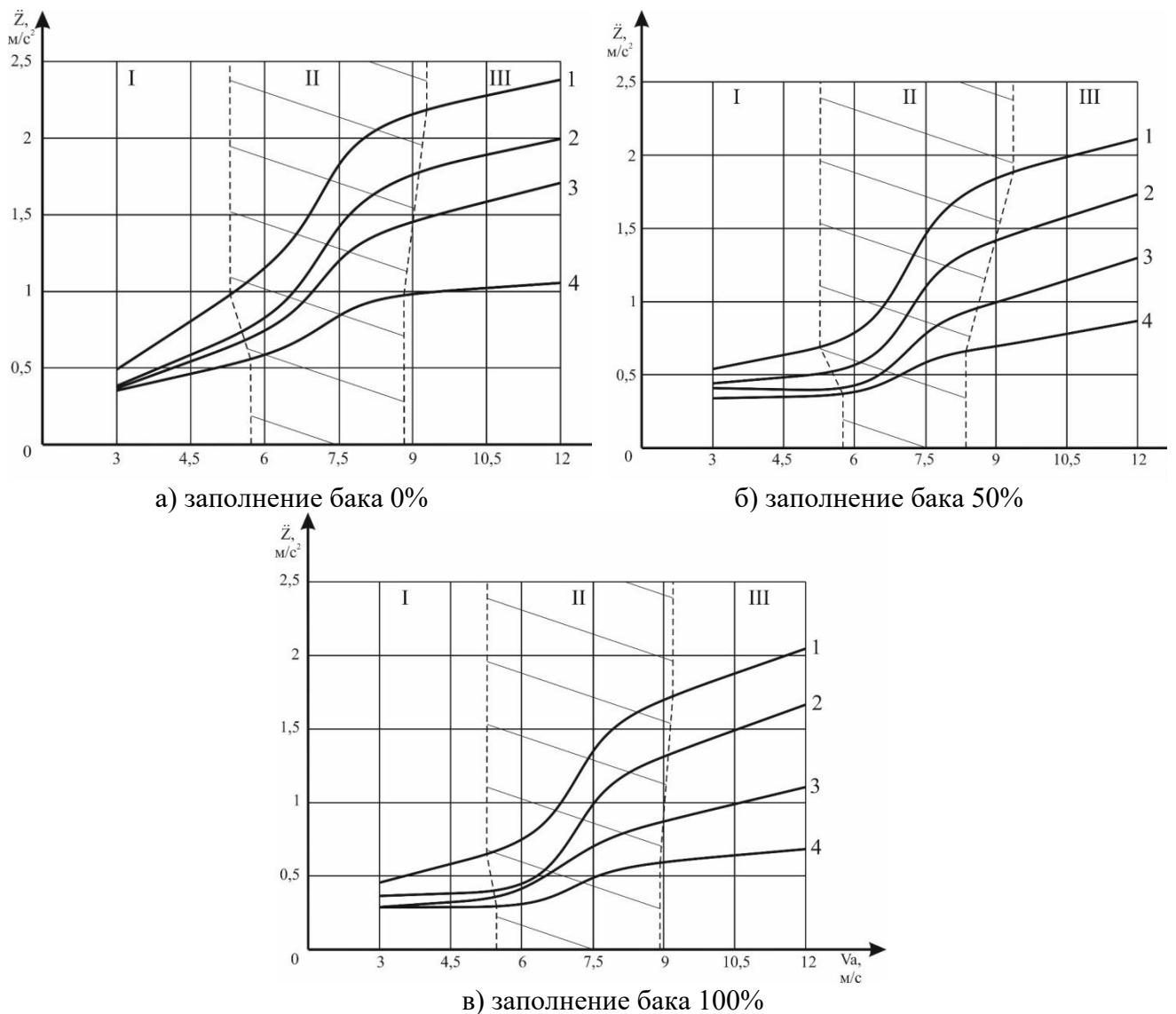


Рисунок 4.8 – Максимальное вертикальное ускорение МЭС-600 на раме при различной степени заполнении бака и давлении в шинах 1 – 80 кПа; 2 – 60 кПа; 3 – 40 кПа; 4 – 20 кПа.

Анализ полученных результатов показал, что при движении со скоростью 12 м/с и различной степенью заправки бака технологической жидкостью снижении

давления воздуха в шинах с 80 кПа до 20 кПа позволяет уменьшить уровень колебаний на раме над осью передних колес в среднем с 3,2 до 2,1 раза. С увеличением скорости от 3 м/с до 12 м/с при давлении воздуха в шинах 80 кПа ускорения на раме над осью колес возрастают в 4,8 раза, а при давлении воздуха в шинах 20 кПа в 3 раза. Однако при движении на скоростях 6 м/с, 9 м/с и 12 м/с наблюдается увеличение максимального вертикального виброускорения на поддрессоренных частях МЭС при уменьшении массы перевозимой жидкости на 54%, 27% и 16% соответственно при давлении воздуха в шинах с 80 кПа.

Наиболее вибронегруженным является режим движения при отсутствии жидкости в баке. Однако, степень заправки бака оказывает меньшее влияние на уровень колебаний, чем скорость движения и давление воздуха в шине.

Испытания показали, что с увеличением давления воздуха в шинах и скорости движения МЭС-600 вибронегруженность на оси колеса и на раме над передним мостом возрастает. Наибольшие значения колебаний имеют место при скорости 12 м/с, однако дальнейшее увеличение скоростного режима становится невозможным из-за ухудшения безопасности движения.

Экспериментальные исследования вибронегруженности не поддрессоренных, поддрессоренных масс были проведены применительно к широкому диапазону изменения давления воздуха в шине сверхнизкого давления. Однако, согласно результатам испытаний полученных при снятии упругих характеристик шины Бел – 79 на стенде СИБ-1 установлено, что оптимальным по напряженно-деформируемому режиму работы шины является давление воздуха в шине - 40 кПа [16]. Поэтому дополнительно были проведены экспериментальные исследования по оценке влияния параметров колебательной системы МЭС-600 на уровень колебаний на сиденье оператора.

Результаты испытаний по оценке вибронегруженности не поддрессоренных, поддрессоренных масс и колебаний на сиденье оператора при движении МЭС-600 по искусственным неровностям с давлением воздуха в шинах 40 кПа при различных скоростных режимах движения и степенью заправки бака технологической жидкостью приведены на рис. 4.9.

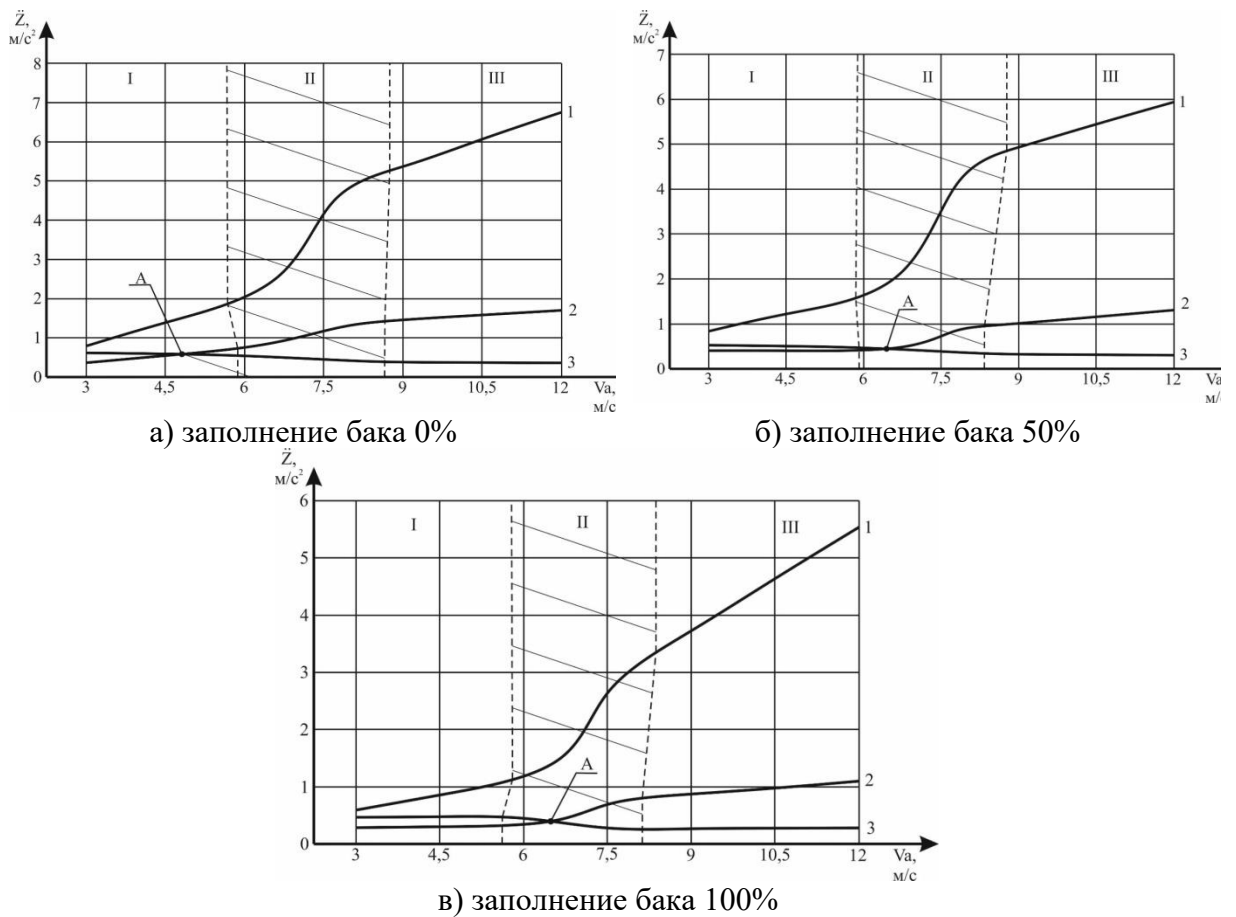


Рисунок 4.9 – Максимальное вертикальное ускорение МЭС-600 при давлении в шинах 40 кПа: 1 – на оси колеса; 2 – на раме над осью; 3 – на сиденье оператора.

Анализ проведенных испытаний показал, что в до резонансной зоны при движении МЭС в диапазоне скоростей от 3 м/с до 6 м/с не зависимо от степени заправки бака технологической жидкостью уровень колебаний на сиденье оператора выше на 30-35%, чем над осью передних колес. Короткая база и максимальная удаленность от центра масс сиденья оператора при отсутствие его поддрессоривания, а также характер взаимодействия шин сверхнизкого давления с неровностями является следствием склонности МЭС-600 к галопированию. При движении со скоростью 4,6 м/с имеет место точка пересечения кривых уровней колебаний на сиденье оператора и на раме над осью передних колес, в точке "А" их уровни колебаний равны, далее с увеличением скорости движения уровень колебаний на сиденье оператора снижается, а на раме над осью передних колес возрастает.

В резонансной зоне уровень колебаний на оси колеса возрастает в 2,6 раза, а на раме возрастает в 1,9 раза и достигает 0,7 g, при движении без технологической

жидкости в баке. При 50% заправке бака, соответственно возрастает на оси колеса в 3,3 раз, а на раме в 2,3 раза, а при полной заправке на оси колеса возрастает в 3,1 раза, а на раме в 2,5 раза. Заправкой бака обусловлено смещение точки пересечения кривых уровня колебаний на сиденье оператора и над осью передних колес в резонансную зону.

В за резонансной зоне при скорости движения 12 м/с уровень колебаний на сиденье оператора, при различных уровнях заправки, относительно колебаний на оси колеса снижаются с 19,4 до 18,7 раз, а на раме снижается с 4 до 5 раз. Благодаря применению высокоэластичных шин сверхнизкого давления при скорости движения 12 м/с уровень колебаний на оси колеса достигает максимальное значения 0,69g, а применение независимой подвески обеспечивает снижение колебаний на раме до 0,17g, что позволяет МЭС-600 иметь высокую плавность хода. В этой зоне уровень колебаний на сиденье ниже, чем на раме, что объясняется уменьшением времени взаимодействия шины сверхнизкого давления с единичной неровностью и высокой её сглаживающей способностью. При различной величине заправки бака технологичной жидкостью на максимальной скорости движения 12 м/с уровень колебаний на сиденье оператора находится в диапазоне 0,03- 0,04 g.

С увеличением скоростей движения от 3 м/с до 12 м/с уровень колебаний на сиденье оператора снижается с 0,063 g до 0,037g. Анализ результатов показал, что уровень колебаний на сиденье не превышает нормативных значений согласно «Единым требованиям к конструкции тракторов и сельскохозяйственных машин по безопасности и гигиене труда» и границы комфортной езды (0,25g) [55].

#### 4.2.2 Исследование вибронагруженности на краях штанг установленного опрыскивателя

Лабораторно-полевые исследования по оценке вибрационной нагруженности штанг опрыскивателя МЭС на шинах сверхнизкого давления проводились в три этапа. На первом этапе была проведена оценка влияния на вибронагруженность штанг скорости движения МЭС и степени заполнения емкости технологической

жидкостью при максимальном и оптимальном давлении воздуха в шинах [84, 95] (рис.4.10).

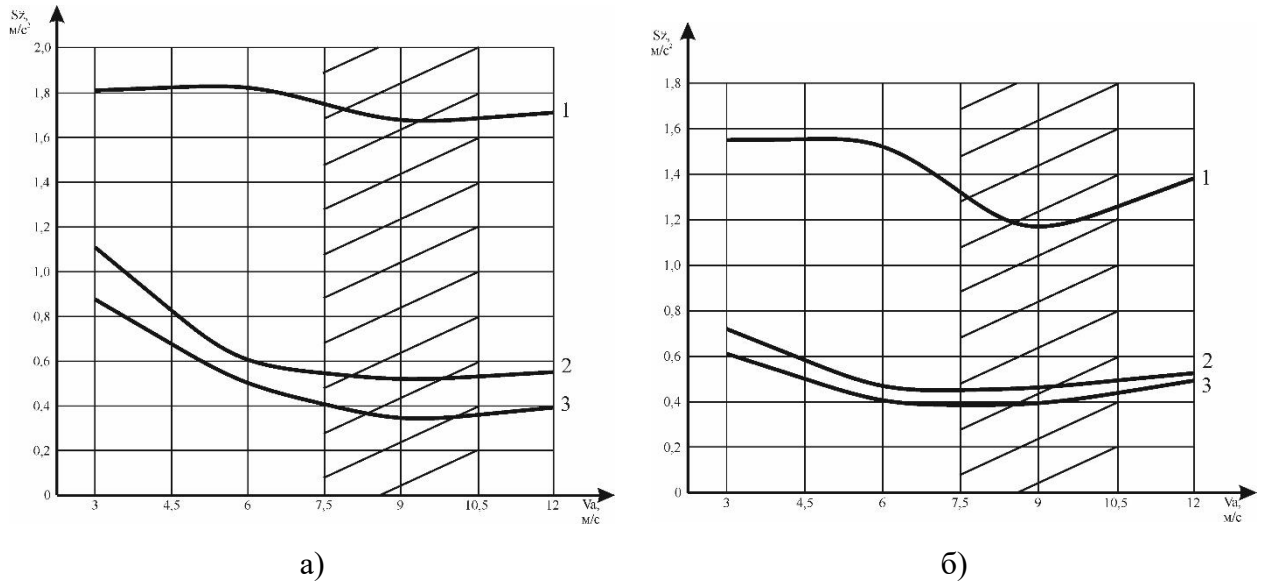


Рисунок 4.10 – Зависимость максимального вертикального ускорения на навеске штанг от скорости движения при давлении в шинах: а) 80 кПа; б) 40 кПа. Уровень заполнения бака: 1 – 0%; 2 – 50%; 3 – 100%.

Результаты испытаний показали, что степень заполнения емкости технологической жидкостью от 50% до 100% не оказывает существенного влияния на виброн нагруженность штанг. Со снижением заполнения емкости технологической жидкостью и увеличением скорости движения уровень колебаний на штангах опрыскивателя пропорционально увеличивается относительно полной заправки. При движении МЭС со скоростью 3 м/с имеет место максимальный уровень виброн нагруженности, далее с увеличением скорости движения, время взаимодействия шин с неровностью уменьшается, и как следствие снижается виброн нагруженность штанг. Минимальный уровень колебаний на штангах при различном давлении воздуха в шинах и различной степени заправки емкости достигает при скорости движения МЭС 9 м/с. Установлено, что в диапазоне скоростей 7,5-10,5 м/с имеет место минимальный уровень колебаний при различной степени заполнения емкости технологической жидкостью и давлениях воздуха в шинах. В диапазоне скоростей от 9 до 12 м/с уровень колебаний незначительно увеличивается, что обусловлено возникновением галопирования МЭС.

Самым вибронегруженным является режим движения МЭС в порожнем состоянии. Так, при движении в порожнем состоянии, в диапазоне скоростей от 3 до 6 м/с уровень колебаний штанг остается практически постоянным, далее снижается до минимального значения при скорости 9 м/с, затем незначительно возрастает при давлении воздуха в шинах 80 кПа, а при давлении 40 кПа имеет место более интенсивный рост колебаний штанг до скорости 12 м/с.

При движении МЭС со скоростью 9 м/с и давления воздуха в шинах 80 кПа уровень колебаний на навеске штанг относительно порожней заправки снижается в 3 раза при заправке емкости на 50%, и в 4,8 раза при полной заправке. При движении МЭС с этой же скоростью, но давлении воздуха в шинах 40 кПа уровень колебаний на навеске штанг относительно порожней заправки снизился в 2,6 раза при заправке емкости на 50%, и в 2,9 раза снизился при полной заправке.

Стоит отметить тенденцию снижения максимального вертикального ускорения на навеске штанг опрыскивателя мобильного энергетического средства в диапазоне скоростей от 3 м/с до 9 м/с и небольшое возрастание в диапазоне от 9 м/с до 12 м/с. Для обоснования зависимостей ускорений от скорости движения МЭС были рассмотрены спектры вертикальных ускорений на задней навеске при давлении в шинах 40 кПа и уровня заполнения бака опрыскивателя 0 % (рисунок 4.11).

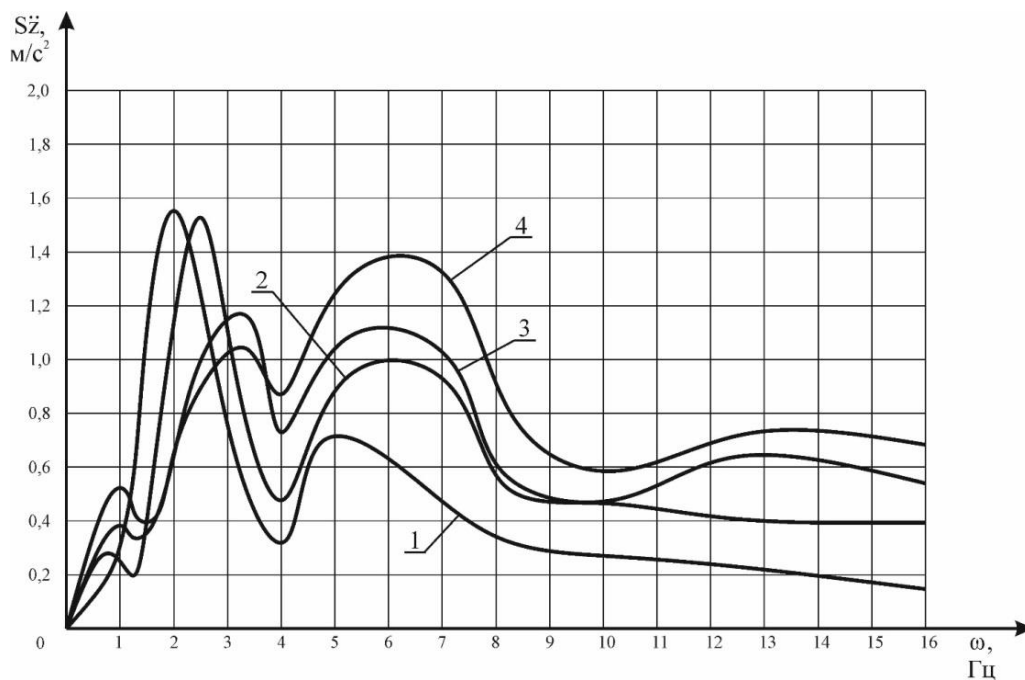


Рисунок 4.11 – Спектры вертикальных ускорений на навеске штанг при уровне заполнения бака 0% и давлении в шинах 40 кПа на скорости движения: 1 – 3 м/с; 2 – 6 м/с; 3 – 9 м/с; 4 – 12 м/с.

Рассматривая полученные спектры ускорения, необходимо отметить два диапазона резонансных частот: первый диапазон в интервале от 1,6 Гц до 4 Гц, а второй от 4 Гц до 8 Гц. Резонансная частота на первом диапазоне смещается в область более высоких частот при увеличении скорости движения МЭС с 2 Гц при скорости движения 3 м/с до 3,15 Гц при скорости 9 и 12 м/с. Одновременно со смещением резонансной частоты вертикальное ускорение снижается с 0,1583g при скорости движения 3 м/с до 0,1065g при скорости 12 м/с (в 1,49 раз).

В то же время на втором диапазоне также резонансная частота смещается с 5 Гц при скорости 3 м/с на 6,3 Гц при скоростях движения МЭС 6, 9 и 12 м/с. Но с увеличением скорости от 3 м/с до 12 м/с в рассматриваемом интервале наблюдается рост ускорения с 0,0725g до 0,1414g (в 1,95 раз).

Таким образом, при снижении ускорений на первом резонансном интервале частот ускорения на втором резонансном интервале возрастают. На скорости движения мобильного средства до 6 м/с первый резонансный участок имеет большее ускорение, а при скорости более 9 м/с – уже второй. Соответственно максимальное вертикальное ускорение на навеске штанг будет снижаться до скорости движения 9 м/с из-за уменьшения времени взаимодействия движителя с единичной неровностью и с 9 м/с будет только возрастать, что объясняется увеличением воздействия на навеску от шин и трансмиссии.

Вторым этапом экспериментальных исследований предусматривалась оценка влияния на вибронагруженность штанг опрыскивателя давления воздуха в шинах и скорости движения МЭС в порожнем состоянии, без заправки бака технологической жидкостью (рис.4.12). Установлено, что со снижением давления воздуха в шинах также снижается уровень колебаний на навеске штанг опрыскивателя. В диапазоне скоростей 7,5-10,5 м/с, имеет место минимальный уровень колебаний при различных давлениях воздуха в шинах, минимум колебаний достигается при скорости 9 м/с. Давление воздуха в шинах 80 кПа устанавливается при переезде с поля на поле при движении по грунтовым укатанным дорогам и по дорогам с покрытием. При выполнении технологических операций предыдущими исследованиями было рекомендовано давление воздуха в шинах 40 кПа. Давление воздуха в шинах 20 кПа рекомендовано для кратковременного преодоления труднопроходимых участков поля при выполнении работ на почвах с низкой несущей способностью.

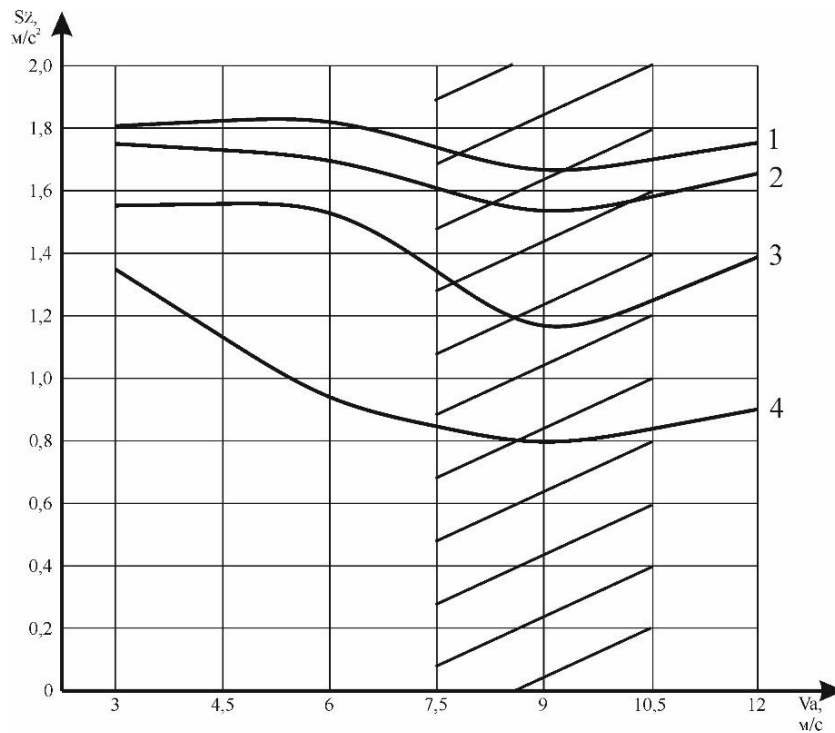


Рисунок 4.12 – Зависимость максимального вертикального ускорения на навеске штанг от скорости движения МЭС при уровне заполнения бака 0% и давлении в шинах: 1 – 80 кПа; 2 – 60 кПа; 3 – 40 кПа; 4 – 20 кПа.

Максимальный уровень колебаний на навеске штанг при движении МЭС в порожнем состоянии со скорости 9 м/с имеет место при давлении воздуха в шинах 80 кПа, при давлениях 60 кПа и 40 кПа уровень колебаний снижается соответственно в 1,1 и 1,4, а при давлении 20 кПа уровень колебаний снизился в 2,8 раза.

Третьим этапом экспериментальных исследований предусматривалось определение амплитуды колебаний на концах штанг опрыскивателя для наиболее вибронагруженного режима движения. Установлено, что при переезде через искусственные неровности с раскрытыми в рабочем положении штангами, расположенными на расстоянии 700 мм от опорной поверхности, во всем диапазоне скоростей движения от 3 м/с до 12 м/с, амплитуда колебаний на концах штанг не превышала 80 мм.

Проведенные исследования вибронагруженности штанг опрыскивателя показали, что оборудование МЭС шинами сверхнизкого давления оказывает щадящее воздействие на штанги опрыскивателя. На всех режимах испытаний резонансных явлений не было выявлено, при этом амплитуда колебаний на концах штанг при переезде через единичные неровности не превышал критических значений.

### 4.2.3 Оптимизация параметров динамической системы МЭС

Для определения эксплуатационных параметров проведения полевых исследований, с целью сокращения времени выполнения исследований, выполнили двухфакторную оптимизацию параметров мобильного средства. Критериями оптимизации являются три показателя вибронагруженности – максимальные за время компьютерного эксперимента вертикальные ускорения:

$a_c$  – в месте расположения сидения водителя;

$a_p$  – на раме в центре тяжести МЭС;

$a_n$  – на подвеске в месте крепления штанг опрыскивателя.

Варьируя одновременно в компьютерных экспериментах два параметра мобильного средства, можно добиться низких значений максимальных ускорений  $a_c$ ,  $a_p$ ,  $a_n$ . Данная задача относится к задачам многофакторной (двухфакторной) оптимизации. Для определения оптимальных параметров мобильного средства провели компьютерные эксперименты с 16 наборами параметров  $P_w$  и  $v_a$  (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Результаты оптимизации параметров лабораторно-полевого эксперимента.

Номер комп. эксперимента	Давление воздуха в шинах $P_w$ , кПа	Скорость движения МЭС $v_a$ , м/с	Макс. ускорение сиденья $a_c$ , м/с <sup>2</sup>	Макс. ускорение рамы $a_p$ , м/с <sup>2</sup>	Макс. ускорение навески $a_n$ , м/с <sup>2</sup>
1	20	3	0,44	0,34	1,35
2	20	6	0,37	0,57	0,93
3	20	9	0,32	0,96	0,80
4	20	12	0,30	1,09	0,90
5	40	3	0,62	0,36	1,55
6	40	6	0,54	0,75	1,52
7	40	9	0,48	1,45	1,16
8	40	12	0,36	1,72	1,39
9	60	3	0,67	0,39	1,74
10	60	6	0,60	0,82	1,69
11	60	9	0,43	1,75	1,53
12	60	12	0,41	2,00	1,65
13	80	3	0,69	0,50	1,81
14	80	6	0,66	1,20	1,82
15	80	9	0,50	2,20	1,67
16	80	12	0,47	2,38	1,75

Задачу двухфакторной оптимизации можно аналитически записать следующим образом:

$$\begin{cases} a_c(P_w, v_a) \rightarrow \min; \\ a_p(P_w, v_a) \rightarrow \min; \\ a_n(P_w, v_a) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow P_w^{\text{опт}}, v_a^{\text{опт}}, \quad (4.6)$$

где  $P_w^{\text{опт}}$  и  $v_a^{\text{опт}}$  – оптимальные значения давления воздуха в шинах и скорости движения мобильного средства.

Решение задачи оптимизации заключается в поиске такой области изменения факторов  $P_w$  и  $v_a$ , в которой одновременно минимальными будут три показателя вибронагруженности  $a_c$ ,  $a_p$ ,  $a_n$ .

На основе набора данных, полученного в результате проведения 16 оптимизационных компьютерных экспериментов, получены аналитические формулы для функций  $a_c(P_w, v_a)$ ,  $a_p(P_w, v_a)$ ,  $a_n(P_w, v_a)$ . Набор данных аппроксимировали сигмоидальными и гауссовыми функциями, позволяющими сгладить и экстраполировать результаты компьютерных экспериментов, а также более четко выявить минимум функции двух переменных.

Параметры аппроксимирующих выражений определены методом наименьших квадратов (МНК), в рамках которого минимизировалась сумма квадратов отклонений аналитической зависимости от результатов компьютерного эксперимента:

$$\sum_{i=1}^{N_{KЭ}} \left( K_{\text{аналит.}}(P_w^i, v_a^i) - K_{KЭ}^i(P_w^i, v_a^i) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (4.7)$$

где  $i$  и  $N_{KЭ}$  – порядковый номер и общее количество компьютерных экспериментов (в данном случае  $N_{KЭ} = 16$ );  $K_{\text{аналит.}}$  – искомая аналитическая зависимость критерия  $K$  от факторов  $P_w$  и  $v_a$ ;  $K_{KЭ}^i$  – значения критерия  $K$ , определенные в  $i$ -м компьютерном эксперименте с параметрами  $P_w^i$  и  $v_a^i$ .

В результате получены следующие аналитические формулы для показателей

вибронгруженности:

$$a_c(P_w, v_a) = -8,690 \cdot 10^{-5} P_w^2 + 0,01327 P_w + 0,1961 + \frac{0,002706 P_w + 0,2562 - (-8,690 \cdot 10^{-5} P_w^2 + 0,01327 P_w + 0,1961)}{1 + \exp\left(\frac{-(v_a - 7,401)}{0,8382}\right)}; \quad (4.8)$$

$$a_p(P_w, v_a) = -4,437 \cdot 10^{-6} P_w^2 + 0,002539 P_w + 0,2206 + \frac{0,02191 P_w + 0,7056 - (-4,437 \cdot 10^{-6} P_w^2 + 0,002539 P_w + 0,2206)}{1 + \exp\left(\frac{-(v_a - 6,774)}{1,213}\right)}; \quad (4.9)$$

$$a_n(P_w, v_a) = -5,530 \cdot 10^{-6} P_w^2 + 0,007158 P_w + 1,321 - \frac{14,56}{P_w} \exp\left(-\left(\frac{v_a - 9,600}{-0,001397 P_w^2 + 0,1821 P_w - 8,390}\right)^2\right), \quad (4.10)$$

где  $P_w$  измеряется в кПа,  $v_a$  – в м/с, ускорения  $a_c$ ,  $a_p$ ,  $a_n$  – в м/с<sup>2</sup>.

Полученные формулы могут использоваться для быстрой оценки (без выполнения моделирования) показателей вибронгруженности мобильного средства по известным давлению воздуха в шинах и скорости движения.

Для дальнейшего анализа функции  $a_c(P_w, v_a)$ ,  $a_p(P_w, v_a)$ ,  $a_n(P_w, v_a)$  представлены в виде графиков (рисунок 4.13) и картограмм (рисунок 4.14). Для построения графиков полученных зависимостей использовали математическую программу MathCAD 13. Графики позволяют визуально оценить основные тенденции влияния параметров мобильного средства на показатели вибронгруженности. Картограммы же оптимизации позволяют количественно определить значения показателей эффективности графо-аналитическим способом. На рисунке 4.14,  $a$  точками и стрелками показан пример использования картограммы: при давлении воздуха в шинах 40 кПа (точка  $A$ ) и скорости движения 7 м/с (точка  $B$ ), проводя перпендикулярные к осям координат прямые, получаем точку пересечения  $C$ , расположенную практически на линии уровня и устанавливаем, что ускорение на сиденье водителя составляет  $a_c = 0,5$  м/с<sup>2</sup>.

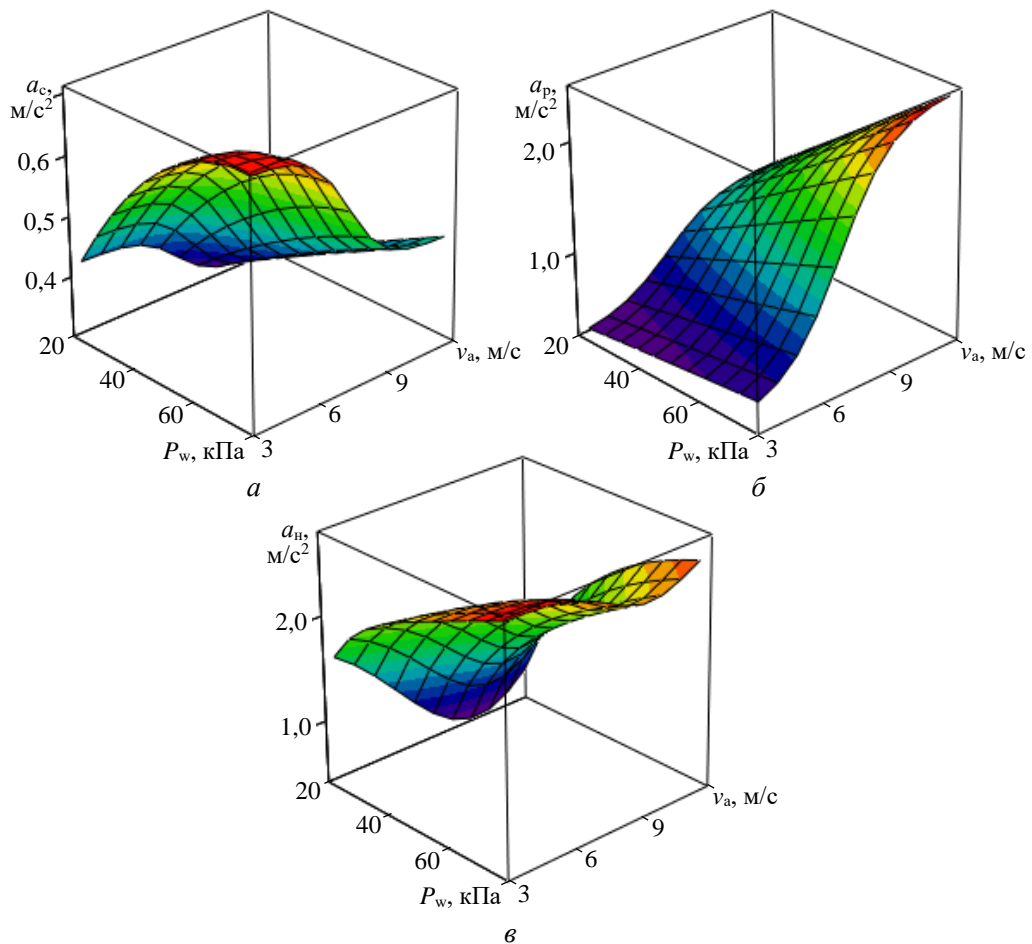


Рисунок 4.13 – Графики влияния давления воздуха в шинах  $P_w$  и скорости движения МЭС-600  $v_a$  на максимальные вертикальные ускорения на сиденье  $a_c$  (а), раме  $a_p$  (б) и навеске  $a_n$  (в)

На каждой из полученных картограмм можно выделить благоприятную область факторного пространства, обеспечивающую наименьшие значения виброускорений. Для разграничения на благоприятные и неблагоприятные области выбраны следующие линии уровня:  $a_c = 0,5 \text{ м/с}^2$  (рисунок 4.14, а),  $a_p = 1,3 \text{ м/с}^2$  (рисунок 4.14, б),  $a_n = 1,3 \text{ м/с}^2$  (рисунок 4.14, в).

Пересечение всех трех благоприятных областей, определенных по отдельным картограммам (рисунок 4.14, г) позволяет найти общую оптимальную область, в которой все три виброускорения имеют искомые максимальные значения. По расположению оптимальной области в факторном пространстве можно сделать вывод, что давление воздуха в шинах должно лежать в диапазоне 20 ... 40 кПа, при этом скорость движения должна составлять 6 ... 10 м/с. Ориентируясь на центр затемненной области на рисунке 4.14, г, можно рекомендовать в качестве точечной оценки оптимальных параметров  $P_w = 40 \text{ кПа}$ ,  $v_a = 8 \text{ м/с}$ .

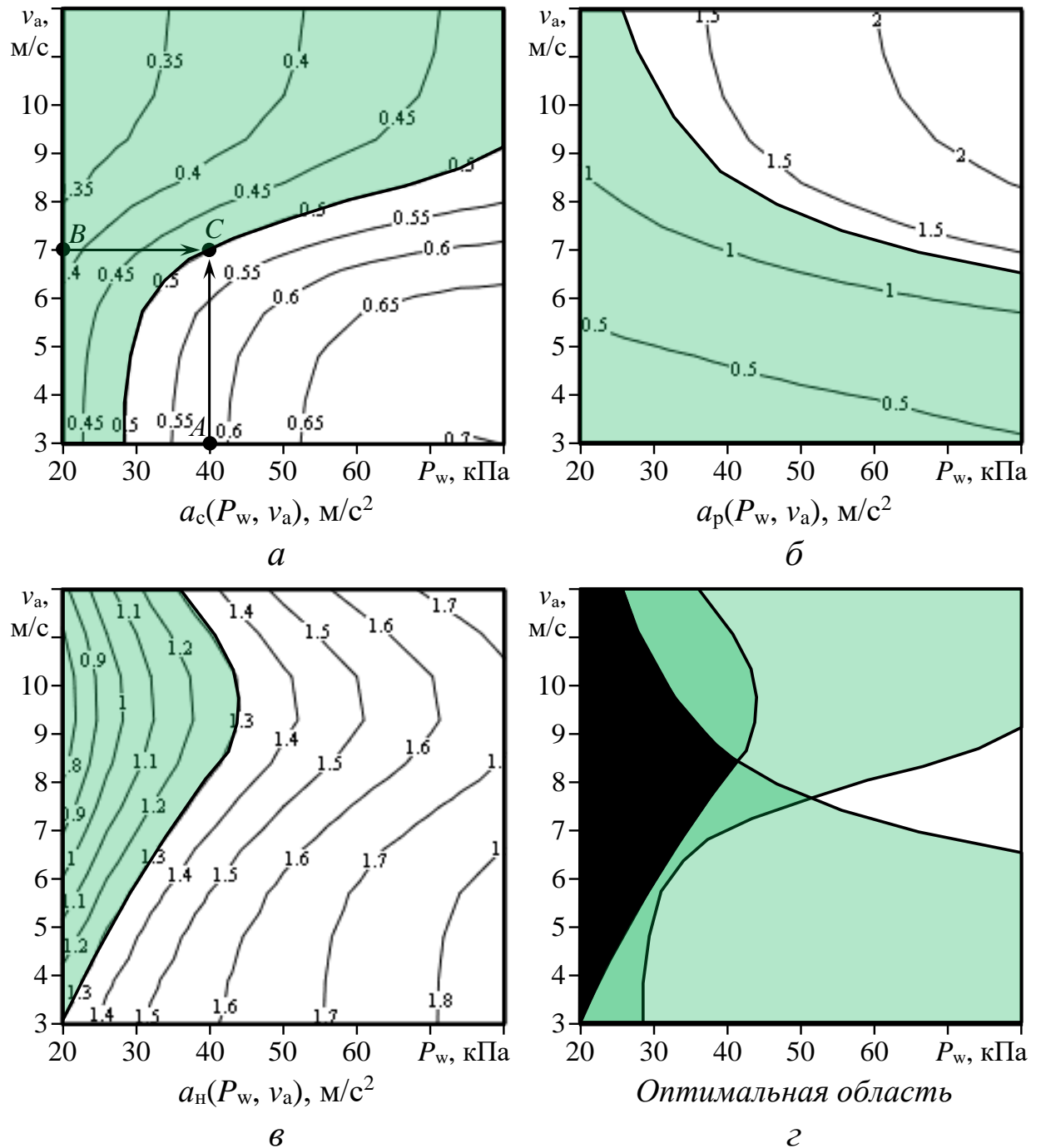


Рисунок 4.14 – Картограммы оптимизации МЭС-600. Затемнены благоприятные области факторного пространства

Таким образом, оптимальное давление в шинах составляет 20 ... 40 кПа, оптимальная скорость движения мобильного средства составляет 6 ... 10 м/с. При этом обеспечиваются максимальные уровни ускорения на сиденье – не более 0,5  $\text{м/с}^2$ , на раме – не более 1,3  $\text{м/с}^2$ , на штангах опрыскивателя – не более 1,3  $\text{м/с}^2$ .

### 4.3 Полевые испытания виброзащитных свойств мобильного средства

Получена зависимость максимальных среднеквадратичных ускорений на поворотной цапфе переднего моста МЭС-600 при движении по естественному фону с внутренним давлением воздуха в шинах 40 кПа и переменным уровнем заполнения бака технологической жидкостью (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Показатели вибронегруженности МЭС-600 при движении по естественному агрофону, давление воздуха в шинах – 40 кПа

Загрузка 0%	Скорость движения, м/с	Виброускорение м/с <sup>2</sup>		
		на оси колеса	на раме	на сиденье
0	3	1,45	0,47	0,38
	6	3,11	0,80	0,49
	9	5,49	1,42	0,87
	12	8,52	2,39	1,09
50	3	0,94	0,25	0,20
	6	1,58	0,48	0,30
	9	2,98	0,75	0,47
	12	5,70	1,55	0,55
100	3	0,79	0,26	0,18
	6	1,34	0,44	0,26
	9	2,58	0,60	0,37
	12	4,16	1,31	0,47

Наименьший уровень вибрации наблюдается со 100% загрузкой бака опрыскивателя технологической жидкостью на всем диапазоне скоростей движения (рисунок 4.15). Уменьшение уровня заполнения бака до 50% значительно увеличивает вертикальные ускорения неподрессоренных масс энергетического средства. Так на скорости движения 9 м/с уровень вибрации возрастает на 15%, а на скорости 12 м/с увеличивается на 37%. Наибольший уровень вибронегруженности самоходного штангового опрыскивателя определен с полностью пустым баком (уровень заполнения 0%). На скорости 9 м/с вертикальные ускорения увеличиваются в 2,12 раза, а на скорости 12 м/с возрастают в 2,05 раза. Скорость движения оказывает наибольшее влияние на среднеквадратичные вертикальные ускорения неподрессоренных частей мобильного энергетического средства, оборудованных шинами сверхнизкого давления. Уровень вибрации на наиболее нагруженном режиме эксплуатации

с уровнем заполнения бака 0% возрастает с увеличением скорости движения с 3 м/с до 9 м/с в 3,8 раза, а до 12 м/с в 5,9 раза.

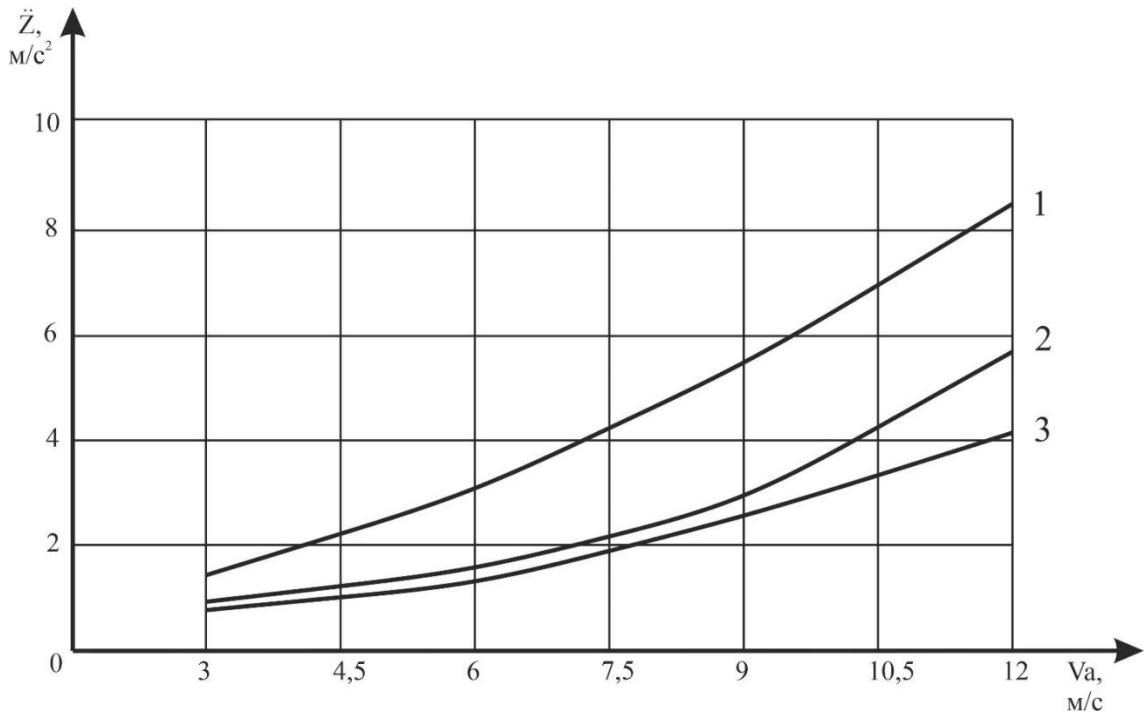


Рисунок 4.15 – Среднеквадратичные вертикальные ускорения на поворотной цапфе переднего моста при движении по естественному фону, давление воздуха в шинах 40кПа: 1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%.

Также получена зависимость вертикальных ускорений на раме над осью передних колес объекта исследований от скорости движения с различным уровнем заполнения бака опрыскивателя и давлением в шинах сверхнизкого давления 40 кПа (рисунок 4.16). Наименьший уровень виброускорений на всех скоростях движения наблюдается при загрузке бака 100%. Уменьшение уровня заполнения технологической жидкости в баке, вплоть до 0%, повышает вибрационную нагрузку на подрессоренной части мобильного средства на всех скоростях движения. Снижение загрузки до 50% на скорости движения 9 м/с увеличивает среднеквадратичные вертикальные ускорения в 1,26 раза, а на скорости 12 м/с – в 1,19 раза. Уменьшение заполнения с 50% до 0% оказывает большее воздействие на вибронагруженность, чем на интервале от 100% до 50%. Так на скорости 9 м/с вертикальные ускорения возрастают в 1,89 раза, а на скорости 12 м/с – в 1,54 раза. Как и на оси передних колес МЭС-600, скорость движения оказывает наибольшее влияние на вибрационную нагрузку на раме. При уровне заполнения бака опрыскивателя 0%

среднеквадратичные вертикальные ускорения с увеличением скорости движения с 3 м/с до 9 м/с возрастают в 3 раза, а до 12 м/с в 5 раз.

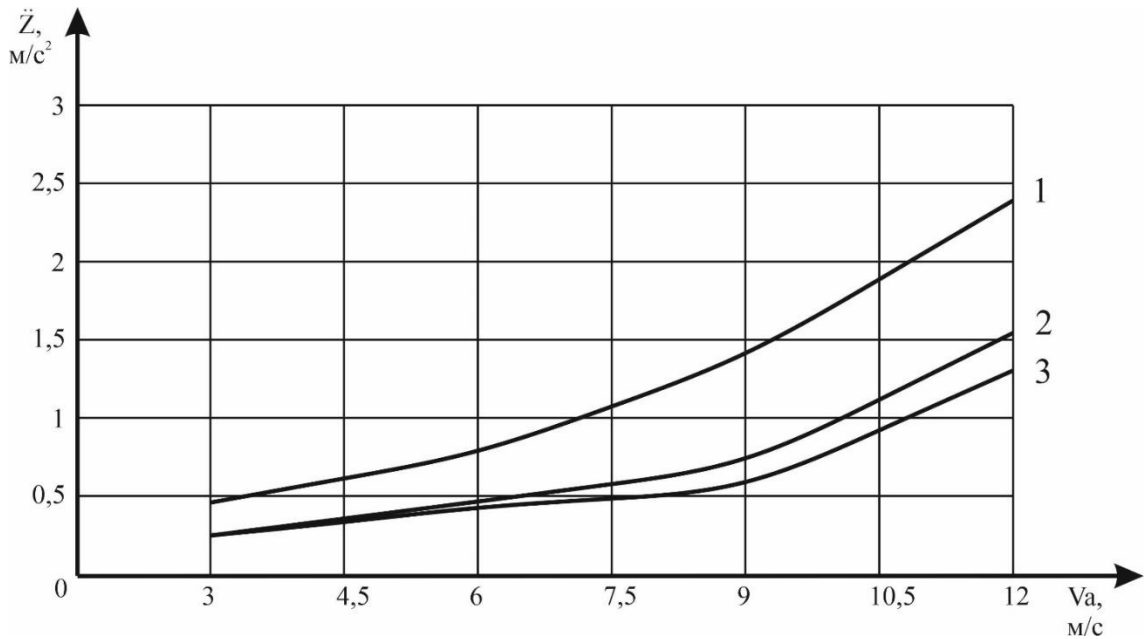


Рисунок 4.16 – Среднеквадратичные вертикальные ускорения на раме над осью переднего моста при движении по естественному фону, давление воздуха в шинах 40кПа: 1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%.

Уровень вибрации на сиденье оператора объекта исследований при внутреннем давлении в шинах сверхнизкого давления 40 кПа полностью коррелирует с полученными зависимостями ускорений от скорости движения на кулаке оси передних колес и на раме (рисунок 4.17). Уменьшение загрузки бака со 100% до 50% повышает вертикальные ускорения на скорости 9 м/с в 1,25 раза, а на скорости 12 м/с – в 1,16 раза. Уменьшение заполнения с 50% до 0% оказывает большее воздействие на вибронагруженность, чем на интервале от 100% до 50%. Так на скорости 9 м/с вертикальные ускорения возрастают в 1,86 раза, а на скорости 12 м/с – в 1,98 раза. Вибронагруженность возрастает с увеличением скорости движения при любом уровне заполнения бака опрыскивателя технологической жидкостью. При уровне заполнения бака 0% и при переходе со скорости движения с 6 м/с до 9 м/с наблюдается резкое увеличение среднеквадратичных вертикальных ускорений в 1,76 раза, в то же время и при переходе со скорости движения с 3 м/с до 6 м/с и с 9 м/с до 12 м/с наблюдается рост виброускорений в 1,28 и в 1,26 раза соответственно.

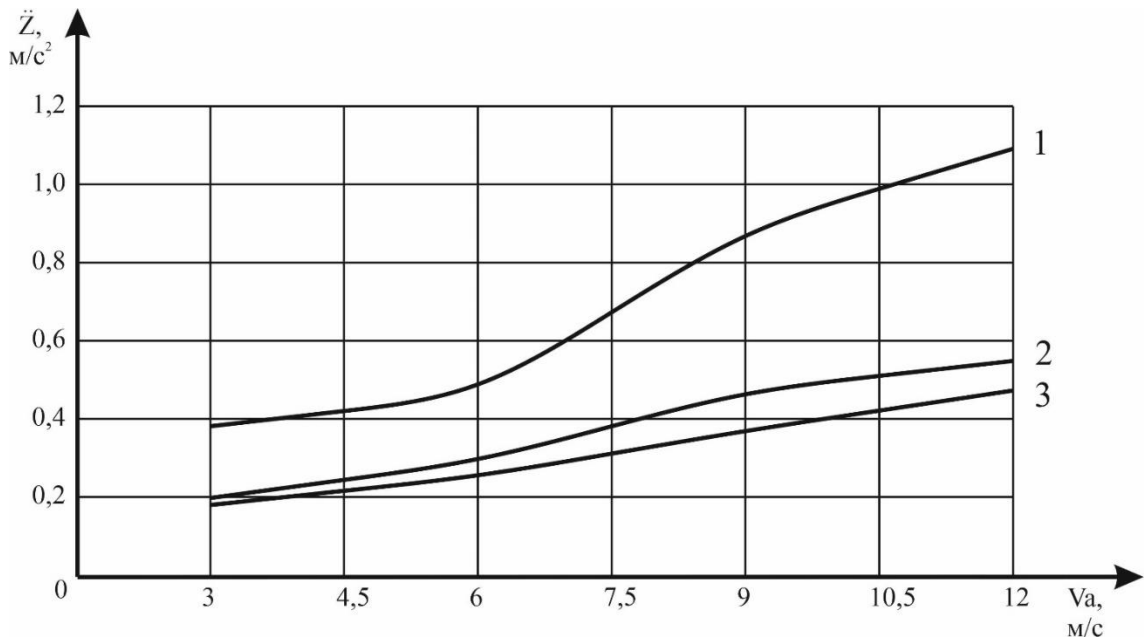


Рисунок 4.17 – Среднеквадратичные вертикальные ускорения на сиденье оператора самоходного опрыскивателя при движении по естественному фону, давление воздуха в шинах 40кПа: 1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%;3 – загрузка бака 100%.

Получена зависимость среднеквадратичных вертикальных ускорений от скорости движения на навеске штанг опрыскивателя при давлении воздуха в шинах сверхнизкого давления 40 кПа. Из спектра среднеквадратичных вертикальных ускорений на навеске штанг (приложение Б: таблица 10 – 12) видно, что при уровне загрузки бака технологической жидкостью 0% максимальные показатели приходятся на частоту 1 Гц.

А при заполнении бака 50% и 100% максимальные значения виброускорений находятся в интервале частот от 6,3 Гц до 40 Гц. Уменьшение уровня заполнения бака опрыскивателя от 100% до 50% повышает вертикальные виброускорения на скоростях движения от 3 м/с до 6 м/с на 8% и 5% соответственно. На скорости движения 9 м/с и 12 м/с на том же интервале загрузки вибронагруженность повышается в 1,25 раза (рисунок 4.18).

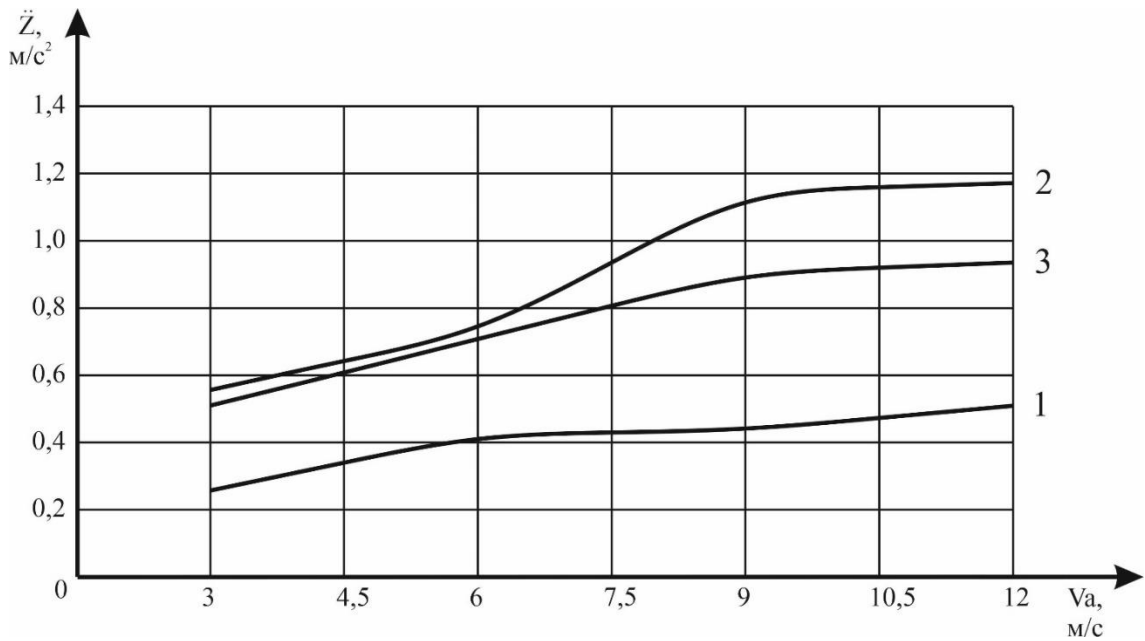


Рисунок 4.18 – Среднеквадратичные вертикальные ускорения на навеске штанг самоходного опрыскивателя при движении по естественному фону, давление воздуха в шинах 40кПа: 1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%.

Дальнейшее снижение уровня заполнения бака опрыскивателя с 50% до 0% уменьшает вертикальные ускорения на скорости движения 9 м/с в 2,5 раза, а на скорости 12 м/с – в 2,3 раза. В свою очередь скорость движения по естественному агрофону оказывает сопоставимое влияние с переменной загрузкой технологического бака на виброн нагруженность штанг. Повышение скорости движения с 3 м/с до 9 м/с увеличивает вертикальные ускорения в 2 раза, а достижение скорости 12 м/с – в 2,1 раза. Дополнительно определена амплитуда колебаний на краях штанг самоходного опрыскивателя при движении по естественному фону. Полученные значения внесены в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Показатели виброн нагруженности штанг объекта исследований при движении по естественному агрофону, давление воздуха в шинах – 40 кПа

Скорость движения, м/с	Загрузка 0%		Загрузка 50%		Загрузка 100%	
	Вибро-ускорение м/с <sup>2</sup>	Амплитуда, мм	Вибро-ускорение м/с <sup>2</sup>	Амплитуда, мм	Вибро-ускорение м/с <sup>2</sup>	Амплитуда, мм
3	0,26	78	0,56	50	0,51	46
6	0,41	108	0,75	78	0,71	66
9	0,44	133	1,11	100	0,89	80
12	0,51	152	1,17	105	0,94	84

Наименьшая величина колебаний наблюдается при заполнении технологической емкости 100% на всех скоростях движения (рисунок 4.19). В то же время при уменьшении уровня загрузки со 100% до 50% амплитуда на скоростях движения 9 м/с и 12 м/с возрастает в 1,25 раза. А при снижении уровня заполнения бака технологической жидкости с 50% до 0% амплитуда колебаний на скоростях движения 9 м/с и 12 м/с возрастает в 1,33 и в 1,45 раза соответственно. Скорость движения равнозначно влияет на величину колебаний на краях штанг опрыскивателя. Так на наиболее нагруженном режиме эксплуатации (загрузка 0%) амплитуда колебаний увеличивается в 1,95 раза при увеличении скорости движения с 3 м/с до 12 м/с. Полученные данные свели в таблицу 4.9.

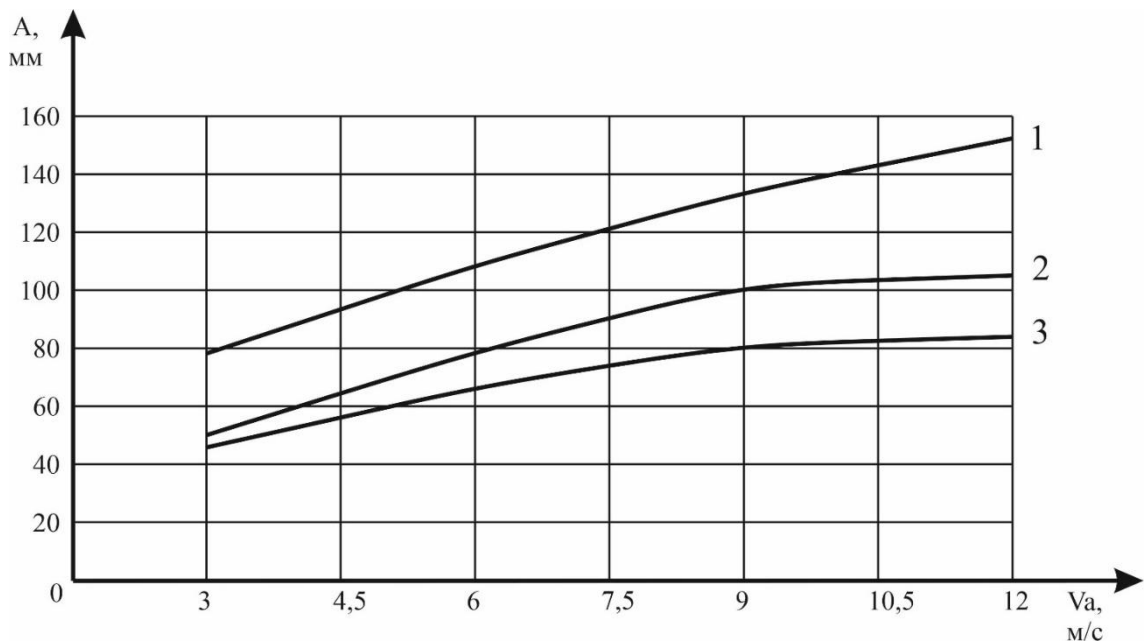


Рисунок 4.19 – Амплитуда колебаний на краях штанг самоходного опрыскивателя при движении по естественному фону, давление воздуха в шинах 40кПа:  
1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%.

В ходе проведения исследований по определению положения штанг на разворотных участках получили зависимость положения краев штанг до опорного основания от скорости движения (рисунок 4.20). Полученные значения внесены в таблицу 4.10.

Таблица 4.10 – Показатели положения краев штанг опрыскивателя до опорного основания на разворотных участках, давление воздуха в шинах – 40 кПа

Скорость движения, м/с	Положение краев штанг, см		
	Загрузка 0%	Загрузка 50%	Загрузка 100%
1,5	85	90	115
3	75	81	103
4,5	49	58	78
6	20	26	46

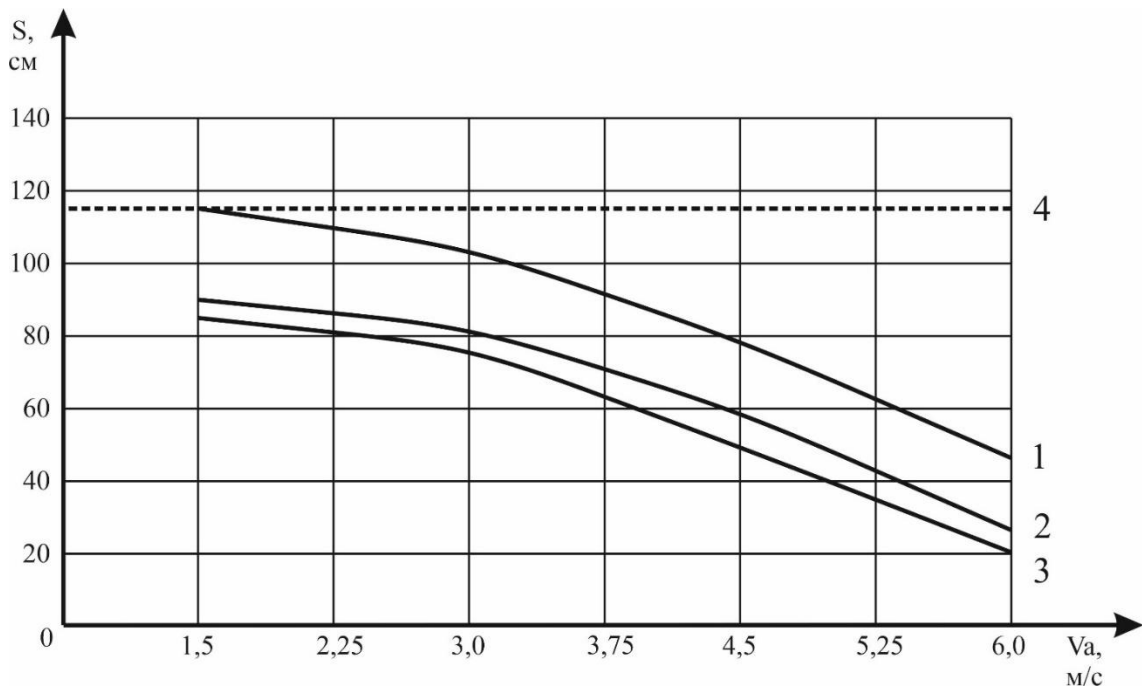


Рисунок 4.20 – Положение штанг самоходного опрыскивателя при движении по естественному фону на разворотном участке, давление воздуха в шинах 40кПа: 1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%; 4 – положение

Наибольший крен штанг наблюдается при полностью заполненном баке. Снижение уровня загрузки до 50% уменьшает увеличивает высоту краев штанг опрыскивателя в 1,18 раза на скорости движения 4,5 м/с, а на скорости 6 м/с – в 1,3 раза. При уменьшении уровня заполнения бака с 50% до 0% положение штанг увеличивается на скорости движения 4,5 м/с в 1,34 раза, а на скорости 6 м/с – в 1,77 раза. В свою очередь скорость движения оказывает наибольшее влияние на высоту расположения штанг опрыскивателя. Так увеличение скорости движения с 1,5 м/с до 6 м/с при уровне загрузки 100% уменьшает положение краев штанг в 4,25 раза. Эксперимент на скорости движения 7,5 м/с был остановлен, так как происходит частичное касание края штанги опорного основания. К тому же, движение на

поворотах с заполнением бака 100% становится небезопасным, наблюдается увод объекта исследований с траектории движения.

#### 4.4 Экспериментальные исследования воздействия на растения шин сверхнизкого давления

На выбранных участках колеи выполнили подсчет количества растений и их высоты стояния, по сравнению с контрольными участками (рисунок 4.21). Полученные значения в результате проведения эксперимента по воздействию шин сверхнизкого давления на растения приведены в таблице 4.11.



Рисунок 4.21 – Фрагмент проведения полевых испытаний 26 марта 2023 года: а) колея после воздействия движителя; б) испытательный участок в колее.

Таблица 4.11 – Результаты проведения полевого эксперимента по воздействию шин сверхнизкого давления на растения на прямолинейном участке

№ участка	Количество растений, шт	Средняя высота на участке, мм	Давление воздуха в шинах, кПа	Средняя полеглость, %	Средняя высота через 7 дней, мм
1	84	91	Контрольный участок	0	103
2	83	90			
3	90	92			
4	91	92			
5	87	91			
6	88	38	20	57	104
7	91	39			
8	84	40			
9	85	38			
10	88	40	40	69	104
11	87	26			
12	87	28			
13	89	29			

Продолжение таблицы 4.11

14	115	29			
15	83	28			
16	91	19	60	77	102
17	87	21			
18	88	20			
19	90	22			
20	91	21			
21	85	14	80	83	105
22	85	15			
23	86	16			
24	88	16			
25	85	15			

Полное восстановление высоты стояния растений на измеряемых участках было отмечено спустя 7 дней, после выполнения технологической операции (рисунок 4.22). Угнетения роста и механических повреждений листовых пластинок не наблюдается, имеется лишь небольшое естественное варьирование густоты стояния растений. Больше время восстановления примятой озимой пшеницы в фазе кущения замечено на участках разворота, составившее 10 дней после наезда шинами на растения (таблица 4.12). В ходе проведения исследований отмечено полное восстановление высоты стояния примятых растений через 7 дней на прямолинейных участках движения и через 10 дней на разворотных участках, без угнетения роста и механических повреждений.



а)



б)

Рисунок 4.22 – Фрагмент проведения полевых испытаний 1 апреля 2023 года: а) колее после воздействия движителя; б) испытательный участок в колее.

Таблица 4.12 – Результаты проведения полевого эксперимента по воздействию шин сверхнизкого давления на растения на участке разворота

№ участка	Количество растений, шт	Средняя высота на участке, мм	Давление воздуха в шинах, кПа	Средняя полеглость, %	Средняя высота через 10 дней, мм
1	100	92	Контрольный участок	0	104
2	99	93			
3	108	90			
4	109	91			
5	104	91			
6	104	13	80	87	104
7	91	11			
8	97	10			
9	107	13			
10	99	11			

#### 4.5 Расхождение полученных теоретических и экспериментальных значений

Для проверки адекватности разработанной программы и составленной динамической модели МЭС необходимо сравнить полученные теоретические (по результатам проведенного компьютерного эксперимента) и экспериментальные зависимости. Проверка достоверности (адекватности) разработанной модели штангового опрыскивателя выполняется путем сравнения полученных теоретических и экспериментальных значений [23, 40]. В связи с максимальным объемом выборки лабораторно-полевых исследований равных  $n = 12$ , проверка теоретических значений выполняется методом сравнения средних, при котором допускается гипотеза о равенстве средних значений совокупностей, из которых получены выборки.

Выполняется расчет сравнением двух выборочных средних, полученных в результате проведения лабораторно-полевых и теоретических исследований, путем определения их нормальных дисперсий. Расчетная статистика  $t$  сравнивается с коэффициентами стандартного нормального распределения для двусторонней доверительной вероятности  $P = 1 - \alpha$ , где  $\alpha$  – уровень значимости. Коэффициент определяется при помощи таблицы значений распределения Стьюдента с числом степеней свободы  $k = n_1 + n_2 - 2$ .

Если вычисленное значение статистики  $t$  принадлежит критической области, т.е.  $t > t_{кр}$ , то гипотеза о равенстве двух средних нормальных совокупностей (адекватности модели) отвергается, в противном случае гипотеза принимается.

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}; \quad (4.11)$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – средние значения соответствующих выборок  $n$ ;  $S$  – выборочное среднеквадратическое отклонение.

$$\bar{x} = \frac{1}{n_x} \sum_{i=1}^n x_i n_i; \quad (4.12)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n_x - 1} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2; \quad (4.13)$$

Расчет относительного отклонения полученных теоретических значений от результата эксперимента определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|x_{\text{эксп}} - x_{\text{теор}}|}{x_{\text{теор}}} \cdot 100\%. \quad (4.14)$$

Выполним проверку адекватности разработанной модели штангового опрыскивателя. Полученные результаты сравнения занесем в таблицу 4.13.

Таблица 4.13 – Результаты проверки адекватности модели штангового опрыскивателя

Название критерия сравнения	Загрузка, %	Средние значение выборки		Выборочное среднеквадратическое отклонение		Расчётная статистика, $t$
		экспер., $x$	теория, $y$	экспер., $S_x$	теория, $S_y$	
Рама	0	1,28	1,25	0,5638	0,6929	0,08165
	50	0,69	0,77	0,1780	0,2666	0,26763
	100	0,70	0,64	0,2425	0,1669	0,22175
Сиденье	0	0,70	0,69	0,0885	0,0883	0,05731
	50	0,37	0,39	0,0155	0,0300	0,24898
	100	0,34	0,32	0,0095	0,0145	0,34903
Навеска	0	0,40	0,41	0,0192	0,0129	0,23635
	50	0,93	0,89	0,0741	0,0833	0,20144
	100	0,76	0,75	0,0689	0,0438	0,09261
Амплитуда колебаний	0	117,75	119,75	879,1	1152,9	0,10519
	50	85,92	83,00	553,2	708,7	0,1952
	100	69,17	67,75	250,5	360,9	0,1344
Положение штанг при повороте	0	29,75	46,60	755,1	1684,8	0,84262
	50	51,17	64,40	667,6	1730,3	0,66027
	100	57,75	72,80	701,8	1719,2	0,75032

Значения  $t$  полученной таблицы сравним со значением  $t_{кр} = 2,1314$ , которое определяется при помощи таблицы значений распределения Стьюдента с числом степеней свободы  $k=14$ . Видно, что ни одно значение  $t$  не превышает максимальное допустимое значение. Таким образом, модель штангового опрыскивателя является адекватной.

Сравним экспериментальные результаты виброн нагруженности с учетом погрешности с теоретическими на основных элементах МЭС: сиденье оператора, рамы, навески штанг опрыскивателя колебаний штанг и отклонения штанг на разворотных участках при движении по естественному фону с давлением в шинах сверхнизкого давления 40 кПа и скорости движения от 3 м/с до 12 м/с.

Полученные зависимости максимального ускорения на раме от скорости движения, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально. Результаты расчетов приведены в таблице 4.14 и рисунке 4.23.

Таблица 4.14 – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей на раме МЭС

Загрузка, %	Скорость, м/с	Экспериментальное значение, м/с <sup>2</sup>	Верхнее значение погрешности «+»	Нижнее значение погрешности «-»	Теоретическое значение, м/с <sup>2</sup>	Расхождение значений, %
0%	3	0,470	0,057	0,051	0,444	5,78
	6	0,804	0,098	0,087	0,817	1,59
	9	1,424	0,174	0,155	1,462	2,60
	12	2,392	0,292	0,260	2,307	3,70
50%	3	0,253	0,031	0,028	0,256	1,18
	6	0,475	0,058	0,052	0,519	8,31
	9	0,755	0,092	0,082	0,847	10,91
	12	1,550	0,189	0,169	1,453	6,63
100%	3	0,255	0,031	0,028	0,253	0,90
	6	0,437	0,053	0,047	0,461	5,35
	9	0,600	0,073	0,065	0,658	8,80
	12	1,306	0,159	0,142	1,205	8,39

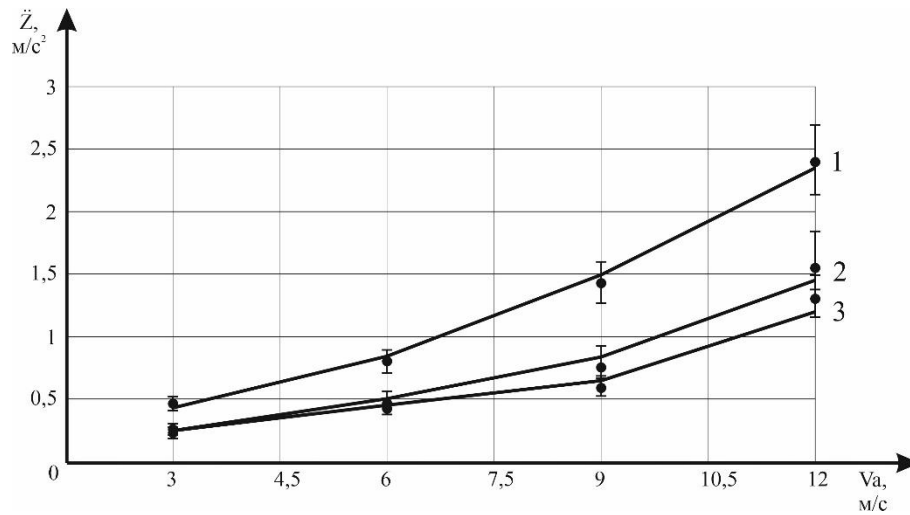


Рисунок 4.23 – Сравнение теоретических и экспериментальных результатов ускорений на раме МЭС: 1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%.

Наибольшее расхождение в результатах наблюдается при загрузке бака 50% и скорости движения 9 м/с, составляющее 10,91%.

Сравним зависимости максимального ускорения на сиденье оператора от скорости движения, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально. Результаты расчетов приведены в таблице 4.15 и рисунке 4.24.

Таблица 4.15 – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей на сиденье МЭС

Загрузка, %	Скорость, м/с	Экспериментальное значение, м/с <sup>2</sup>	Верхнее значение погрешности «+»	Нижнее значение погрешности «-»	Теоретическое значение, м/с <sup>2</sup>	Расхождение значений, %
0%	3	0,385	0,047	0,042	0,366	4,99
	6	0,492	0,060	0,053	0,547	10,09
	9	0,867	0,106	0,094	0,806	7,59
	12	1,090	0,133	0,118	1,045	4,24
50%	3	0,203	0,025	0,022	0,206	1,69
	6	0,302	0,037	0,033	0,312	3,36
	9	0,466	0,057	0,051	0,452	3,11
	12	0,551	0,067	0,060	0,605	9,05
100%	3	0,183	0,022	0,020	0,190	3,36
	6	0,260	0,032	0,028	0,258	0,94
	9	0,372	0,045	0,040	0,365	1,95
	12	0,475	0,058	0,052	0,463	2,48

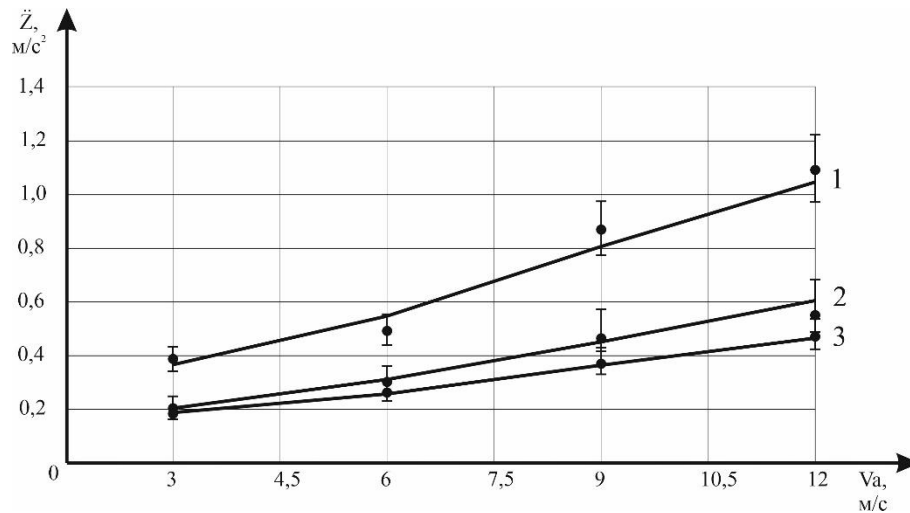


Рисунок 4.24 – Сравнение теоретических и экспериментальных результатов ускорений на сиденье МЭС: 1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%.

Наибольшее расхождение в результатах наблюдается при загрузке бака 0% и скорости движения 6 м/с, составляющее 10,09%.

Сравним зависимости максимального ускорения на навеске от скорости движения, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально. Результаты расчетов приведены в таблице 4.16 и рисунке 4.25.

Таблица 4.16 – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей на навеске МЭС

Загрузка, %	Скорость, м/с	Экспериментальное значение, м/с <sup>2</sup>	Верхнее значение погрешности «+»	Нижнее значение погрешности «-»	Теоретическое значение, м/с <sup>2</sup>	Расхождение значений, %
0%	3	0,259	0,032	0,028	0,273	5,13
	6	0,411	0,050	0,045	0,376	9,25
	9	0,442	0,054	0,048	0,462	4,25
	12	0,508	0,062	0,055	0,538	5,48
50%	3	0,556	0,068	0,060	0,553	0,48
	6	0,745	0,091	0,081	0,779	4,35
	9	1,113	0,136	0,121	1,019	9,32
	12	1,171	0,143	0,127	1,218	3,84
100%	3	0,512	0,063	0,056	0,509	0,59
	6	0,707	0,086	0,077	0,664	6,50
	9	0,891	0,109	0,097	0,839	6,12
	12	0,936	0,114	0,102	0,991	5,56

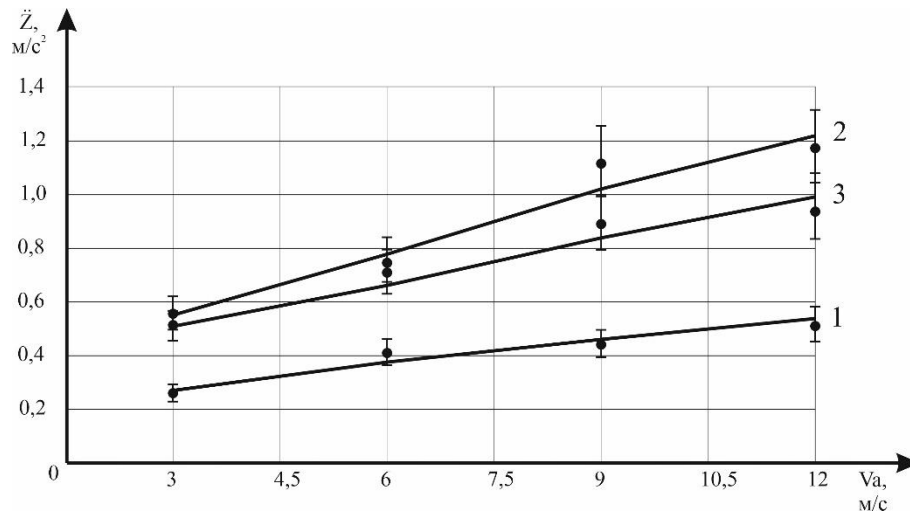


Рисунок 4.25 – Сравнение теоретических и экспериментальных результатов ускорений на сиденье МЭС: 1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%.

Наибольшее расхождение в результатах наблюдается при загрузке бака 50% и скорости движения 9 м/с, составляющее 9,32%.

Сравним зависимости амплитуды колебаний штанг от скорости движения, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально. Результаты расчетов приведены в таблице 4.17 и рисунке 4.26.

Таблица 4.17 – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей амплитуды колебаний штанг опрыскивателя

Загрузка, %	Скорость, м/с	Экспериментальное значение, мм	Значение погрешности «+-»	Теоретическое значение, мм	Расхождение значений, %
0%	3	78	7,5	80	2,50
	6	108	7,5	107	0,93
	9	133	7,5	133	0,00
	12	152	7,5	159	4,40
50%	3	50	7,5	51	1,96
	6	78	7,5	74	5,41
	9	100	7,5	94	6,38
	12	105	7,5	112	6,25
100%	3	46	7,5	45	2,22
	6	66	7,5	61	8,20
	9	80	7,5	76	5,26
	12	84	7,5	89	5,62

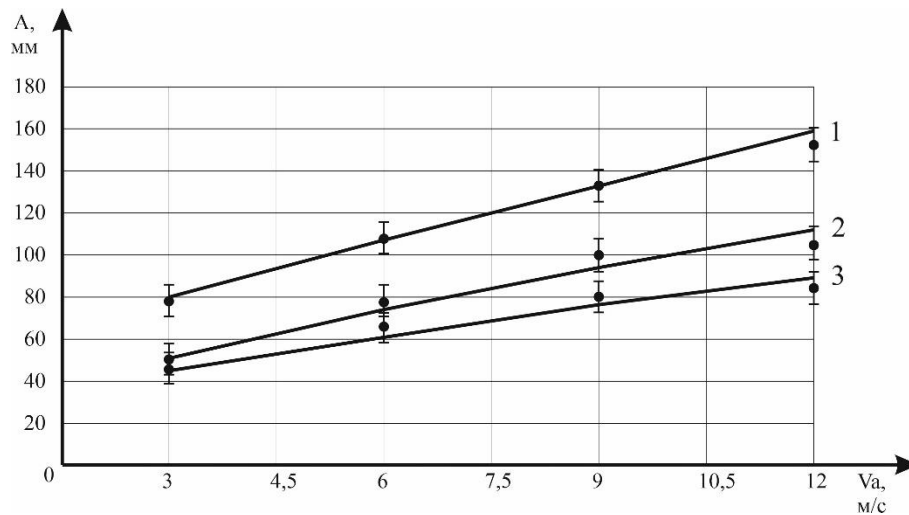


Рисунок 4.26 – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей амплитуды колебаний штанг опрыскивателя: 1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%.

Наибольшее расхождение в результатах наблюдается при загрузке бака 100% и скорости движения 6 м/с, составляющее 8,2%.

Сравним зависимости отклонения краев штанг от нейтрального положения от скорости движения на разворотном участке, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально. Результаты расчетов приведены в таблице 4.18 и рисунке 4.27.

Таблица 4.18 – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей отклонения штанг опрыскивателя на разворотном участке

Загрузка, %	Скорость, м/с	Экспериментальное значение, см	Значение погрешности «+-»	Теоретическое значение, см	Расхождение значений, %
0%	1,5	0	7,5	0	0,00
	3	12	7,5	18	33,33
	4,5	37	7,5	42	11,90
	6	69	7,5	70	1,43
50%	1,5	25	7,5	18	38,89
	3	34	7,5	35	2,86
	4,5	57	7,5	59	3,39
	6	89	7,5	88	1,14
100%	1,5	30	7,5	27	11,11
	3	40	7,5	43	6,98
	4,5	66	7,5	67	1,49
	6	95	7,5	97	2,06

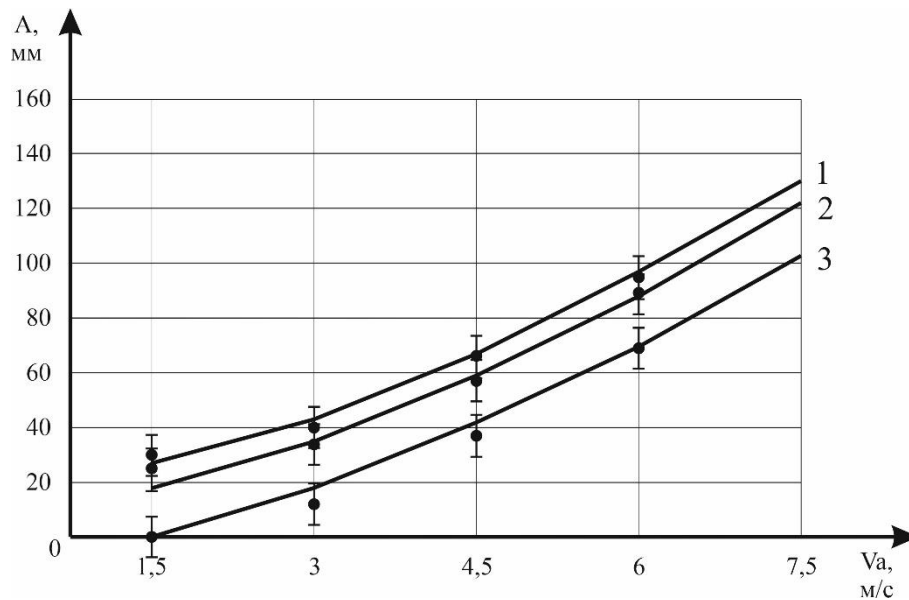


Рисунок 4.27 – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей отклонения штанг опрыскивателя на разворотном участке:  
1 – загрузка бака 0%; 2 – загрузка бака 50%; 3 – загрузка бака 100%.

Наибольшее расхождение в результатах наблюдается при загрузке бака 50% и скорости движения 3 м/с, составляющее 38,89%.

Дополнительно проверим адекватность модели взаимодействия шин сверхнизкого давления (ШСНД) с растениями на мобильном средстве МЭС-600 (таблица 4.19).

Таблица 4.19 – Результаты проверки адекватности модели взаимодействия ШСНД с растениями.

Название критерия сравнения	Загрузка, %	Средние значение выборки		Выборочное среднее квадратическое отклонение		Расчётная статистика, $t$
		экспер., $x$	теория, $y$	экспер., $Sx$	теория, $Sy$	
Воздействие на растения	100%	71,50	72,75	119,2	80,9	0,24426

Значения  $t$  полученной таблицы меньше значения  $t_{кр} = 2,0739$  при числе степеней свободы  $k=22$ . Таким образом, модель взаимодействия шин сверхнизкого давления с растениями является адекватной.

Сравним зависимости воздействия шин сверхнизкого давления на растения, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально. Результаты расчетов приведены в таблице 4.20 и рисунке 4.28.

Таблица 4.19 – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей воздействия шин сверхнизкого давления на растения

Загрузка, %	Давление, кПа	Экспериментальное значение, %	Значение погрешности %	Теоретическое значение, %	Расхождение значений, %
100%	20	57	5	60	-5,00
	40	69	5	73	-5,48
	60	77	5	78	-1,28
	80	83	5	80	3,75

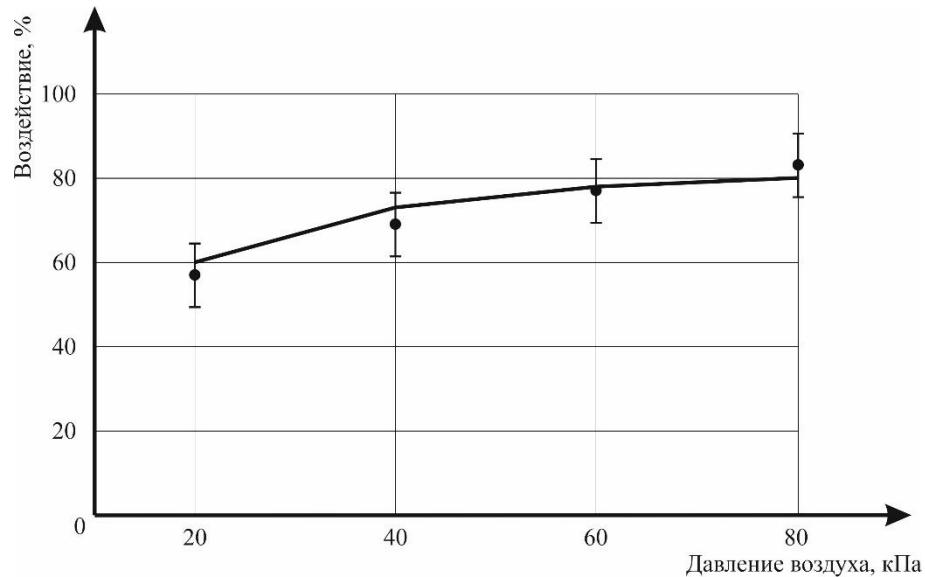


Рисунок 4.28 – Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей воздействия шин сверхнизкого давления на растения

Наибольшее расхождение в результатах наблюдается при давлении воздуха в шинах 40 кПа, составляющее 5,48%.

#### 4.6 Выводы по главе 4

1. По результатам проведения лабораторных испытаний получили зависимости нагрузки от деформации упругого элемента подвески. для пружины  $\psi = 0,05149$ ; для виброизолятора  $\psi = 0,2004$ .

2. Вариант компоновки МЭС-600 с выносом кабины оператора за ось передних колес, оборудованного шинами сверхнизкого давления с независимой подвеской, позволяет качественно изменить характер вибронагруженности его динамической системы. Характеристика вибронагруженности имеет в до резонансной и за

резонансной зонах линейную зависимость, а в резонансной зоне - прогрессивно-регрессивную зависимость. Наибольшее влияние на величину колебаний МЭС-600 оказывают изменение давления воздуха в шинах сверхнизкого давления и скорость движения.

3. Экспериментально установлено, что при скоростных режимах движения от 3 м/с до 12 м/с уровень колебаний на сиденье оператора находится в диапазоне от 0,063g до 0,037g и не превышает нормативных показателей. Следовательно, введение локального подрессоривания сиденья оператора не целесообразно при компоновочной схеме, где кабина оператора вынесена за ось передних колес.

4. Испытания на искусственных неровностях показали, что динамическая система МЭС-600 обладает высокими виброзащитными свойствами: при полной заправке и при 50% заправке бака уровень колебаний над передним мостом снизился в пять раз, а при движении в порожнем состоянии снизился в 3, 7 раза, относительно колебаний на оси колеса; на сиденье оператора при различных заправках бака уровень колебаний снизился в среднем от 3,1 до 4,5 раз, относительно колебаний над передним мостом.

5. Минимальный уровень колебаний на штангах опрыскивателя при различных режимах работы имеет место в диапазоне скоростей 7,5 – 10,5 м/с. При этом снижение давления воздуха в шинах с 80 кПа до 20 кПа позволяет снизить виброн нагруженность штанг в 2,8 раза.

6. Проведенные исследования показали, что снижение заправки бака технологической жидкостью со 100% до 50%, не оказывает существенного влияния на виброн нагруженность штанг опрыскивателя. Увеличение виброн нагруженности имеет место в диапазоне заправок от 50% до порожнего состояния. Самым виброн нагруженным для штанг опрыскивателя является режим движения в порожнем состоянии.

7. Экспериментально установлено, что при движении по единичным неровностям в диапазоне скоростей от 3 м/с до 12 м/с штанги опрыскивателя устойчиво находились в горизонтальном положении, интенсивных колебаний и резонансных режимов секций штанг не наблюдалось.

8. Проведенные полевые исследования виброзащитных свойств МЭС-600 свидетельствуют о высоких плавности хода при движении по естественному агрофону. Наиболее вибронегруженный режим эксплуатации на сиденье оператора, не подрессоренных и подрессоренных частях самоходного опрыскивателя соответствует загрузки 0%. Скорость движения 9 м/с и изменение уровня заполнения бака опрыскивателя оказывает сопоставимое воздействие на вертикальные ускорения на сиденье, отличающихся на 10%.

9. Наибольший уровень колебаний на навеске штанг опрыскивателя отмечен при уровне загрузки бака 50% на всех скоростях движения. Исходя из спектра вертикальных ускорений, уменьшение вибронегруженности связано со снижением заполнения технологической емкости и смещением частоты максимальной величины ускорений в область более низких частот (1 Гц).

10. Наибольшая амплитуда колебаний при движении по прямолинейным участкам естественного агрофона отмечена с загрузкой бака 0%, обусловленной низкочастотными колебаниями на навеске штанг. Амплитуда колебаний при скорости движения 9 м/с достигает 133 мм.

11. Наибольшая безопасная скорость прохождения разворотных участков МЭС-600 с радиусом разворота 18 м ограничивается 6 м/с. Снижение изначального положения штанг до опорного основания снижает максимально допустимую скорость движения. Так при положении штанг до опорного основания 80 см максимальная скорость по крену штанг ограничивается 4,5 м/с.

12. Результаты полевого эксперимента указывают на незначительное влияние шин сверхнизкого давления БЕЛ-79, установленных на МЭС-600 на растения озимой пшеницы в фазе кущения. Снижение давления с 80 кПа до 20 кПа на практике позволяет снизить воздействие на культурные растения на 46%.

13. Полученные теоретические результаты отличаются своей адекватностью, с допустимым расхождением теоретических и экспериментальных значений по вибронегруженности МЭС и воздействию ШСНД на растительный покров на переувлажненных почвах.

## 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ МЭС НА ШИНАХ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

### 5.1 Исходные данные оценки эффективности применения МЭС-600 на шинах сверхнизкого давления

Исходя из поставленной задачи диссертации, необходимо определить технико-экономическую эффективность применения на мобильном самоходном штанговом опрыскивателе шин сверхнизкого давления с заданными оптимальными эксплуатационными параметрами. Проведение сравнения характеристик производилось для самоходного опрыскивателя МЭС-600, оборудованного штанговым опрыскивателем и шинами сверхнизкого давления БЕЛ-79 размерностью 1020x420-18 при проведении работ по защите растений колосовых культур в фазе кущения.

Согласно нормам, установленным в ГОСТ Р 58655-2019, максимальное давление движителей на почву колесного и гусеничного движителя при влажности почвы более 0,9 НВ (наименьшей влагоемкости) в слое от 0 до 30 см не должно быть более 80 кПа в весенний период. Поэтому экономическая оценка производилась сравнительно для двух вариантов использования техники: базового и рекомендуемого.

Первый вариант (базовый) использует мобильное энергетическое средство МЭС-600, на рабочих скоростях движения 9 м/с, с внутренним давлением в шинах 80 кПа и вертикальной нагрузкой на одно колесо 5,15 кН. Данный уровень давления воздуха и нагрузки соответствует коэффициенту сопротивления качению на мягком грунте 0,062.

Второй вариант (рекомендуемый) также использует мобильное энергетическое средство МЭС-600, на рабочих скоростях движения 9 м/с, но с внутренним давлением в шинах 40 кПа и вертикальной нагрузкой на одно колесо 5,15 кН. Данный уровень давления воздуха и нагрузки соответствует коэффициенту сопротивления качению на мягком грунте 0,042.

Согласно проведенным исследованиям, снижение давления воздуха с 80 кПа до 40 кПа позволяет снизить повреждаемость растений при наезде колесного движителя на 20%, что позволит снизить повреждаемость сельскохозяйственной продукции на разворотных полосах, что снижает общую повреждаемость сельскохозяйственной продукции на 7%. Также снижение коэффициента сопротивления качению дополнительно позволяет снизить удельный расход топлива на 3,5% при сохранении тех же показателей по скорости движения.

Расчет экономической эффективности применения самоходного штангового опрыскивателя МЭС-600, оборудованного шинами сверхнизкого давления, производился при выполнении работ по защите растений на предприятии ООО «МТС-Агросервис» в ценах, сложившихся на конец 2025 года. Исходные данные для расчета представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета экономических показателей

№ п/п	Наименование показателя	Обозн.	Значение по варианту	
			базовый	реком.-менд.
1	Количество основного и вспомогательного персонала МЭС, чел.	$\lambda_{\text{мех}}$	1	1
2	Производительность МЭС за 1 ч сменного времени, га/ч	$W_{\text{см}}$	24,1	24,1
3	Количество обслуживающего персонала МЭС, чел.	$\lambda_{\text{к}}$	1	1
4	Часовая оплата труда обслуживающего персонала, руб/ч	$\tau_{\text{к}}$	440	440
5	Коэффициент, учитывающий уровень социальных отчислений от зарплаты	$K_{\text{з}}$	1,321	1,321
6	Удельный расход моторного топлива, л/га	$q_{\text{T}}$	0,29	0,28
7	Цена моторного топлива АИ-92, руб/л	$C_{\text{T}}$	62	62
8	Коэффициент учета цены смазочных материалов	$K_{\text{см.м}}$	1,1	1,1
9	Число техники, входящей в МТА, шт	$n_{\text{м}}$	1	1
10	Цена самоходного опрыскивателя (в сборе), руб	$B_{\text{мл}}$	3 670 000	3 670 000
11	Значение отчислений на ремонт и техническое обслуживание от цены техники на 100 ч ее работы, %	$K_{\text{р1}}$	9,17	9,17
12	Производительность техники за 1 ч основного времени за период контрольных смен, га/ч	$W_{\text{о}}$	38,92	38,92
13	Коэффициент использования сменного времени техникой за период контрольных смен	$K_{\text{см}}$	0,64	0,64
14	Коэффициент готовности техники по оперативному времени	$K_{\text{Г}}$	0,95	0,95

15	Амортизационный ресурс самоходного опрыскивателя, ч	$R_{м1}$	600	600
16	Удельный расход вспомогательного технологического материала, кг/га	$qf$	0,7	0,7
17	Цена единицы f-го вспомогательного технологического материала, руб/кг	$Ц_{В.Мf}$	200	200
18	Урожайность сельскохозяйственной продукции, т/га	$У_{сх}$	5,5	5,5
19	Потери сельскохозяйственной продукции от применения техники, %	$X_{сх}$	4,5	4,2
20	Рыночная цена полноценной сельскохозяйственной продукции, руб/т.	$Ц_{сх}$	12000	12000
21	Повреждение (дробление) сельскохозяйственной продукции, %	$X_{д}$	0	0
22	Рыночная цена поврежденной (дробленной) сельскохозяйственной продукции, руб/т	$Ц_{д}$	5000	5000
23	Фактическая норма высева семян, кг/га	$H_{сем}$	200	200
24	Относительная полевая всхожесть семян, %	$П_{в}$	95	95
25	Цена семенного материала, руб/кг	$Ц_{сем}$	18	18
26	Норма отчислений на охрану окружающей среды за выброс в атмосферный воздух загрязняющих веществ двигателями энергосредств, руб/кг	$H_{ок.с}$	0,035	0,035
27	Агротехнический срок выполнения работы, принятый в зоне, дней	$n_{агр}$	14	14
28	Возможное время работы техники в сутки на работах по защите растений, ч	$t$	8	8
29	Число смен работы обслуживающего персонала в течение суток, шт	$n_{см}$	1	1

## 5.2 Определение экономических показателей на отдельных видах механизированных работ

Расчет экономической эффективности выполнен в соответствии ГОСТ.

Затраты труда на единицу вида работы  $Z_{тр}$ , чел·ч/га, определены по формуле:

$$Z_{тр} = \frac{\lambda_{мех}}{W_{см}}, \quad (5.1)$$

где  $\lambda_{мех}$  – количество основного и вспомогательного персонала, обслуживающего самоходную технику в течение смены, чел.;  $W_{см}$  – производительность самоходной техники за 1 ч сменного времени, га.

Прямые эксплуатационные затраты денежных средств, приходящиеся на выполнение единицы наработки вида работы  $Z_{экс}$ , руб/га:

$$Z_{\text{экс}} = Z_{\text{o.m.}} + Z_{\text{гсм}} + Z_p + A + I_{\text{в.м}}, \quad (5.2)$$

где  $Z_{\text{o.m.}}$  – затраты денежных средств на оплату труда обслуживающего персонала, руб/га;  $Z_{\text{гсм}}$  – затраты денежных средств на оплату горюче-смазочных материалов (ГСМ), руб/га;  $Z_p$  – затраты денежных средств на ремонт и техническое обслуживание, руб/га;  $A$  – амортизационные отчисления, руб/га;  $I_{\text{в.м}}$  – издержки денежных средств на вспомогательные технологические материалы, руб/га.

Затраты денежных средств на оплату труда обслуживающего персонала, руб/га:

$$Z_{\text{o.m.}} = \frac{\lambda_k \cdot \tau_k \cdot K_3}{W_{\text{см}}}, \quad (5.3)$$

где  $\lambda_k$  – количество обслуживающего персонала, чел.;  $\tau_k$  – часовая оплата труда обслуживающего персонала, руб/ч;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий уровень социальных отчислений от зарплаты.

Затраты денежных средств на оплату ГСМ, руб.:

$$Z_{\text{гсм}} = q_T \cdot C_T \cdot K_{\text{см.м}}, \quad (5.4)$$

где  $q_T$  – удельный расход моторного топлива, л/га;  $C_T$  – цена моторного топлива, руб/л;  $K_{\text{см.м}}$  – коэффициент учета цены смазочных материалов.

Затраты денежных средств на ремонт и техническое обслуживание, руб.:

$$Z_p = \frac{\sum_{j=1}^{n_m} B_{mj} \cdot K_{pj}}{W_{\text{эк}}} \cdot 10^{-4}, \quad (5.5)$$

где  $n_m$  – число техники, входящей в МТА, шт;  $B_{mj}$  – цена  $j$ -той техники (без НДС), руб;  $K_{pj}$  – значение отчислений на ремонт и техническое обслуживание от цены  $j$ -той техники на 100 ч ее работы, %;  $W_{\text{эк}}$  – производительность  $j$ -той техники за 1 ч эксплуатационного времени, га/ч.

Производительность техники на виде работы за 1 ч эксплуатационного времени  $W_{\text{эк}}$ :

$$W_{\text{эк}} = W_o \left( \frac{1}{K_{\text{см}}} + \frac{1}{K_{\text{Г}}} - 1 \right)^{-1}, \quad (5.6)$$

где  $W_o$  – производительность техники за 1 ч основного времени за период контрольных смен, га/ч;  $K_{см}$  – коэффициент использования сменного времени техники за период контрольных смен;  $K_{г}$  – коэффициент готовности техники по оперативному времени.

Амортизационные отчисления  $A$  определяются по формуле:

$$A = \frac{1}{W_{эк}} \sum_{j=1}^{n_m} \frac{B_{Mj}}{R_{Mj}}, \quad (5.7)$$

где  $R_{Mj}$  – значение амортизационного ресурса техники, ч.

Издержки денежных средств на вспомогательные технологические материалы  $I_{B.M}$  :

$$I_{B.M} = \sum_{f=1}^{n_{BM}} q_f \cdot C_{B.Mf}, \quad (5.8)$$

где  $q_f$  – удельный расход  $f$ -го вспомогательного технологического материала, кг/га;

$C_{B.Mf}$  – цена единицы  $f$ -го вспомогательного технологического материала, руб/кг;

$n_{BM}$  – число наименований вспомогательных материалов, шт.

Совокупные затраты денежных средств на выполнение 1 га работы, руб/га:

$$Z_{сов} = Z_{эк} + I_n + I_{нов} + I_{сем} + I_{ок.с}, \quad (5.9)$$

где  $I_n$  – издержки денежных средств от потерь сельскохозяйственной продукции, руб/га;  $I_{нов}$  – издержки денежных средств от повреждения сельскохозяйственной продукции, руб/га;  $I_{сем}$  – издержки денежных средств от нерационального использования посевного материала (семян), руб/га;  $I_{ок.с}$  – издержки денежных средств на охрану окружающей среды, руб/га.

Издержки денежных средств от потерь сельскохозяйственной продукции  $I_n$ , руб/га:

$$I_n = 0,01 \cdot Y_{cx} \cdot X_{cx} \cdot C_{cx}, \quad (5.10)$$

где  $Y_{cx}$  – урожайность сельскохозяйственной продукции, т/га;  $X_{cx}$  – потери сельскохозяйственной продукции от применения техники из-за повреждения растений движителем при наезде, %;  $C_{cx}$  – рыночная цена полноценной сельскохозяйственной продукции, руб/т.

Издержки денежных средств от повреждения сельскохозяйственной продукции  $I_{нов}$ , руб/га:

$$I_{нов} = 0,01 \cdot Y_{cx} \cdot X_{д} \cdot (C_{cx} - C_{д}), \quad (5.11)$$

где  $X_{д}$  – повреждение (дробление) сельскохозяйственной продукции, %;  $C_{д}$  – рыночная цена поврежденной (дробленной) сельскохозяйственной продукции, руб/т.

Издержки денежных средств от нерационального использования посевного материала (семян), руб/га:

$$I_{сем} = (H_{сем} - m_{всх}) \cdot C_{сем}, \quad (5.12)$$

где  $H_{сем}$  – фактическая норма высева семян, кг/га;  $m_{всх}$  – масса семян, давших продуктивные всходы, кг/га;  $C_{сем}$  – цена семенного материала, руб/кг.

Массу семян, давших продуктивные всходы, кг:

$$m_{всх} = 0,01 \cdot H_{сем} \cdot P_{в}, \quad (5.13)$$

где  $P_{в}$  – относительная полевая всхожесть семян, %.

Издержки денежных средств на охрану окружающей среды, руб/га:

$$I_{ок.с} = q_T \cdot H_{ок.с}, \quad (5.14)$$

где  $H_{ок.с}$  – норма отчислений на охрану окружающей среды за выброс в атмосферный воздух загрязняющих веществ двигателями энергосредств, руб/кг.

Результаты расчета экономических показателей на отдельных видах механизированных работ приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Показатели экономической оценки опрыскивателя МЭС-600 при проведении работ по защите растений.

Наименование показателя	Обозн.	Значение показателя по	
		базовый	реко-менд.
Вид механизированной работы		опрыскивание	
Марка техники (состав МТА)		МЭС-600	
Производительность МТА за 1 ч сменного времени, га/ч	$W_{см}$	24,1	24,1
Удельный расход моторного топлива, л/га	$q_T$	0,29	0,28
Совокупные затраты денежных средств (себестоимость выполнения работы) всего, руб/га, в том числе:	$Z_{сов}$	3727,4	3528,72
- затраты на оплату труда	$Z_{о.т.}$	24,12	24,12
- затраты на ГСМ (электроэнергию, газ)	$Z_{гсм}$	19,78	19,10
- затраты на ремонт, техническое обслуживание	$Z_p$	139,66	139,66
- амортизационные отчисления	$A$	253,83	253,83
- затраты на вспомогательные материалы	$I_{в.м}$	140	140
- издержки от потерь основной продукции	$I_n$	2970	2772
- издержки от повреждения продукции	$I_{нов}$	0	0
- издержки от нерационального использования посевного материала (семян)	$I_{сем}$	180	180
- издержки на охрану окружающей среды	$I_{ок.с}$	0,01	0,01
Затраты труда, чел.·ч/га	$Z_{тр}$	24,1	24,1

### 5.3 Методы определения показателей ресурсосбережения

Совокупные затраты денежных средств на годовой фактический объем работы новой техники, выполненный на работах по защите растений,  $Z_{сов.тех}^Г$ , руб:

$$Z_{сов.тех}^Г = Z_{сов}^Г \cdot F^Г, \quad (5.15)$$

где  $F^Г$  – годовой фактический объем работ новой техники, выполненный на работах по защите растений, га.

Годовой фактический объем работы новой техники, выполненный на работах по защите растений, с учетом агротехнических сроков в климатической зоне, га:

$$F^Г = W_{эк} \cdot n_{агр} \cdot t, \quad (5.16)$$

где  $n_{агр}$  – агротехнический срок выполнения работы, принятый в зоне, дней;  $t$  – возможное время работы техники в сутки на работах по защите растений, ч.

Совокупные затраты денежных средств за годовой условный объем работ по защите растений  $Z_{сов.p_i}^G$ , руб:

$$Z_{сов.p}^G = Z_{сов_i} \cdot F_y^G, \quad (5.17)$$

где  $F_y^G$  – годовой условный объем работ по защите растений, га.

Годовая потребность в технике на выполнение условного объема работ по защите растений  $N_{тех}^G$ , шт:

$$N_{тех}^G = \frac{F_y^G}{F^G}, \quad (5.18)$$

Годовая потребность в обслуживающем персонале на условный объем работ по защите растений  $\lambda_{тех}^G$ , чел:

$$\lambda_{тех}^G = \lambda_{тех} \cdot n_{см} \cdot N_{тех}^G, \quad (5.19)$$

где  $n_{см}$  – число смен работы обслуживающего персонала в течение суток, шт.

Годовая потребность в моторном топливе на условный объем работ по защите растений  $Q_T^G$ , л/га:

$$Q_T^G = q_T \cdot F_y^G, \quad (5.20)$$

Капиталовложения на работы по защите растений  $K_{МТА}$ , руб:

$$K_{МТА} = N_{тех}^G \cdot (B_{эн} + B_{схм} \cdot n_{схм}), \quad (5.21)$$

где  $B_{эн}$  – цена энергосредства, руб;  $B_{схм}$  – цена сельхозмашины, руб;  $n_{схм}$  – число сельхозмашин в МТА, шт.

Результаты расчета показателей ресурсосбережения приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Показатели ресурсосбережения МЭС-600 при проведении работ по защите растений.

Наименование показателя	Обозн.	Значение показателя по	
		базовый	рекоменд.
Совокупные затраты денежных средств на годовой фактический объем работы новой техники, тыс. руб	$Z_{сов.тех}^Г$	10 059,79	9 523,57
Годовой условный объем работы, га	$F_y^Г$	1000	1000
Совокупные затраты денежных средств на годовой условный объем работы, тыс. руб	$Z_{сов.р.и}^Г$	3 727,4	3 528,7
Потребность в капиталовложениях, тыс. руб	$K_{МТА}$	1 359,8	1 359,8
Потребность в обслуживающем персонале, чел.	$\lambda_{мех}^Г$	1	1
Потребность в моторном топливе, м <sup>3</sup>	$Q_T^Г$	0,29	0,28

#### 5.4 Методы определения показателей сравнительной экономической эффективности

Годовая экономия совокупных затрат денежных средств в расчете на годовой фактический объем работы техники, выполненный на работах по защите растений,  $\mathcal{E}_{г.тех}$ , руб:

$$\mathcal{E}_{г.тех} = Z_{сов.тех}^{Г.А} - Z_{сов.тех}^{Г.Н}, \quad (5.22)$$

где  $Z_{сов.тех}^{Г.А}$ ,  $Z_{сов.тех}^{Г.Н}$  – совокупные затраты денежных средств в расчете на годовой фактический объем работы техники, выполненный на работах по защите растений, по аналогу и новой технике соответственно, руб.

Годовую экономию совокупных затрат денежных средств в расчете на годовой условный объем работ по защите растений  $\mathcal{E}_{г.р}$ , руб:

$$\mathcal{E}_{г.р} = Z_{сов.р}^{Г.А} - Z_{сов.р}^{Г.Н}, \quad (5.23)$$

где  $Z_{сов.р}^{Г.А}$ ,  $Z_{сов.р}^{Г.Н}$  – совокупные затраты денежных средств в расчете на годовой условный объем работ по защите растений, по аналогу и новой технике соответственно, руб.

Снижение себестоимости выполнения работ по защите растений  $m_c$ , %:

$$m_c = \frac{Z_{сов.р}^{Г.Н} - Z_{сов.р}^{Г.А}}{Z_{сов.р}^{Г.А}} 10^2, \quad (5.24)$$

Срок окупаемости капиталовложений техники для выполнения годового условного объема работ по защите растений  $S_K^H$ , лет:

$$S_K^H = \frac{F_y^\Gamma N_{mex}^\Gamma}{W_{cm}^H \Theta_{z.p}} \left( \frac{B_{эн}^H}{R_{эн}^H} + \frac{B_{схм}^H}{R_{схм}^H} \cdot n_{схм} \right), \quad (5.25)$$

где  $W_{cm}^H$  – производительность новой техники для выполнения работ по защите растений за 1 ч сменного времени, га/ч;  $B_{эн}^H$  – цена нового энергосредства, руб;  $B_{схм}^H$  – цена новой сельхозмашины, руб;  $R_{эн}^H$  – амортизационный ресурс нового энергосредства, ч;  $R_{схм}^H$  – амортизационный ресурс новой сельхозмашины, ч.

Снижение потребности в обслуживающем для выполнения годового условного объема работ по защите растений  $m_{mex}$ , %:

$$m_{mex} = \frac{\lambda_{mex}^{\Gamma.H} - \lambda_{mex}^{\Gamma.A}}{\lambda_{mex}^{\Gamma.A}} 10^2, \quad (5.26)$$

где  $\lambda_{mex}^{\Gamma.H}$ ,  $\lambda_{mex}^{\Gamma.A}$  – годовая потребность в обслуживающем персонале для выполнения условного объема работ по защите растений, соответственно по новой технике и аналогу, чел.

Снижение потребности в моторном топливе для выполнения годового условного объема работ по защите растений  $m_{ГСМ}$ , %:

$$m_{ГСМ} = \frac{Q_T^{\Gamma.H} - Q_T^{\Gamma.A}}{Q_T^{\Gamma.A}} 10^2, \quad (5.27)$$

где  $Q_T^{\Gamma.H}$ ,  $Q_T^{\Gamma.A}$  – годовая потребность в моторном на условный объем работ по защите растений, соответственно по новой технике и аналогу, л.

Результаты расчета итоговых показателей ресурсосбережения приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.4 – Показатели сравнительной экономической эффективности МЭС-600 с рекомендуемыми параметрами при проведении работ по защите растений на 1000 га.

Наименование показателя	Обозн.	Значение показателя по технике
Годовая экономия совокупных затрат денежных средств, руб	$\mathcal{E}_{z.p}$	198682,35
Снижение себестоимости выполнения работы, %	$m_c$	5,63
Срок окупаемости капиталовложений, лет	$S_K^H$	0,47
Снижение потребности в обслуживающем персонале, %	$m_{mex}$	0
Снижение потребности в моторном топливе, %	$m_{ГСМ}$	3,45

### 5.5 Выводы по главе 5

1. Сравнительные расчеты показателей экономической эффективности от применения МЭС на рекомендуемых параметрах шин сверхнизкого давления установили снижение издержек денежных средств от потерь сельскохозяйственной продукции на 7% и потребности в моторном топливе на 3,45%

2. Оценка экономической эффективности показала, что применение изложенных в данной работе рекомендаций по регулированию давления воздуха в шинах самоходного опрыскивателя позволяет снизить себестоимость выполнения работ по защите растений на 5,63%, а годовую экономию совокупных затрат денежных средств на 198,7 тыс. руб. в расчете на 1000 га.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обоснованы параметры и режимы работы двухосных мобильных энергетических средств на шинах сверхнизкого давления для агропредприятий малых форм хозяйствования. Разработано и изготовлено мобильное энергетическое средство с колесной формулой 4К4, оборудованное шинами сверхнизкого давления, обеспечивающее высокую годовую загрузку в сельскохозяйственном производстве, отвечающее требованиям выполнять агротехнологические операции на почвах с низкой несущей способностью.

2. Разработана математическая модель мобильного энергетического средства на шинах сверхнизкого давления, оборудованного штанговым опрыскивателем, учитывающая упругие и рассеивающие характеристики шин сверхнизкого давления, подвески средства и сиденья оператора, а также массово-инерционные характеристики штанг и переменную массу технологической жидкости. Достоверность проведенных результатов аналитических исследований подтверждается их согласованием с результатами экспериментальных исследований с расхождением на сиденье оператора не более 10%.

3. Разработан блок математической модели «Воздействия колесного движителя на растительный покров», выполненная SPH-метода конечных элементов, учитывающая параметры шины и растения. Моделированием процесса взаимодействия шины с растениями получили коэффициент полеглости растений после двукратного прохода движителя при различном внутреннем давлении воздуха в шинах. Процент полеглых растений в 73% получено при давлении 40кПа. Результаты проведенных полевых исследований указывают на отсутствие отрицательного действия шин сверхнизкого давления на растения озимой пшеницы в фазу кущения на переувлажненных почвах со средней влажностью 32%, что позволяет исключить необходимость создания технологической колеи на поле. Достоверность результатов подтверждается тем, что результаты проведенных аналитических исследований согласуются с результатами экспериментальных исследований с расхождением более 5,48%

4. Установлено, что вариант компоновки МЭС-600 с выносом кабины оператора за ось передних колес, оборудованного шинами сверхнизкого давления с независимой подвеской, позволяет качественно изменить характер уровня колебаний его динамической системы. Характеристики вертикальных ускорений имеют в до резонансной и за резонансной зонах линейную зависимость, а в резонансной зоне – прогрессивно-регрессивную зависимость. Наибольшее влияние на величину колебаний МЭС-600 оказывают изменение давления воздуха в шинах сверхнизкого давления и скорость движения.

5. Экспериментально установлено, что при скоростных режимах движения от 3 м/с до 12 м/с уровень колебаний на сиденье оператора находится в диапазоне от 0,063g до 0,037g и не превышает нормативных показателей. Установлено, что введение локального подрессоривания сиденья оператора не целесообразно при компоновочной схеме, где кабина оператора вынесена за ось передних колес.

6. Результаты испытаний на искусственных неровностях показали, что динамическая система МЭС-600 обладает высокими виброзащитными свойствами: при полной заправке и при 50% заправке бака уровень колебаний над передним мостом снизился в пять раз, а при движении в порожнем состоянии снизился в 3,7 раза, относительно колебаний на оси колеса; на сиденье оператора при различных заправках бака уровень колебаний снизился в среднем от 3,1 до 4,5 раз, относительно колебаний над передним мостом.

7. На основании результатов проведенных экспериментальных исследований установлено, что самым вибронагруженным для штанг опрыскивателя является режим движения в порожнем состоянии. Снижение уровня заполнения технологической жидкостью в баке опрыскивателя с полной 100% до 50% не оказывает существенного влияния на вибронагруженность. Наибольшая вибронагруженность имеет место в диапазоне заправок от 50% до порожнего состояния. Минимальный уровень колебаний на штангах опрыскивателя имеет место в диапазоне скоростей 7,5 – 10,5 м/с. Снижение давления воздуха в шинах сверхнизкого давления оказывает щадящее действие на вибронагруженность штанг. Снижение давления воздуха в шинах с 80 кПа до 20 кПа позволяет снизить вибронагруженность штанг в 2,8

раза. Проведённые исследования показывают, что при движении по единичным неровностям в диапазоне скоростей от 3 м/с до 12 м/с штанги опрыскивателя устойчиво находились в горизонтальном положении, интенсивных колебаний и резонансных режимов секций не наблюдались.

8. Результаты полевых исследований свидетельствуют о значительном влиянии уровня заполнения бака и давления воздуха в шинах на вибронагруженность штанг опрыскивателя. Наибольшая амплитуда колебаний при движении по прямолинейным участкам естественного агрофона отмечена с загрузкой бака 0%, обусловленной низкочастотными колебаниями на навеске штанг. Амплитуда колебаний при скорости движения 9 м/с достигает 133 мм. Наибольшая безопасная скорость прохождения разворотных участков МЭС-600 с радиусом разворота 18 м ограничивается 6 м/с. Снижение изначального положения штанг до опорного основания снижает максимально допустимую скорость движения.

8. Снижение внутреннего давления воздуха в шинах позволяет значительно снизить воздействие на растения колосовых культур. Уменьшение давления с 80 кПа до 20 кПа на практике позволяет снизить воздействие на культурные растения на 46%. Оценка взаимодействия вращающегося движителя мобильного средства и растения возможна с использованием разработанной программы. Программа обладает высокой достоверностью при условии исследования воздействия высокоэластичных широкопрофильных шин и растений колосовых культур в фазе кущения.

9. Оценка экономической эффективности показала, что применение изложенных в данной работе рекомендаций по регулированию давления воздуха в шинах МЭС позволяет повысить сменную производительность на 5.63 %, годовая экономия совокупных затрат денежных средств на 198,7 тыс. руб. в расчете на 1000 га.

10. Разработанное МЭС-600 является платформой для создания семейства отечественных высоко производительных мобильных энергосредств нового поколения для выполнения широкого спектра сельскохозяйственных работ, обеспечивающих значительную годовую загрузку в сельскохозяйственном производстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balsari P, Gil E, Marucco P, van de Zande J. C, Nuyttens D, Herbst A, Gallart M. Field-crop-sprayer potential drift measured using test bench: Effects of boom height and nozzle type // *Biosystems Engineering*. - February 2017. - Volume 154. - Pages 3-13. doi: [10.1016/j.biosystemseng.2016.10.015](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.015)
2. Cui L, Mao H, Xue X. Hydraulic-drive roll movement control of a spray boom using adaptive robust control strategy // *Advances in Mechanical Engineering*. 2019;11(2). doi:[10.1177/1687814018825012](https://doi.org/10.1177/1687814018825012)
3. Cvetanovic B, Cvetković D, Prašević M, Cvetković M, Pavlović M. An analysis of the impact of agricultural tractor seat cushion materials to the level of exposure to vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2017;36(2):116-123. doi:[10.1177/0263092317711983](https://doi.org/10.1177/0263092317711983)
4. Gao J, Han P. Research on optimal matching of vehicle suspension parameters for improving vehicle ride comfort on bump road. *Advances in Mechanical Engineering*. 2023;15(5). doi:[10.1177/16878132231175751](https://doi.org/10.1177/16878132231175751)
5. Godjaev Z.A., Pryadkin V.I., Kolyadin P.A., Artemov A.V. Promising mobile vehicles with ultra-low pressure tires for agricultural production // *Traktoryiselhoz mashiny*. - 2022. - Vol. 89. - N. 4. - P. 277-286. doi: [10.17816/0321-4443-115016](https://doi.org/10.17816/0321-4443-115016)
6. Hua C, Zhao Y, Lu Z, Ouyang H. Random vibration of vehicle with hysteretic nonlinear suspension under road roughness excitation. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(1). doi:[10.1177/1687814017751222](https://doi.org/10.1177/1687814017751222)
7. Jun Fu, Chao Chen, Rongqiang Zhao, Luquan Ren, "Accurate Variable Control System for Boom Sprayer Based on Auxiliary Antidrift System", *Journal of Sensors*, vol. 2020, Article ID 8037046, 8 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8037046>
8. Kappaun R, Junior A. D. de Meira, Walber M. Parameters for modeling passive suspensions of spray bars // *Agricultural Machinery Management*. - May-Jun 2021. - Volume 41 (3). doi: [10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n3p368-378/2021](https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n3p368-378/2021)

9. Krauze P, Kasprzyk J, Rzepecki J. Experimental attenuation and evaluation of whole body vibration for an off-road vehicle with magnetorheological dampers. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2019;38(2):852-870. doi:[10.1177/1461348418782166](https://doi.org/10.1177/1461348418782166)

10. Liao X, Du X, Li S. Design of cab seat suspension system for construction machinery based on negative stiffness structure. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021; 13(8). doi:[10.1177/16878140211044931](https://doi.org/10.1177/16878140211044931)

11. Ma K, Zhang Y, Ren C, Chen Y, Zhou P, Chen Y. Effect of time-delay feedback control on vehicle seat vibration reduction and suspension performance. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2022; 41(3):1214-1233. doi:[10.1177/14613484221076724](https://doi.org/10.1177/14613484221076724)

12. Pryadkin V. Estimation of energy consumption for rolling a mobile vehicle equipped with ultra-low-pressure tires / V. Pryadkin, A. Artyomov, P. Kolyadin, N. Bakach // *E3S Web of Conferences International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2021)*. Volume 285 (2021). Published online: 06 July 2021 DOI: doi: 10.1051/e3sconf/202128507023. SJR – 0.415.

13. Pryadkin V. Mobile vehicles with extra-low pressure tires in the transport infrastructure of the Arctic region and northern territories of the Russian Federation / V. Pryadkin, A. Artyomov, P. Kolyadin // *Transportation Research Procedia. International conference of Arctic transport*. Volume 57, 2021, Pages 502-510 doi: 10.1016/j.trpro.2021.09.078

14. Pryadkin V., Artemov A., Kolyadin P., Bakach N. Estimation of energy consumption for rolling a mobile vehicle equipped with ultra-low-pressure tires // *International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2021)*, Krasnodar, Russia, Edited by Belousov, S.; Roshchupkin, S.; *E3S Web of Conferences*, Volume 285 doi: [10.1051/e3sconf/202128507023](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128507023)

15. Pryadkin V.И., Kolyadin P.A. Vibration loading of self-propelled sprayer booms on ultra-low pressure tires // *Tractors and Agricultural Machinery*. - 2023. - Vol. 90. - N. 6. doi:[10.17816/0321-4443-567796](https://doi.org/10.17816/0321-4443-567796)

16. Sun L, Shang T, Chen H, Wang Z, Wang C, Luo F. Development of a model for the optimization of the main factors influencing a 162kW wheeled tractor driver's whole body vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2024;43(1):156-169. doi:[10.1177/14613484231190286](https://doi.org/10.1177/14613484231190286)
17. Tan G, Kong Q, Wu C, Wang S, Ma G. Analysis method of dynamic response in the whole process of the vehicle bump test of simply supported bridge. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019;11(4). doi:[10.1177/1687814019843758](https://doi.org/10.1177/1687814019843758)
18. Wu K, Ren C, Li L. An harmonic equivalent excitation method for random vibration response. *Advances in Mechanical Engineering*. 2022; 14(6). doi:[10.1177/16878132221107253](https://doi.org/10.1177/16878132221107253)
19. Yu X, Liu X, Wang X, Wang X, Wang Y. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2021;235(8):2253-2264. doi:[10.1177/0954407020983150](https://doi.org/10.1177/0954407020983150)
20. Zhang Y, Ren C, Ma K, Xu Z, Zhou P, Chen Y. Effect of delayed resonator on the vibration reduction performance of vehicle active seat suspension. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2022; 41(1):387-404. doi:[10.1177/14613484211046458](https://doi.org/10.1177/14613484211046458)
21. Zhu, J., Zhang, W., and Wu, M. X. (April 26, 2018). "Evaluation of Ride Comfort and Driving Safety for Moving Vehicles on Slender Coastal Bridges." *ASME. J. Vib. Acoust.* October 2018; 140(5): 051012. <https://doi.org/10.1115/1.4039569>
22. Агротехническая проходимость зерноуборочных комбайнов с комплектацией ведущих колес разными шинами / Л. В. Кравченко, В. А. Кравченко, В. В. Журба, И. М. Меликов // *Инженерные технологии и системы*. – 2025. – Т. 35, № 1. – С. 101-120. – DOI 10.15507/2658-4123.035.202501.101-120. – EDN ORPTUE.
23. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений : учеб. пособие / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский – Москва : Наука, 1976. – 279 с.
24. Алферьев В.П., Федотов А.В. Развитие рынка техники в сельском хозяйстве // *Техника и оборудование для села*. – 2006. - №5. – С.9-11.

25. Артемов, А.В. Обоснование применения систем управления динамикой криволинейного движения МЭС на шинах сверхнизкого давления [Электронный ресурс] / А.В. Артемов, П.А. Колядин, В.И. Прядкин// Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2021. – № 1 (3). – С. 49-54.

26. Артемов, А.В. Оценка экологических показателей поворота колесной машины на шинах сверхнизкого давления [Электронный ресурс] / А.В. Артемов, П.А. Колядин, В.И. Прядкин// Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1 (2). – С. 310-314.

27. Артемов, А.В. Применение адаптивных колесных движителей в конструкции мобильных энергосредств сельскохозяйственного назначения [Текст] / А.В. Артемов, П.А. Колядин, В.И. Прядкин// Автоматизированное проектирование в машиностроении. –2024. – №16. – С. 30-34. DOI: 10.26160/2309-8864-2024-16-30-34.

28. Артемов, А.В. Тягово-сцепные качества движителей мобильных энергосредств и эффективные пути повышения [Текст] / А.В. Артемов, С.В. Гончаренко, П.А. Колядин, В.И. Прядкин// Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. – Воронеж, 2020. – С. 187-192.

29. Артемов, А.В. Экспериментальная оценка момента инерции шин сверхнизкого давления [Электронный ресурс]/ А.В. Артемов, П.А. Колядин, В.И. Прядкин// Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1 (2). – С. 284-290.

30. Башкирев А.П. Анализ полевых опрыскивателей [Текст] / А.П. Башкирев, А.А. Шварц, А.Ю. Шкабенко // Наука в центральной России. – 2019. – № 6 (42). – С.50-58.

31. Безуглов В.Г. Анализ технологий и техники для внесения химических средств защиты растений [Текст] / В.Г. Безуглов // Техника и оборудования для села. – 2013. – № 2. – С. 7-10.

32. Беляев, А. Н. Исследование кинематики поворота колесного трактора [Текст] / А. Н. Беляев, Т. В. Тришина // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 1(48). – С. 115-120.

33. Беляев, А. Н. Исследование поворотливости трактора ЛТЗ-155 [Текст] / А. Н. Беляев // Производственный потенциал агропромышленного комплекса и пути улучшения его использования: тез. докл. межрегион. конф. молодых ученых. – Воронеж: ВГУА, 1991. – С. 146-147.

34. Беляев, А. Н. К оценке боковой силы на колесах трактора при его повороте [Текст] / А. Н. Беляев, Д. А. Глаголев // Направление стабилизации развития и выхода из кризиса АПК в современных условиях: тезисы докладов международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Воронеж: ВГАУ, 1999. – С. 160.

35. Беляев, А. Н. Определение сил при повороте трактора со всеми управляемыми колесами [Текст] / А. Н. Беляев, В. В. Свистов, Т. В. Тришина // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – №3(50). – С. 132-140.

36. Беляев, А. Н. Повышение устойчивости движения МТА при повороте [Текст] / А. Н. Беляев // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей.– С. Петербург: СПбГАУ, 2002. – С. 169-170.

37. Бидерман, В. Л. Автомобильные шины. – М.: Госхимиздат, 1963. – 383с.

38. Бородина Е.Н. Крестьянские (фермерские) хозяйства в России и за рубежом // Техника и оборудование для села. – 2006. - №8. – С.2-3.

39. Быков С.Н. Показатель «значимость информационной технологии» конкурентоспособности наукоемкой машиностроительной продукции [Текст] / С.Н. Быков // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 12. – С.25-30.

40. Вавилова, Г. В. Математическая обработка результатов измерения : учебное пособие / Г. В. Вавилова ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 167 с.

41. Варгасов, А.С. Моделирование движения мобильного средства, перевозящего жидкость в баке [Электронный ресурс] / А.С. Варгасов, В.И. Прядкин, П.А. Колядин, А.В. Артемов// Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – Т. 2, № 2 (32). – С. 145-150. - <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2020/2-32-2020/145-150-.pdf>.

42. Галлагер, Р. Метод конечных элементов / Р. Галлагер. – М. : Мир, 1984. – 428 с.

43. Герасимов И. М. Повышение плавности хода автомобилей путем использования подвески с релаксационным гидроамортизатором [Текст] : Дисс. ... канд. техн. наук. – С.-Пб., 2002. – 142 с.

44. Годжаев З.А. и др. Влияние давления в высокоэластичной шине на тяговые свойства колеса / З.А. Годжаев, А.Ю. Измайлов, В.И. Прядкин // Автомобильная промышленность, 2015, -№ 2. -С. 9-12

45. Годжаев З.А. Перспективные мобильные средства на шинах сверхнизкого давления для сельскохозяйственного производства [Текст] / З.А. Годжаев, В.И. Прядкин, П.А. Колядин, А.В. Артемов // Тракторы и сельхозмашины. –2022. – Т. 89. – №4. – С. 277-286. doi: 10.17816/0321-4443-115016

46. Годжаев З.А., Гончаренко С.В., Артёмов А.В., Прядкин В.И., Годжаев Т.З. Упругие характеристики шины сверхнизкого давления 1020x420-18 модели Бел-79. Часть I. Вертикальные нагрузки// Автомобильная промышленность, 2020, – № 8. – С. 18-21.

47. Годжаев З.А., Шевцов В.Г., Русанов А.В., Прядкин В.И. Проблема воздействия на почву ходовых систем мобильных энергосредств и эффективные пути решения//Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. - М.: ВИМ, 2014. - С. 327-329.

48. Гончаренко, С.В. Методика выбора параметров шин сверхнизкого давления по величине давления на почву [Текст] / С. В. Гончаренко, А. В. Артемов, П. А. Колядин, В. И. Прядкин// Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве.–Воронеж, 2020. – С. 106-110.

49. Гончаренко, С.В. Экспериментальная оценка характеристик шины сверхнизкого давления 1020x420-18 модели Бел-79 [Текст] / С.В. Гончаренко, А.В. Артемов, П.А. Колядин, В.И. Прядкин // Проблемы и инновационные решения в химической технологии (ПИРХТ-2019). – Воронеж, 2019. – С. 35-36.

50. Горин Г.С. Исследования поворачиваемости трактора для построения гибридной теории поворота [Текст] / Г.С. Горин, З.А. Годжаев, В.М. Головач, В.А. Кузьмин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – М. : Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. – 2016. №5. – С. 3-11. eISSN: 2618-6748.

51. Горин Г.С., Янчук А.А., Ващула А.В. Анализ результатов сравнительных тягово-сцепных свойств колес с шинами сверхнизкого давления / Г.С. Горин, А.А. Янчук, А.В. Ващула // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. - № 4. - С. 14-18.

52. Горобцов, А.С. Расчет жесткостных параметров виброизоляторов опор кузова и сайент-блоков рычагов независимых пружинных подвесок автомобиля повышенной проходимости [Текст] / А.С. Горобцов, С.К. Карцов, Ю.А. Поляков // Грузовик &. – 2014. – № 6. – С. 34-36.

53. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Ленинград : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.

54. Григорьев Ю.Н. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках [Текст] / Ю.Н. Григорьев, В.А. Вшивков, М.П. Федорук // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с.

55. Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике : в 2-х ч. Ч. 2 / Х. Гулд, Я. Тобочник ; пер. с англ. : А. Н. Полюдова, В. А. Панченко. – Москва : Мир, 1990. – 400 с.

56. Демин Е.Е. Результаты исследований мощности установленных двигателей и массы самоходных штанговых опрыскивателей [Текст] / Е.Е. Демин, А.С. Старцев, П.И. Павлов, Г.Е. Шардина // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 12. – С. 73-76.

57. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – 5-е изд., доп. и перераб. – М. : Агропромиздат, 1985. – 351 с.

58. Дружинин, Н. К. Выборочное наблюдение и эксперимент (Общие логические принципы организации) / Н. К. Дружинин. – М., «Статистика», 1977. – 176 с.

59. Загарин Д.А. Обоснование параметров и режимов работы малогабаритного транспортного средства для малых форм хозяйствования: дис. ...канд. техн. наук / Д.А. Загарин. – М., МГАУ им. В.П. Горчкина, 2010. – 159 с.

60. Зайдель, А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Зайдель. – Изд-во 3-е «Наука», Ленингр. Отд., 1968. – 96 с.

61. Закин, Я. Х. Прикладная теория движения / Я. Х. Закин – Изд-во «Транспорт», 1967. – 258 с.

62. Зарубин, В. С. Математическое моделирование в технике : учеб. для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 2-е изд., стереотип. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 496 с.

63. Измаилов, А. Ф. Численные методы оптимизации : учебное пособие / А. Ф. Измаилов, М. В. Солодов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 304 с.

64. Интенсивность износа шин колесных движителей машин и управление их ресурсом / Р. В. Магомедов, Ф. М. Магомедов, В. А. Кравченко [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 198. – С. 34-48. – DOI 10.21515/1990-4665-198-004. – EDN BYZWKS.

65. Исследование агротехнической проходимости зерноуборочного комбайна «Vector-410» на шинах ф-161 / В. А. Кравченко, Л. В. Кравченко, Ф. М. Магомедов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 201. – С. 218-230. – DOI 10.21515/1990-4665-201-019. – EDN EEHKWK.

66. Колядин, П. А. Моделирование динамических нагрузок в трансмиссии мобильного энергетического средства [Электронный ресурс] / П. А. Колядин//

Воронежский научно-технический вестник. – 2019. – Т. 2, № 2 (28). – С. 114-118. – URL: <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2019/2-28-2019/114-118.pdf>.

67. Колядин, П.А. Анализ современных и перспективных систем поддресоривания мобильных средств / П. А. Колядин// Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2019. – Т. 7, № 3 (46). – С. 117-121.

68. Колядин, П.А. Вибронагруженность сиденья грузового автомобиля при движении по единичной неровности [Электронный ресурс] / П.А. Колядин, А.В. Артемов, Е.Ю. Посыльная, В.И. Прядкин// Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1 (2). – С. 384-390.

69. Колядин, П.А. Моделирование автомобиля ГАЗ-33081 с применением упругих элементов с разной характеристикой [Электронный ресурс] / П.А. Колядин, В.И. Прядкин// Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – Т. 3, № 3 (25). – С. 79-84. – Режим доступа: <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2018/3-3-25-2018/79-84.pdf>.

70. Колядин, П.А. Моделирование мобильного средства на шинах сверхнизкого давления малой грузоподъемности [Текст]/ П.А. Колядин, Н.С. Попова// Европейский научный форум студентов и учащихся. – Петрозаводск, 2020. – С. 75-78.

71. Колядин, П.А. Моделирование плавности хода мобильного энергетического средства с распределением поддресоренной массы по осям [Электронный ресурс] / П.А. Колядин, В.И. Прядкин// Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – Т. 4, № 4 (26). – С. 105-110. – Режим доступа: <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2018/4-4-26-2018/105-110.pdf>.

72. Колядин, П.А. Моделирование процесса поворота мобильного энергетического средства на шинах сверхнизкого давления [Текст]/ П.А. Колядин, В.И. Прядкин, А.В. Артемов, М.А. Губанов// Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий.– Воронеж, 2021. – С. 12-18. - DOI: 10.34220/ PRTOPT2021\_12-18.

73. Колядин, П.А. Моделирование системы поддрессирования сиденья грузового автомобиля [Электронный ресурс] / П.А. Колядин, А.В. Артемов, В.И. Прядкин// Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1 (2). – С. 391-396.

74. Колядин, П.А. Оценка вибронагруженности подвески сиденья грузового автомобиля [Электронный ресурс]/ П.А. Колядин, А.В. Артемов, В.И. Прядкин// Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1 (2). – С. 397-402.

75. Колядин, П.А. Оценка упругодемпфирующей характеристики подвески сиденья водителя грузового автомобиля [Электронный ресурс]/ П.А. Колядин, А.В. Артемов, В.И. Прядкин// Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1 (2). – С. 403-408.

76. Колядин, П.А. Расчетно-экспериментальное определение характеристик упругих элементов виброзащитной системы автомобиля [Текст] / П.А. Колядин, В.Ю. Татаринцев, Е.Г. Рубцов, В.И. Прядкин//Проблемы и перспективы конструктивного совершенствования отечественного автомобилестроения, материалы Всероссийской научно-технической конференции. –Воронеж, 2023.– С. 86-93. DOI: 10.58168/AutIndustry2023\_86-93.

77. Колядин, П.А. Экспериментальная оценка вибронагруженности штанг опрыскивателя МЭС-600 на шинах сверхнизкого давления [Текст] / П.А. Колядин, А.В. Школьных//Роботизированные и автоматизированные системы в автомобиле- и тракторостроении, материалы Всероссийской научной конференции. –Воронеж, 2022. – С. 91-95. DOI: 10.58168/RASCTB2022\_91-95.

78. Колядин, П.А.К вопросу моделирования автомобильных систем поддрессирования [Текст] / П.А. Колядин, В.И. Прядкин// Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе. – Воронеж, 2019. – С. 121-125.

79. Колядин, П.А. Уточненная модель динамической системы мобильного средства с применением элементов поддрессирования кабины оператора [Электронный ресурс] / П.А. Колядин// Воронежский научно-технический вестник.

– 2019. – Т. 1, № 1 (27). – С. 53-59. – Режим доступа: <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2019/1-27-2019/53-59.pdf>.

80. Константинов М.М. Техничко-экономическое обоснование ширины захвата штангового опрыскивателя [Текст] / М. М. Константинов, Е.С. Петренко // Известия ОГАУ. – 2018. – № 1 (68). – С.122-125.

81. Крук И.С. Направления повышения эффективности использования полевых штанговых опрыскивателей [Текст] / И.С. Крук, О.В. Гордеенко, С.К. Карпович, С.В. Сорока, А.Е. Маркевич // Агропанорама. – 2022. – № 5 (153). – С.2-10.

82. Крук И.С. Способы и технические средства защиты факела распыла от прямого воздействия ветра в конструкциях полевых опрыскивателей [Текст] / И.С. Крук, Т.П. Кот, О.В. Гордеенко. – Минск : БГАТУ, 2022. – 284 с. : ил. – ISBN 978-985-519-726-4.

83. Ксеневиц И.П. Сельскохозяйственные тракторы нерадиционных компоновок / И.П. Ксеневиц, А.П. Парфенов, С.Е. Либцис; под ред. д-ра техн. наук, проф. И.П. Ксеневица. – Минск, 2003. – 210 с.

84. Кузина Ж.И., Бурыкина И.М., Богдановский В.А. Техническая оснащенность и производительность труда в личных подсобных хозяйствах //Техника и оборудование для села. – 2008. - №7. – С.6-7.

85. Кутьков Г.М. Тяговая динамика тракторов. М: Машиностроение, 1980. – 215 с.

86. Малеев, С.И. Аналитические исследования динамики подвески [Текст] / С.И. Малеев, С.М. Огороднов, Е.В. Степанов, А.В. Пинчин // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 6.– С. 88-95.

87. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Ленинград : Колос [Ленингр. отд-ние], 1972. – 200 с.

88. Методика оценки технического состояния полевых штанговых опрыскивателей и технологические требования к ним [Текст] / С.К. Карпович, Л.А.

Маринич, И.С. Крук [и др.]; под общ.ред. И.С. Крука. – Минск: БГАТУ, 2016. – 140 с.

89. Оценка основных показателей агротехнической проходимости комбайна «Vector-410» в условиях Республики Дагестан / В. А. Кравченко, Л. В. Кравченко, В. В. Журба, И. М. Меликов // Вестник аграрной науки Дона. – 2024. – Т. 17, № 3(67). – С. 4-18. – DOI 10.55618/20756704\_2024\_17\_3\_4-18. – EDN OOTZVN.

90. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах : учебное пособие / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – 2-е изд., испр., – Москва : Высш. шк., 2005. – 544 с.

91. Певзнер Я. М. Колебания автомобиля [Текст] / Испытания и исследования. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.

92. Петухов Д.А. Техничко-эксплуатационные показатели самоходных опрыскивателей [Текст] / Д.А. Петухов, Ю.А. Юзенко // АгроСнабФорум. – 2018. – № 2. – С.13-16.

93. Поливаев, О. И. Влияние движителей мобильных энергетических средств при внесении удобрений ранней весной / О. И. Поливаев, А. В. Лощенко // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича, Воронеж, 06 апреля 2016 года. Том Часть 2. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2017. – С. 22-26. – EDN YSAHAP.

94. Полищук Ю.В. Эффективность использования самоходного опрыскивателя оборудованного системой автоматического вождения [Текст] / Ю.В. Полищук, Н.В. Лаптев, А.П. Комаров // Нива Поволжья. – 2021. – № 4 (57). – С.86-92.

95. Прогноз научно-технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года / Минсельхоз России; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2017. – 140 с.

96. Прядкин В. И. Шины сверхнизкого давления для сельскохозяйственных мобильных энергосредств / В. И. Прядкин, С. В. Гончаренко. – Воронеж, 2016. – 240 с.

97. Прядкин В.И. Вибронагруженность штанг самоходного опрыскивателя на шинах сверхнизкого давления [Текст] / В.И. Прядкин, П.А. Колядин // Тракторы и сельхозмашины. – 2023. – Т. 90. – №6. – С. 543-550. doi: 10.17816/0321-4443-567796

98. Прядкин В.И. и др. Транспортно-технологические средства на шинах сверхнизкого давления / В.И. Прядкин, В.Я. Шапиро, З.А. Годжаев, С.В. Гончаренко ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2019. – 492 с.

99. Прядкин В.И. Мобильные средства химизации грузоподъемностью 1...2 т на шинах сверхнизкого давления / В.И. Прядкин ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2017. – 183 с.

100. Прядкин, В. И. Оценка воздействия колесного движителя на растительный покров / В. И. Прядкин // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 2. – С. 24-26. – EDN RUMMAD.

101. Прядкин, В. И. Энергосредство нового поколения / В. И. Прядкин // Техника в сельском хозяйстве. - 2012. - № 3. - С. 23-25.

102. Прядкин, В.И. Моделирование плавности хода мобильного средства малой грузоподъемности, оборудованного шинами сверхнизкого давления [Текст] / В.И. Прядкин, П.А. Колядин// Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика.– Воронеж, 2018. – Т. 6, № 7 (43). – С. 252-256.

103. Пути снижения уплотнения почвы движителями сельскохозяйственной техники / К. В. Белых, С. С. Воронков, И. В. Баскаков, О. И. Поливаев // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 27 марта 2020 года. Том Часть I. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2020. – С. 112-117. – EDN GBLVIS.

104. Раймпель, Й. Шасси автомобиля. Амортизаторы, шины и колеса: Пер. с нем. В. П. Агапова / Под ред. О. Д. Златовратского. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
105. Раймпель, Й. Шасси автомобиля. Рулевое управление: Пер. с нем. А. Л. Карпухина / Под ред. Г. Г. Гридасова. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
106. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. Колебание и плавность хода. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
107. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента : справочное руководство / Л. З. Румшинский. – Москва : Наука, 1971. – 192 с.
108. Русанов, Владим Анатольевич. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения / В. А. Русанов; Рос. акад. с.-х. наук. Всерос. науч.-исслед. ин-т механизации сел. хоз-ва (ВИМ). - Москва, 1998. - 367 с. : ил., табл.; 20 см.; ISBN 5-89527-004-2
109. Савельев Г.С., Кауров Е.Т., Петров Е.В., Калиничко А.С. Повреждаемость всходов озимых колосовых культур при подкормке самоходными машинами химизации на базе тракторов Т-150К и К-701//Сб. науч. тр. ВИМ. Т.ЮЗ.- М., 1984-С.116-122.
110. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618418 РФ. Программа для моделирования режима торможения мобильного средства : № 2020617563 : заявл. 14.07.2020 : опубл. 27.07.2020 / Прядкин Владимир Ильич, Артемов Артем Владимирович, Колядин Павел Александрович, Посметьев Виктор Валерьевич ; правообладатель: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – 2020. – 31 Кб. – Язык программирования: ObjectPascal среды BorlandDelphi 7.
111. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618425 РФ. Программа для моделирования режима криволинейного движения шины мобильного средства : № 2020617551 : заявл. 14.07.2020 :опубл. 28.07.2020 / Прядкин Владимир Ильич, Артемов Артем Владимирович, Колядин Павел Александрович, Посметьев Виктор Валерьевич ; правообладатель: Воронежский

государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – 2020. – 26 Кб. – Язык программирования: ObjectPascal среды BorlandDelphi 7.

112. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619071 РФ. Программа для моделирования и исследования плавности хода мобильного средства, оборудованного шинами сверхнизкого давления : № 2020617539 : заявл. 14.07.2020 : опубл. 10.08.2020 / Прядкин Владимир Ильич, Артемов Артем Владимирович, Колядин Павел Александрович, Посметьев Виктор Валерьевич ; правообладатель: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – 2020. – 12 Кб. – Язык программирования: ObjectPascal среды BorlandDelphi 7.

113. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661823 РФ. Программа для моделирования вибронагруженности мобильного средства на шинах сверхнизкого давления при работе с переменным объемом технологической жидкости : № 2020661038 : заявл. 24.09.2020 : опубл. 01.10.2020 / Прядкин Владимир Ильич, Артемов Артем Владимирович, Колядин Павел Александрович, Посметьев Виктор Валерьевич ; правообладатель: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – 2020. – 16 Кб. – Язык программирования: ObjectPascal среды BorlandDelphi 7.

114. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663261 РФ. Программа для моделирования маневренности мобильного средства, оборудованного шинами сверхнизкого давления, при различном объеме технологической жидкости : № 2021662453 : заявл. 04.08.2021 : опубл. 13.08.2021 / Прядкин Владимир Ильич, Артемов Артем Владимирович, Колядин Павел Александрович, Посметьев Виктор Валерьевич, Губанов Максим Алексеевич ; правообладатель: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – 2021. – 34 Кб. – Язык программирования: ObjectPascal среды BorlandDelphi 7.

115. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619267 РФ. Программа для моделирования движения оборудованного шинами сверхнизкого давления мобильного средства с опрыскивателем : № 2023618680 :

заявл. 06.05.2023 : опубл. 06.05.2023/ Прядкин Владимир Ильич, Артемов Артем Владимирович, Колядин Павел Александрович, Посметьев Виктор Валерьевич; правообладатель: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – 2023. – 27 Кб. – Язык программирования: ObjectPascal среды BorlandDelphi 7.

116. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025668123 РФ. Программа для моделирования воздействия шины сверхнизкого давления мобильного транспортного средства на растительный покров : :№ 2025666647 : заявл. 13.06.2025 : опубл. 10.07.2025 / Прядкин Владимир Ильич, Колядин Павел Александрович, Посметьев Виктор Валерьевич; правообладатель: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – 2025. – Язык программирования: ObjectPascal среды BorlandDelphi 7.

117. Советов, Б. Я. Моделирование систем [Текст] : учебное пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев – М. : Высш. шк., 1998. – 319 с.

118. Степанов, Е.В. Оценка плавности хода автомобиля с гидроэластомерной подвеской [Текст] / Е.В. Степанов, Ю.И. Молев, С.М. Огороднов, А.С. Вашурин // Труды НГТУ имени Р. Е. Алексеева. – 2020. – № 3 (130). – С. 120-131.

119. Техника для ресурсосберегающих технологий / С. В. Кадыров, В. И. Прядкин, А. В. Русанов, В. Н. Бриндюк // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2012. – № 2. – С. 44-47. – EDN OXSCPR.

120. Тяговые показатели шин различного конструктивного исполнения для комплектации двигателей мобильных энергетических средств пятого класса тяги / В. А. Кравченко, Л. В. Кравченко, И. М. Меликов, Э. С. Гасанова // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. – 2025. – Т. 17, № 6-2. – С. 579-596. – DOI 10.12731/2658-6649-2025-17-6-2-1587. – EDN BWVADO.

121. Федоров, В. В. Теория оптимального эксперимента / В. В. Федоров. – Москва : ГРФМЛ изд-ва Наука, 1971. – 312 с.

122. Финни, Д. Введение в теорию планирования экспериментов / Д. Фанни. – Пер. с англ. – Москва : ГРФМЛ изд-ва Наука, 1970. – 287 с.

123. Хеерман, Д. В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике / Д. В. Хеерман. – Москва : Наука, 1990. – 176 с.

124. Цимбалин, В. Б. Испытания автомобилей / В. Б. Цимбалин, В. Н. Кравец, С. М. Кудрявцев, И. Н. Успенский, В. И. Песков. – М. : «Машиностроение», 1978 – 199 с.

125. Черноиванов В.И., Горячев С.А. Стимулирование обновления машинно-тракторного парка // Техника и оборудование для села. – 2006. - №11. – С.6-8

126. Шмелев А.В. Моделирование и анализ силовой нагруженности системы штанг самоходного опрыскивателя в среде MSC.ADAMS [Текст] / А.В. Шмелев, Д.Г. Лопух, О.В. Дробышевская // Актуальные вопросы машиноведения. – 2016. – № 5. – С.91-94.

127. Щеголихина Т.А. Тенденции развития зарубежных самоходных опрыскивателей [Текст] / Т.А. Щеголихина // Современные ресурсоэффективные технологии и технические средства в АПК; материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, г. Курск, 31 марта 2021 г. – Курск. – 2021. – С.116-120.

128. Янцов, Н. Д. Агротехническая проходимость машин и метод оценки снижения урожайности сельскохозяйственных культур из-за повреждения растений движителями / Н. Д. Янцов, А. Г. Вабищевич // Механизация и электрификация сельского хозяйства : Межведомственный тематический сборник. В 2-х томах. Том 1. Выпуск 43. – Минск : Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2009. – С. 212-217. – EDN YWDZBQ.

## Приложение А. Результаты проведенных лабораторно-полевых исследований

Таблица 1 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,260312	0,163583	0,133953	0,213642
1	0,205876	0,141976	0,173223	0,21525
1,25	0,235508	0,147154	0,121008	0,226403
1,6	0,347132	0,142252	0,119762	0,170135
2	0,334464	0,326733	0,145968	0,160594
2,5	0,304231	0,350479	0,379973	0,212939
3,15	0,206711	0,547042	0,540683	0,556555
4	0,433425	0,864797	0,923623	1,10964
5	0,596198	1,123028	2,076121	2,043391
6,3	0,740039	1,31903	3,10196	4,058018
8	0,455815	0,455815	2,508876	3,14856
10	0,537854	0,759738	0,778298	1,63828
12,5	0,200907	0,346768	0,438589	0,787334
16	0,256478	0,437341	0,365941	0,326341
20	0,334765	0,321389	0,32308	0,509673
25	0,58233	0,312271	0,364245	0,467651
31,5	0,322789	0,3818	0,385828	0,368639
40	0,318702	0,652896	0,428194	0,433815
50	0,490484	0,951734	0,497519	0,565215
63	0,2033	0,388905	0,41362	0,415235
80	0,113182	0,244611	0,423915	0,585569

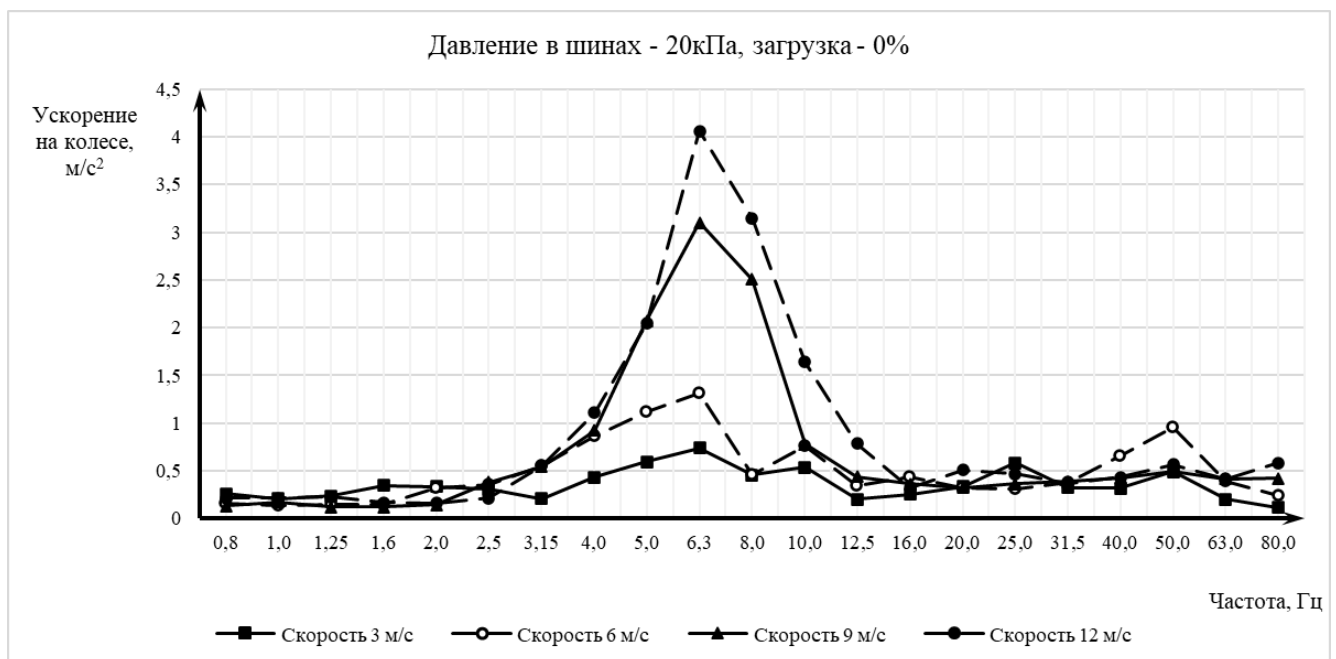


Рисунок 1 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 2 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапециевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,267392	0,547206	0,361362	0,877069
1	0,269444	0,637613	0,392654	0,832612
1,25	0,212206	0,627938	0,318702	0,923208
1,6	0,437144	0,551902	0,247711	0,822193
2	0,356252	0,662757	0,220145	0,719716
2,5	0,455815	0,840765	0,467651	0,815809
3,15	0,400982	0,81154	0,808868	1,354881
4	0,288896	1,098881	1,154782	2,359318
5	0,653777	1,611003	2,514147	1,949728
6,3	0,794031	2,080994	4,79768	4,915146
8	0,708264	1,561546	5,370058	6,744994
10	0,484347	1,197983	2,234698	3,386512
12,5	0,303275	0,761335	0,992979	1,591321
16	0,351636	0,579543	0,633042	1,009186
20	0,472939	0,468915	0,353698	0,890717
25	0,712417	0,380486	0,331867	0,783096
31,5	0,480658	0,409302	0,345316	0,567507
40	0,322838	0,632852	0,457116	0,512969
50	0,446483	0,994022	0,668344	0,480874
63	0,270051	0,379517	0,700871	0,655249
80	0,166377	0,292075	0,519781	0,840765

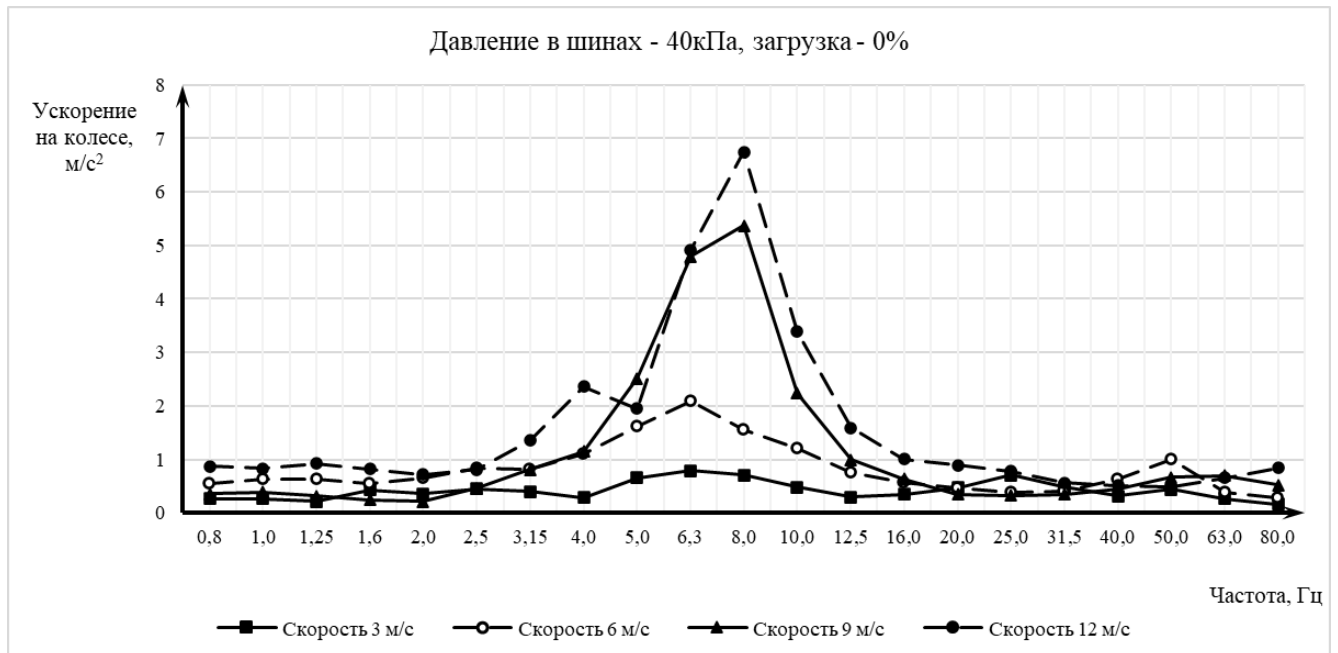


Рисунок 2 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапециевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 3 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,769827	0,315423	0,616466	0,692516
1	0,717024	0,396202	0,783918	0,698144
1,25	0,466531	0,422266	0,637135	0,68119
1,6	0,831864	0,217357	0,589091	0,629918
2	0,692204	0,384846	0,577635	0,575733
2,5	0,771907	0,524477	0,864667	0,57092
3,15	0,67025	0,859111	1,064347	0,916451
4	0,49373	1,28524	1,512246	1,436885
5	0,469829	1,869023	2,773952	2,348027
6,3	0,900154	2,500948	5,037482	5,106213
8	0,71135	1,793271	7,384717	7,984892
10	0,525107	1,29592	3,685287	4,940558
12,5	0,423788	0,869998	1,52568	1,994963
16	0,430124	0,397749	1,422312	1,525223
20	0,441094	0,352006	0,577895	0,668244
25	0,746194	0,347288	0,462839	0,533917
31,5	0,307671	0,41742	0,50693	1,027197
40	0,305373	0,799106	0,398525	0,610854
50	0,554057	1,03384	0,766258	0,700136
63	0,226403	0,403696	1,412961	0,960189
80	0,168082	0,39142	0,657019	1,437315

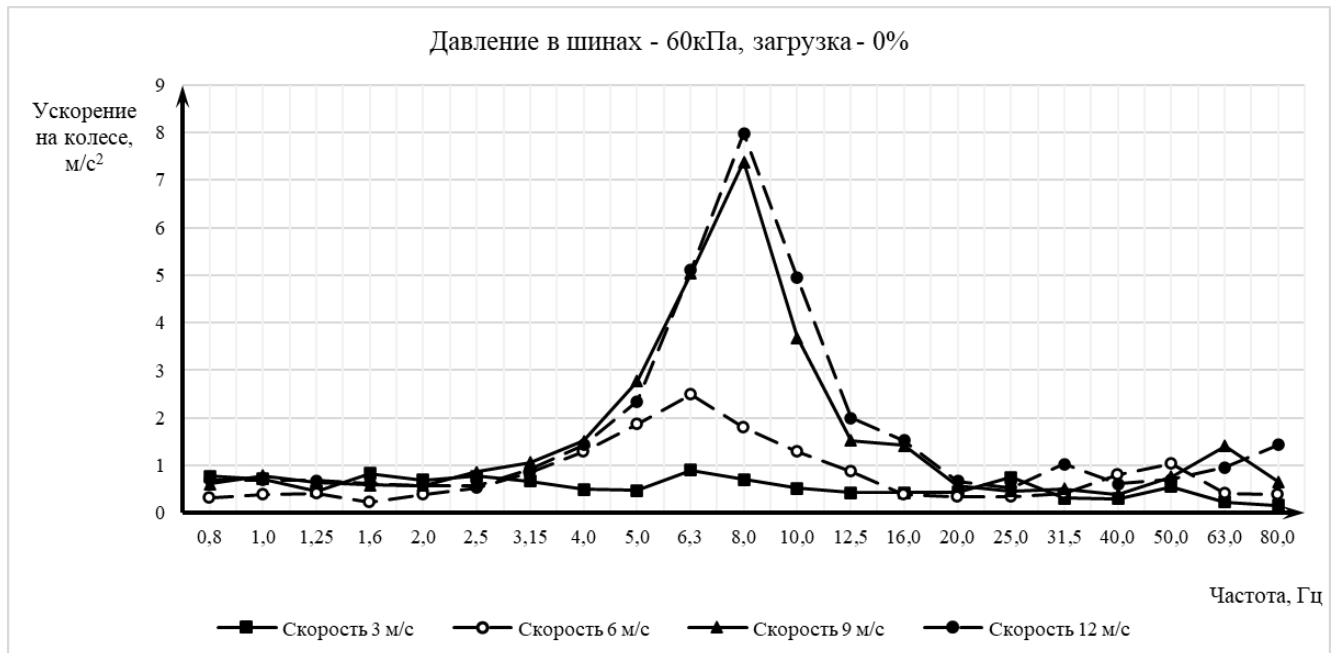


Рисунок 3 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 4 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,804756	0,321389	0,712417	1,340938
1	0,790408	0,4627	0,878253	1,358134
1,25	0,607566	0,565045	0,708583	1,233704
1,6	0,936871	0,368087	0,549838	1,033375
2	0,73918	0,406733	0,467861	0,648701
2,5	0,795758	0,77655	0,775503	0,717885
3,15	0,607566	0,955308	1,222474	1,405778
4	0,470816	1,435248	1,439472	2,181081
5	0,587239	2,230815	2,698484	2,591443
6,3	1,026119	3,04114	5,356007	5,997839
8	0,830368	2,193147	8,777268	9,734766
10	0,524477	1,699517	4,919569	6,338963
12,5	0,395371	1,092966	1,780947	2,276626
16	0,27986	0,428579	1,984226	2,033918
20	0,298673	0,350479	0,782744	1,104661
25	0,39289	0,238349	0,526841	0,674585
31,5	0,165631	0,399542	0,787334	0,978498
40	0,324633	0,752936	0,489896	0,638378
50	0,660971	0,66395	0,660476	0,668544
63	0,298628	0,790171	2,001253	1,155475
80	0,184342	0,519469	0,860271	1,701607

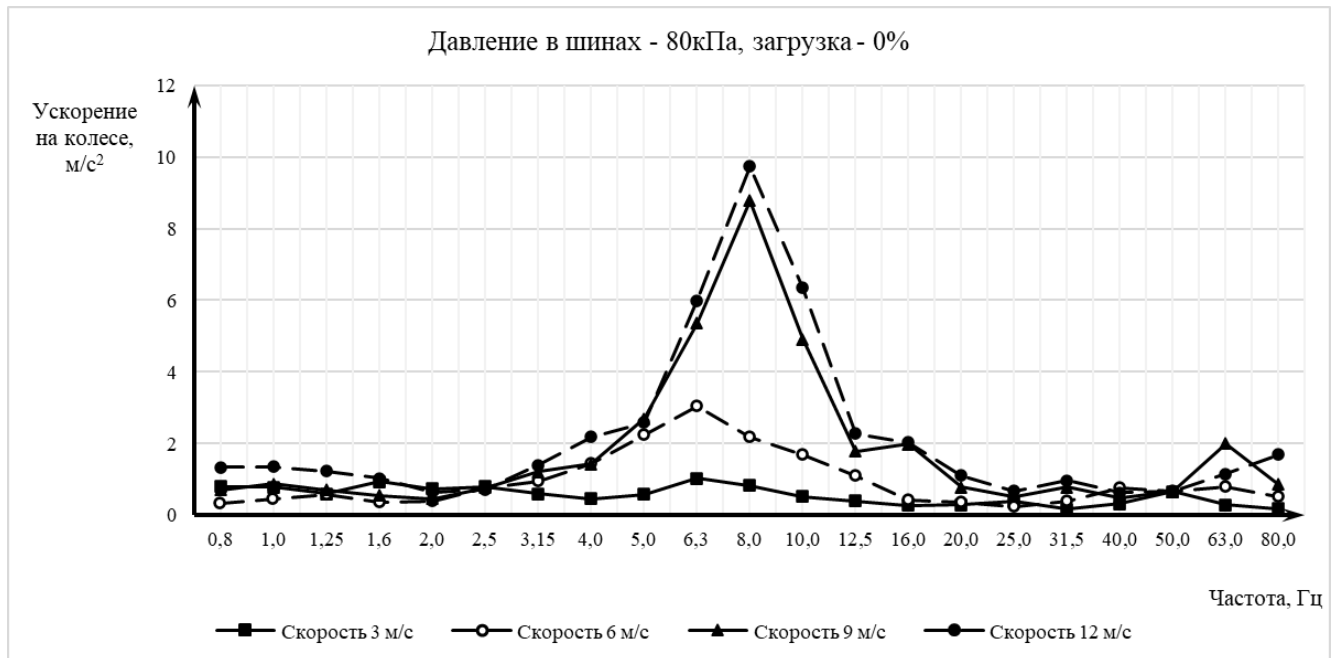


Рисунок 4 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 5 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,350531	0,235861	0,369802	0,415983
1	0,419427	0,29046	0,340892	0,336274
1,25	0,276938	0,284513	0,23885	0,304048
1,6	0,403878	0,286181	0,196145	0,27294
2	0,369635	0,369137	0,26476	0,24304
2,5	0,360929	0,390482	0,698459	0,369137
3,15	0,156295	0,640679	0,709859	0,632757
4	0,225692	0,865964	1,066903	1,079613
5	0,482607	0,966833	2,194857	1,904661
6,3	0,593993	1,123938	2,695847	3,747878
8	0,507538	0,874968	2,281409	2,835759
10	0,217814	0,600504	0,570749	1,489968
12,5	0,23072	0,372975	0,493138	0,593167
16	0,267753	0,379233	0,426464	0,394424
20	0,292689	0,434792	0,439708	0,428066
25	0,582942	0,457047	0,526131	0,47564
31,5	0,2409	0,697203	0,755989	0,595216
40	0,264046	1,04365	0,677727	0,63162
50	0,56513	1,341944	0,748883	0,751695
63	0,136201	0,357215	0,762477	0,476282
80	0,115947	0,360118	0,60321	0,643278



Рисунок 5 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 6 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,616835	0,378041	0,250099	0,341711
1	0,598706	0,330328	0,406368	0,412691
1,25	0,43148	0,338753	0,284683	0,399842
1,6	0,681496	0,294008	0,267312	0,319995
2	0,595573	0,393302	0,337637	0,324974
2,5	0,622035	0,393833	0,642314	0,494619
3,15	0,474572	0,769366	0,721769	0,867133
4	0,326488	1,005864	1,11364	1,128936
5	0,566063	1,393107	2,305475	2,077989
6,3	0,835044	1,623112	4,370134	4,999116
8	0,658498	0,877332	4,917121	5,934133
10	0,610396	1,058777	2,117612	3,398718
12,5	0,305694	0,600234	0,769135	1,445743
16	0,306658	0,298002	0,564876	0,567677
20	0,376966	0,300694	0,382545	0,454928
25	0,638761	0,334063	0,305831	0,45099
31,5	0,472655	0,259105	0,452615	0,545977
40	0,275613	0,590594	0,499013	0,51105
50	0,516751	0,76902	0,771792	0,607566
63	0,3211	0,322693	0,716165	0,54369
80	0,144726	0,303821	0,543283	0,872479

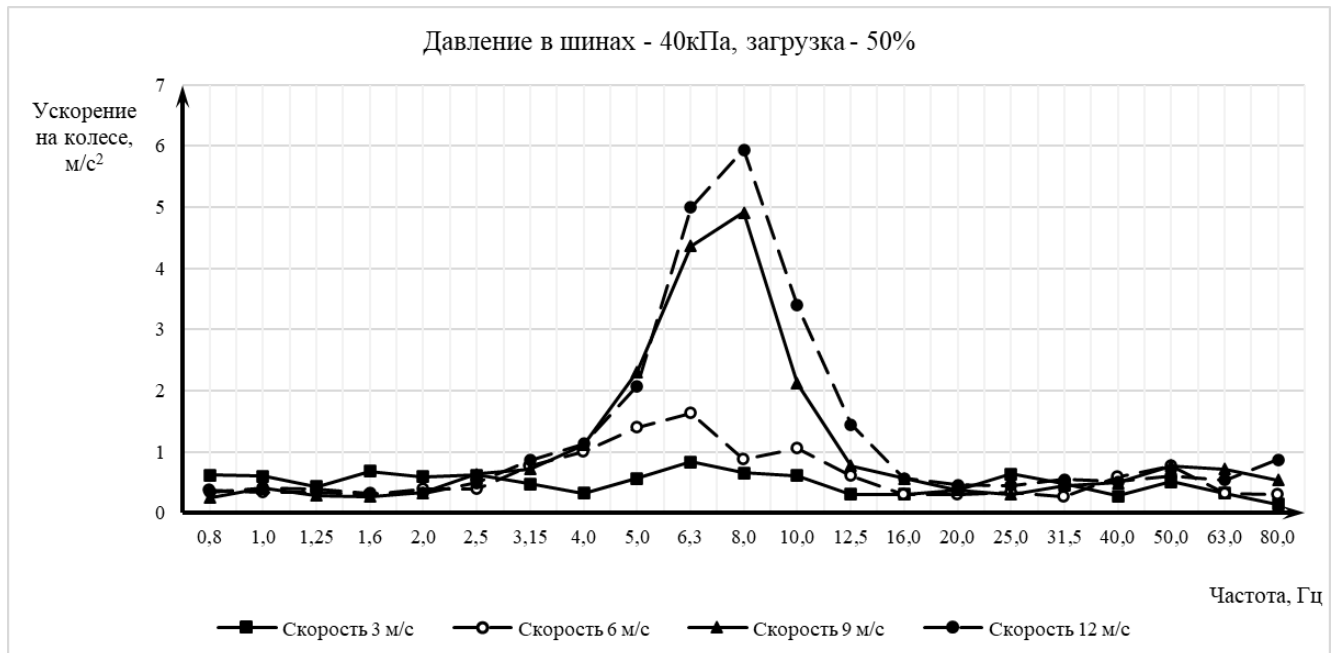


Рисунок 6 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 7 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,476568	0,368805	0,247637	0,468704
1	0,505261	0,317939	0,438917	0,551323
1,25	0,398645	0,452547	0,368639	0,504807
1,6	0,594324	0,377701	0,353168	0,504353
2	0,622595	0,623623	0,428066	0,452751
2,5	0,699926	0,562847	0,840261	0,615819
3,15	0,626997	0,73454	0,76511	0,82528
4	0,540278	1,013127	1,062594	1,158423
5	0,788397	1,637052	2,118564	1,860915
6,3	0,958905	2,229742	4,09855	4,79147
8	0,737409	1,544782	6,280124	7,809616
10	0,53963	1,19924	3,113359	5,079949
12,5	0,428644	0,834236	1,067223	2,435137
16	0,295821	0,363372	1,104827	0,951734
20	0,225895	0,286825	0,43064	0,404969
25	0,434596	0,332863	0,36359	0,358664
31,5	0,332664	0,359148	0,409794	0,613883
40	0,314149	0,778765	0,430447	0,534478
50	0,755876	0,651722	0,816421	0,881287
63	0,399842	0,670451	1,589652	1,24485
80	0,19869	0,518847	0,599424	1,459024



Рисунок 7 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 8 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,225387	0,068416	0,135427	0,152043
1	0,259455	0,078368	0,179704	0,16788
1,25	0,293084	0,119386	0,18484	0,245714
1,6	0,483367	0,133592	0,186594	0,229892
2	0,664448	0,255288	0,263058	0,26468
2,5	0,702238	0,342891	0,40918	0,403938
3,15	0,583335	0,658498	0,564876	0,664149
4	0,518847	1,221009	1,00135	0,957889
5	0,753613	1,805679	2,195186	1,611486
6,3	0,937921	2,743883	4,196784	4,478234
8	0,620489	2,001553	7,596345	8,649638
10	0,449505	1,251587	4,07588	5,882084
12,5	0,371385	0,943212	1,333921	2,26879
16	0,260801	0,563607	1,467139	1,245597
20	0,385943	0,453158	0,513739	0,543446
25	0,508795	0,455201	0,425443	0,49373
31,5	0,169473	0,465553	0,49336	0,693347
40	0,252605	0,574871	0,495584	0,596198
50	0,461177	0,589533	0,760308	0,699821
63	0,209174	0,366326	1,067223	0,81227
80	0,154861	0,377192	0,579804	1,430437



Рисунок 8 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 9 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,080151	0,122762	0,091975	0,182486
1	0,102182	0,09782	0,097119	0,157035
1,25	0,106979	0,108091	0,083951	0,174618
1,6	0,17584	0,125949	0,117293	0,131772
2	0,278061	0,217618	0,174135	0,167918
2,5	0,193604	0,278687	0,331072	0,281205
3,15	0,102136	0,495584	0,449101	0,454689
4	0,192822	0,716272	0,837871	0,879901
5	0,19641	0,93645	1,795153	1,886192
6,3	0,372807	1,026963	2,54094	3,54821
8	0,446282	0,738515	2,032394	2,892214
10	0,462348	0,562594	0,579109	1,622394
12,5	0,298538	0,309196	0,368253	0,550704
16	0,271879	0,306152	0,375331	0,374151
20	0,315517	0,245714	0,336173	0,496588
25	0,759397	0,351795	0,336324	0,507881
31,5	0,384039	0,594057	0,542225	0,659239
40	0,448495	0,619987	0,564453	0,806205
50	0,61416	0,907837	0,512124	0,657019
63	0,310171	0,252775	0,546223	0,544057
80	0,082306	0,216837	0,628126	0,600234

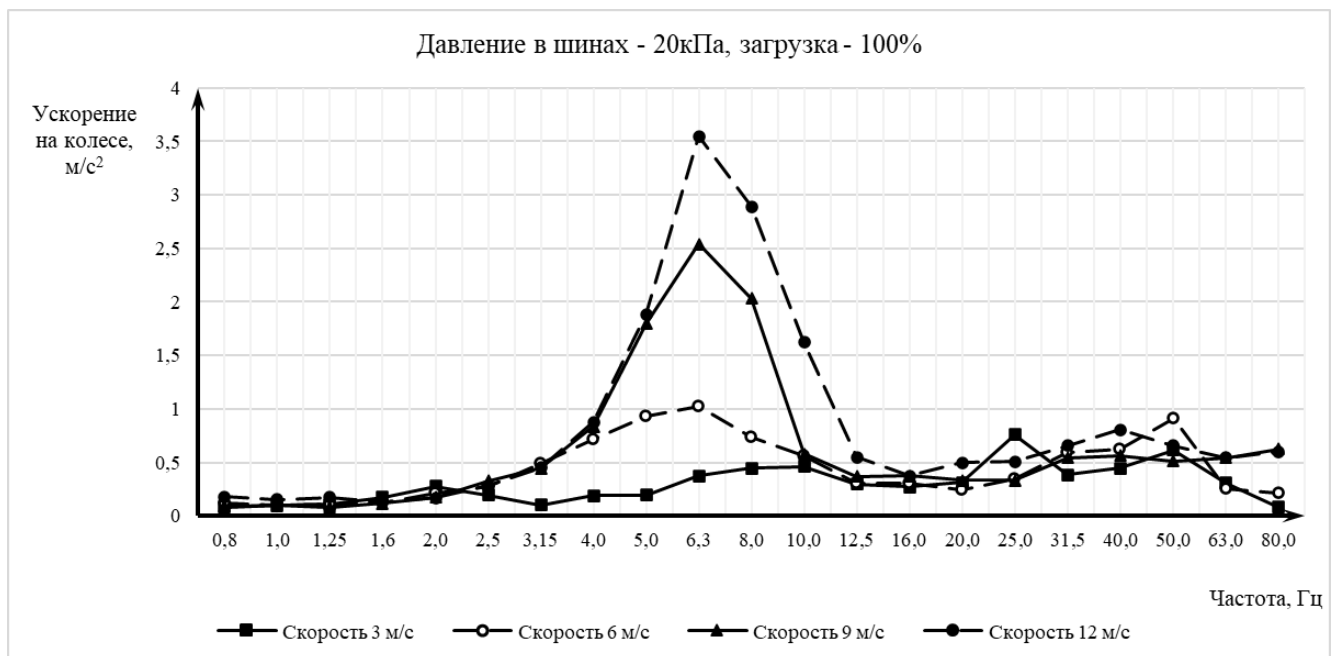


Рисунок 9 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 10 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,055982	0,087746	0,096683	0,105751
1	0,101222	0,089917	0,110516	0,141423
1,25	0,15084	0,122927	0,104177	0,16889
1,6	0,188026	0,15766	0,128101	0,177163
2	0,324585	0,264561	0,19164	0,217195
2,5	0,316512	0,324099	0,282219	0,334464
3,15	0,229479	0,565469	0,463116	0,527236
4	0,191181	0,863242	0,891117	0,866874
5	0,465972	1,085683	1,990781	1,839834
6,3	0,422646	1,190929	3,38438	4,566362
8	0,598885	0,750232	3,718874	5,538082
10	0,36715	1,045059	1,558272	3,350157
12,5	0,155734	0,402669	0,577462	1,345368
16	0,148217	0,321341	0,479506	0,411764
20	0,156647	0,252472	0,265037	0,417983
25	0,258756	0,213163	0,284214	0,39472
31,5	0,150095	0,301416	0,346249	0,45343
40	0,294008	0,50952	0,385423	0,477641
50	0,624745	0,874575	0,654169	0,490337
63	0,170084	0,353274	0,605475	0,477426
80	0,117627	0,237351	0,409855	0,79029

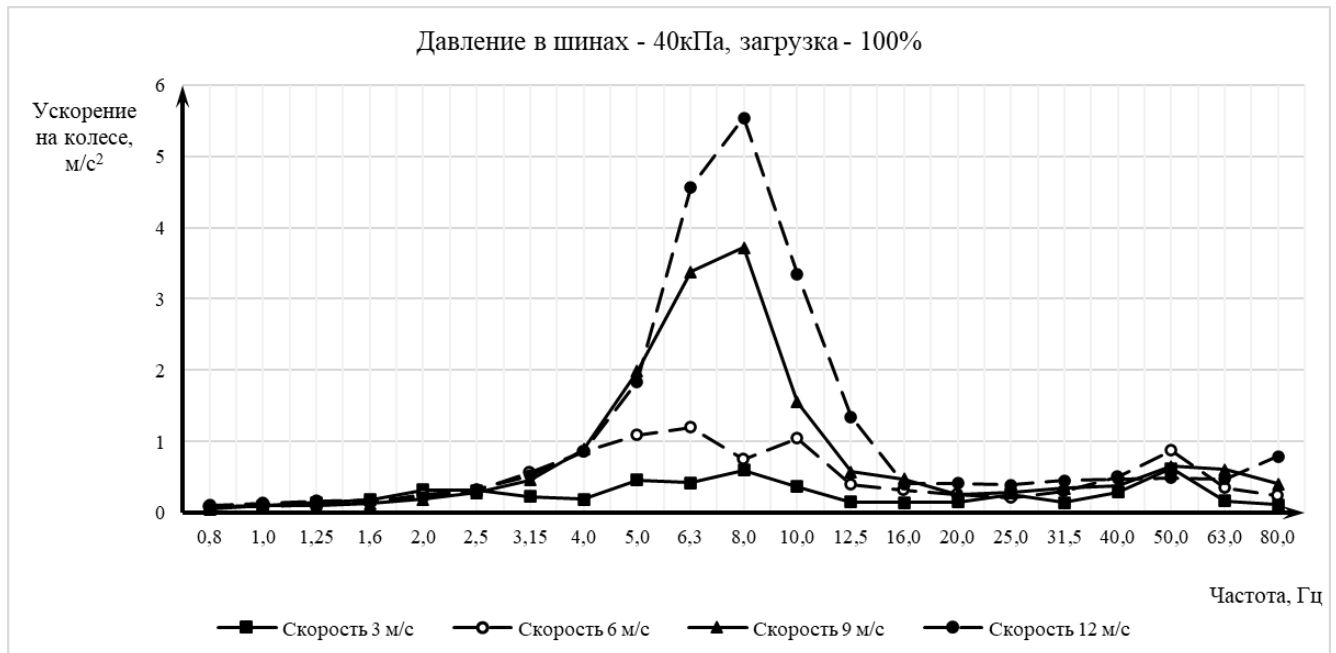


Рисунок 9 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 11 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,264998	0,111297	0,212748	0,246156
1	0,200245	0,121335	0,252359	0,287729
1,25	0,312974	0,141572	0,19058	0,269
1,6	0,342583	0,160642	0,217945	0,262586
2	0,432646	0,272368	0,277895	0,292207
2,5	0,421507	0,395253	0,409364	0,421823
3,15	0,370467	0,620266	0,576424	0,591657
4	0,239388	0,968574	0,959614	0,92003
5	0,490926	1,448433	1,986309	1,795423
6,3	0,615963	1,687949	4,091183	4,73719
8	0,596466	1,286397	5,699776	7,513886
10	0,508452	1,343151	2,803634	5,449142
12,5	0,357376	0,833861	1,204104	1,997357
16	0,243623	0,38473	1,164168	1,118995
20	0,520483	0,292689	0,508376	0,403092
25	0,432841	0,250963	0,427424	0,403999
31,5	0,386638	0,313396	0,393892	0,757123
40	0,600504	0,552068	0,473009	0,480802
50	0,753613	0,639815	0,860658	0,620824
63	0,501413	0,513046	1,220643	0,965964
80	0,127259	0,512585	0,536565	1,618022

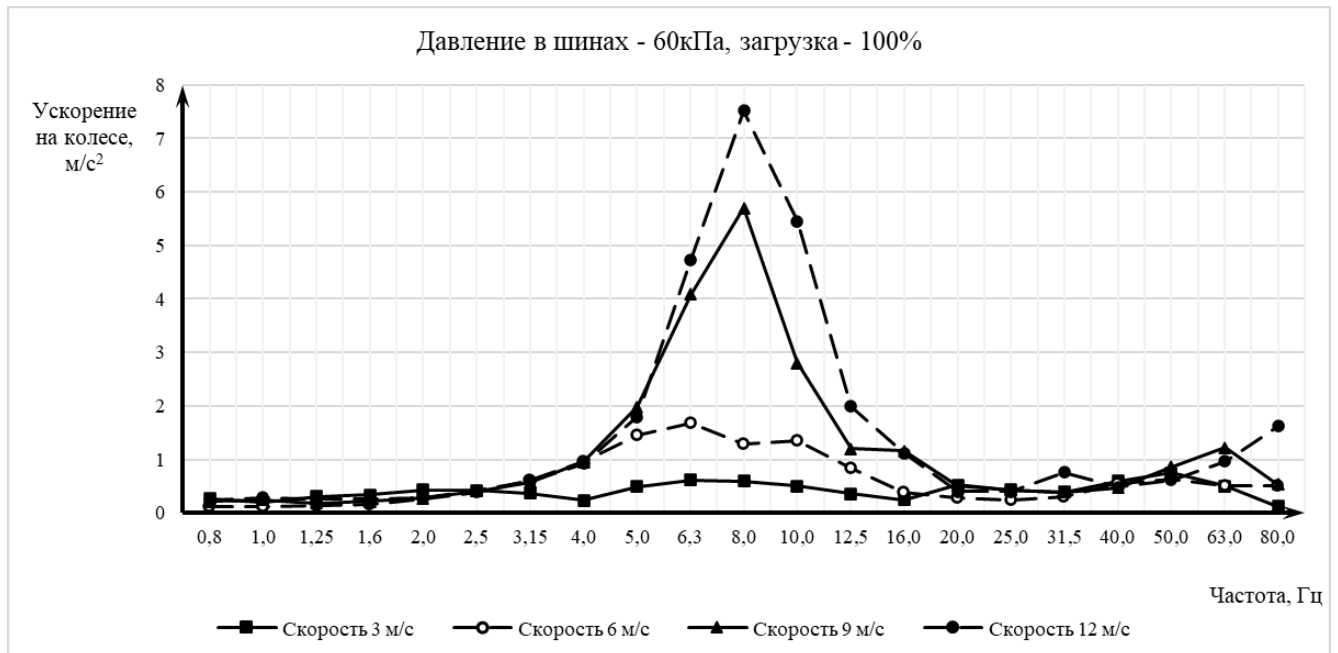


Рисунок 11 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 12 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,272491	0,22478	0,373927	0,252889
1	0,350847	0,19641	0,374993	0,329438
1,25	0,365503	0,218206	0,360442	0,299614
1,6	0,355292	0,196764	0,30744	0,296398
2	0,418861	0,304641	0,393479	0,319372
2,5	0,595662	0,384557	0,607475	0,41905
3,15	0,652602	0,597809	0,667143	0,569723
4	0,594859	0,980407	0,979525	0,876149
5	0,50209	1,623123	2,005759	1,691688
6,3	0,649615	2,474999	4,339452	4,488988
8	0,70191	2,289632	7,385195	8,4499
10	0,580326	1,248214	5,001365	7,054033
12,5	0,411209	1,58989	1,471545	2,582911
16	0,410101	0,827883	1,973843	1,654817
20	0,392595	0,580065	0,785448	0,916451
25	0,418673	0,439312	0,571691	0,685698
31,5	0,213258	0,482607	0,53737	0,858596
40	0,569723	0,561331	0,564537	0,592989
50	0,676813	0,791832	0,681701	0,648506
63	0,195177	0,714021	1,662276	1,339532
80	0,151315	0,496476	0,850398	1,619478

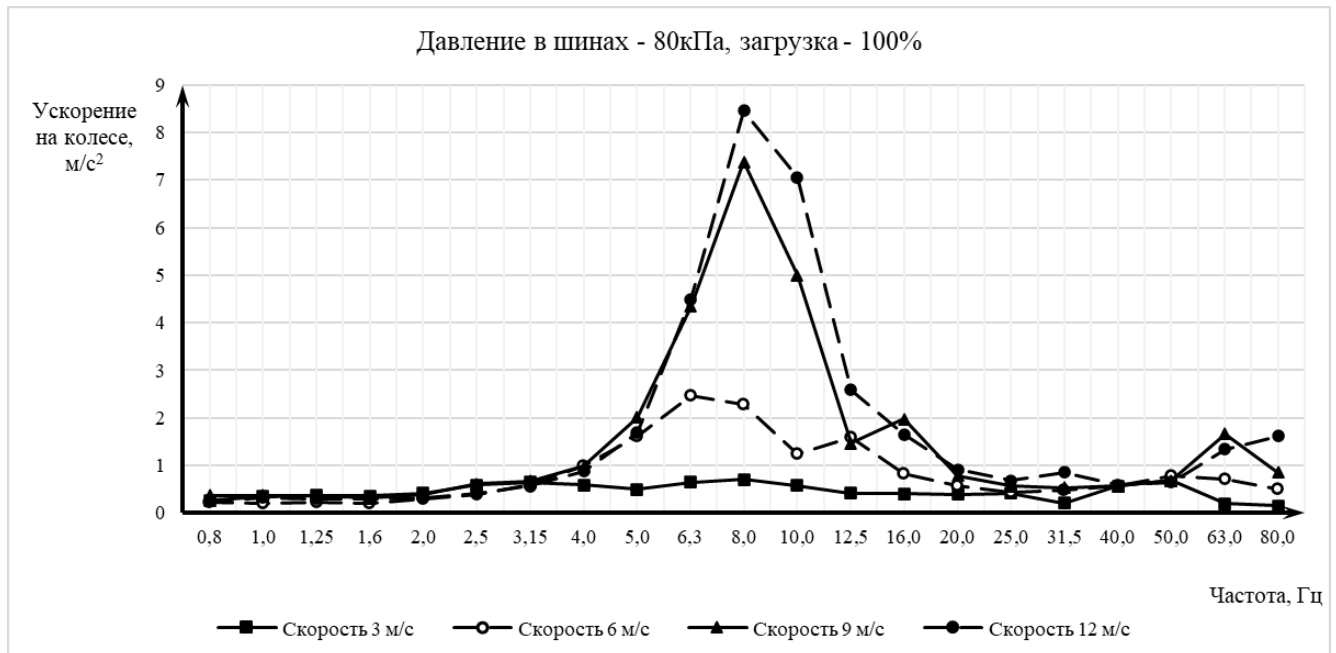


Рисунок 12 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 13 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,259455	0,203789	0,169473	0,253458
1	0,264521	0,23417	0,260859	0,281374
1,25	0,187351	0,198631	0,194477	0,228175
1,6	0,352986	0,204983	0,163853	0,18379
2	0,283491	0,335116	0,163191	0,240431
2,5	0,218894	0,243404	0,190409	0,167152
3,15	0,098749	0,151043	0,148484	0,184619
4	0,097469	0,163191	0,202509	0,233504
5	0,121772	0,31396	0,28541	0,285196
6,3	0,10018	0,242967	0,251189	0,561078
8	0,184591	0,289417	0,217814	0,421507
10	0,21059	0,347705	0,263809	0,342377
12,5	0,08801	0,246821	0,259572	0,399542
16	0,067529	0,231969	0,214799	0,297021
20	0,082195	0,300559	0,379063	0,31059
25	0,248269	0,312411	0,483694	0,435444
31,5	0,199526	0,25483	0,417921	0,598347
40	0,06211	0,308363	0,389605	0,552316
50	0,148417	0,511617	0,553062	0,689718
63	0,097997	0,58806	0,972048	1,05498
80	0,114753	0,335871	0,474643	0,62888

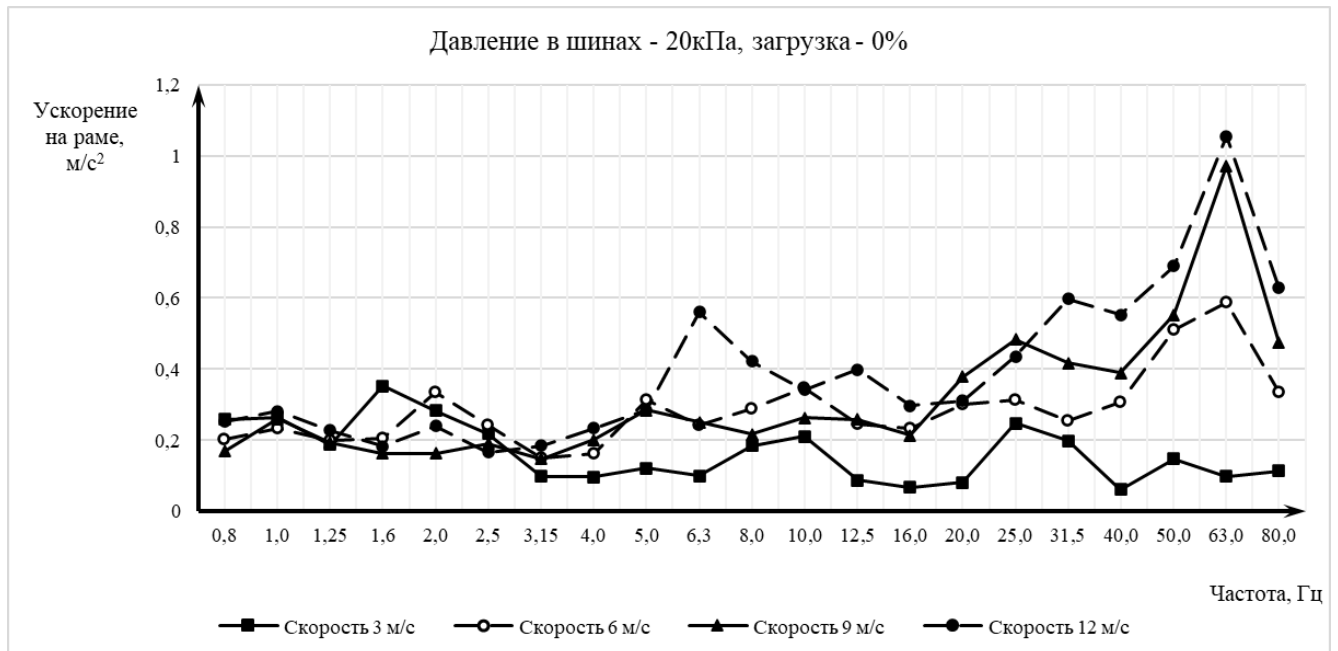


Рисунок 13 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 14 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,248716	0,501638	0,156858	0,847853
1	0,322838	0,642121	0,299345	0,636372
1,25	0,258523	0,603753	0,237885	0,627561
1,6	0,364866	0,571263	0,200877	0,654071
2	0,33781	0,326488	0,241985	0,677422
2,5	0,288896	0,333013	0,23072	0,726982
3,15	0,137184	0,472939	0,187267	0,939402
4	0,138735	0,561078	0,267152	1,155821
5	0,213546	0,621104	0,363863	0,951734
6,3	0,156295	0,567677	0,476997	0,937714
8	0,257363	0,593256	0,415298	1,472869
10	0,231344	0,682007	0,327517	1,337125
12,5	0,11429	0,651722	0,435967	1,090675
16	0,067317	0,50322	0,432841	0,988375
20	0,076902	0,438917	0,57152	0,750907
25	0,144012	0,282727	0,573064	0,54737
31,5	0,098838	0,476997	0,446885	0,94194
40	0,122762	0,508681	0,726328	0,742178
50	0,175761	0,564622	0,988375	1,326344
63	0,240575	0,748008	1,452869	1,706291
80	0,163338	0,626997	0,818995	0,94067

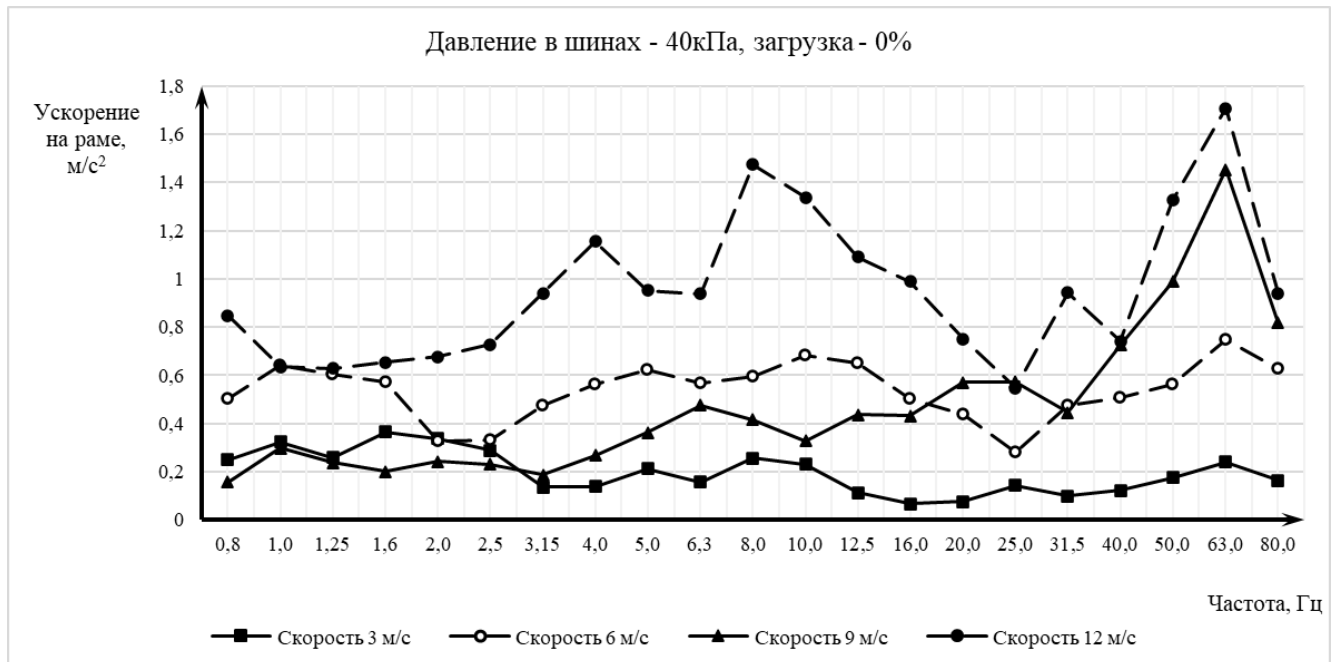


Рисунок 14 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 15 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,166977	0,250624	0,179435	0,362828
1	0,209268	0,373479	0,218239	0,31059
1,25	0,274953	0,474643	0,173146	0,278186
1,6	0,382958	0,391538	0,201752	0,214895
2	0,314526	0,168789	0,225523	0,275035
2,5	0,271756	0,176315	0,330972	0,362339
3,15	0,168713	0,370134	0,25895	0,392301
4	0,189469	0,385596	0,214091	0,504807
5	0,22357	0,490264	0,35391	0,509444
6,3	0,180974	0,581632	0,370912	0,904034
8	0,265475	0,50891	0,611771	0,910563
10	0,156295	0,576683	0,50564	0,600414
12,5	0,086557	0,556304	0,644629	0,574785
16	0,090052	0,431092	0,67854	0,649382
20	0,110152	0,321678	0,510514	0,490999
25	0,130798	0,326341	0,789106	1,138453
31,5	0,095559	0,482173	0,828752	1,193716
40	0,119225	0,522829	0,922931	1,075736
50	0,15282	0,636658	1,311909	1,392981
63	0,190752	0,835002	1,758054	1,994915
80	0,131034	0,652896	1,118492	1,373902



Рисунок 15 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 16 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,215961	0,290503	0,405516	0,969446
1	0,21801	0,406612	0,370301	0,890183
1,25	0,145837	0,558058	0,238206	0,80802
1,6	0,489006	0,451599	0,21227	0,516054
2	0,378552	0,289243	0,276068	0,275861
2,5	0,288118	0,186958	0,366161	0,306749
3,15	0,200877	0,373143	0,333662	0,561752
4	0,176712	0,388614	0,339108	0,735973
5	0,236924	0,55439	0,49737	0,458076
6,3	0,149422	0,633801	0,480802	0,789224
8	0,274212	0,549426	0,78887	1,395699
10	0,189981	0,561078	0,610946	0,988079
12,5	0,135346	0,587151	0,722094	0,955881
16	0,121335	0,420119	0,726219	1,027505
20	0,149826	0,372863	0,603301	0,765684
25	0,166827	0,365065	0,659882	1,216259
31,5	0,161149	0,529216	0,947464	0,977032
40	0,143753	0,587944	0,994171	0,995662
50	0,182281	0,772718	1,485953	1,503656
63	0,247044	1,152852	2,154435	2,380283
80	0,198185	0,795043	1,2891	1,583231

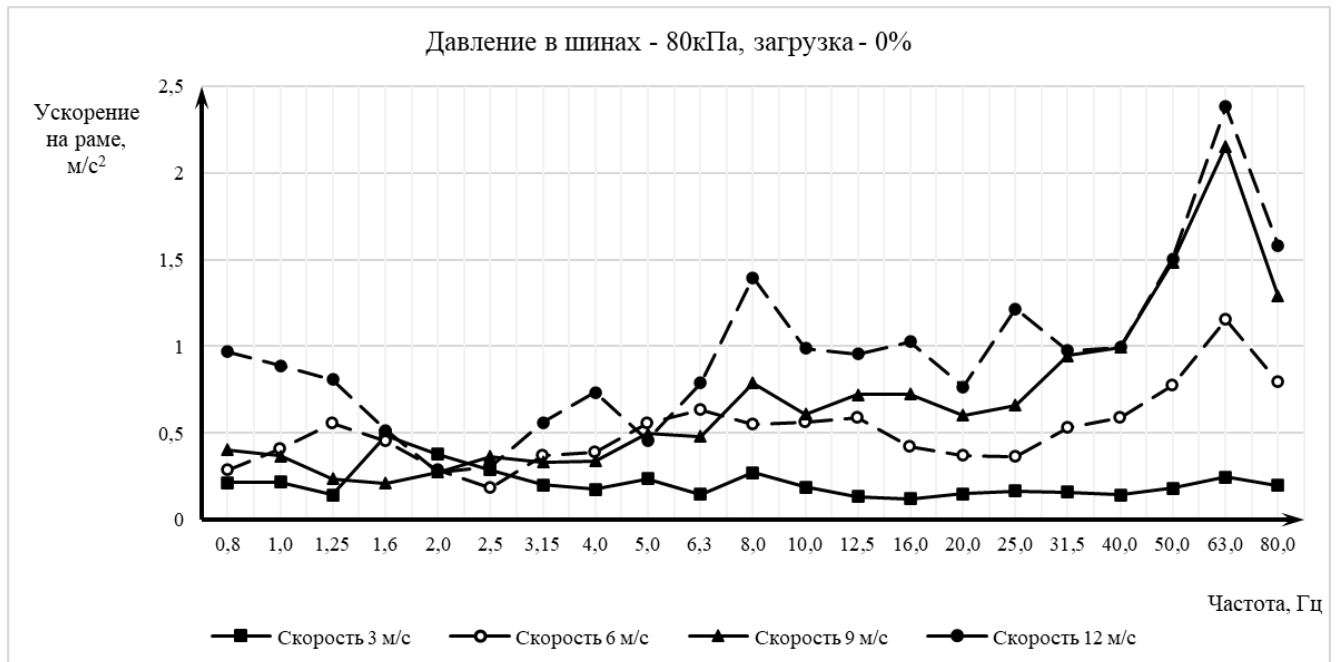


Рисунок 16 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 17 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,167654	0,116889	0,218304	0,203544
1	0,138299	0,139048	0,266671	0,241514
1,25	0,188196	0,182692	0,209834	0,231621
1,6	0,341858	0,120953	0,18964	0,19869
2	0,093477	0,139737	0,160353	0,136733
2,5	0,098438	0,149355	0,092765	0,123259
3,15	0,059566	0,098217	0,122762	0,225996
4	0,063838	0,056615	0,125836	0,191009
5	0,066355	0,144921	0,231865	0,12703
6,3	0,102136	0,21422	0,277562	0,690546
8	0,292952	0,228141	0,283874	0,472159
10	0,256093	0,184591	0,173561	0,172214
12,5	0,088805	0,128178	0,153647	0,260156
16	0,080078	0,230099	0,203789	0,246526
20	0,068078	0,131802	0,321678	0,287729
25	0,158775	0,08648	0,616928	0,575302
31,5	0,106642	0,117839	0,460969	0,622782
40	0,109954	0,186092	0,342891	0,506854
50	0,18534	0,384894	0,56998	0,569894
63	0,132993	0,210022	0,697969	0,871303
80	0,155594	0,180243	0,483911	0,702028

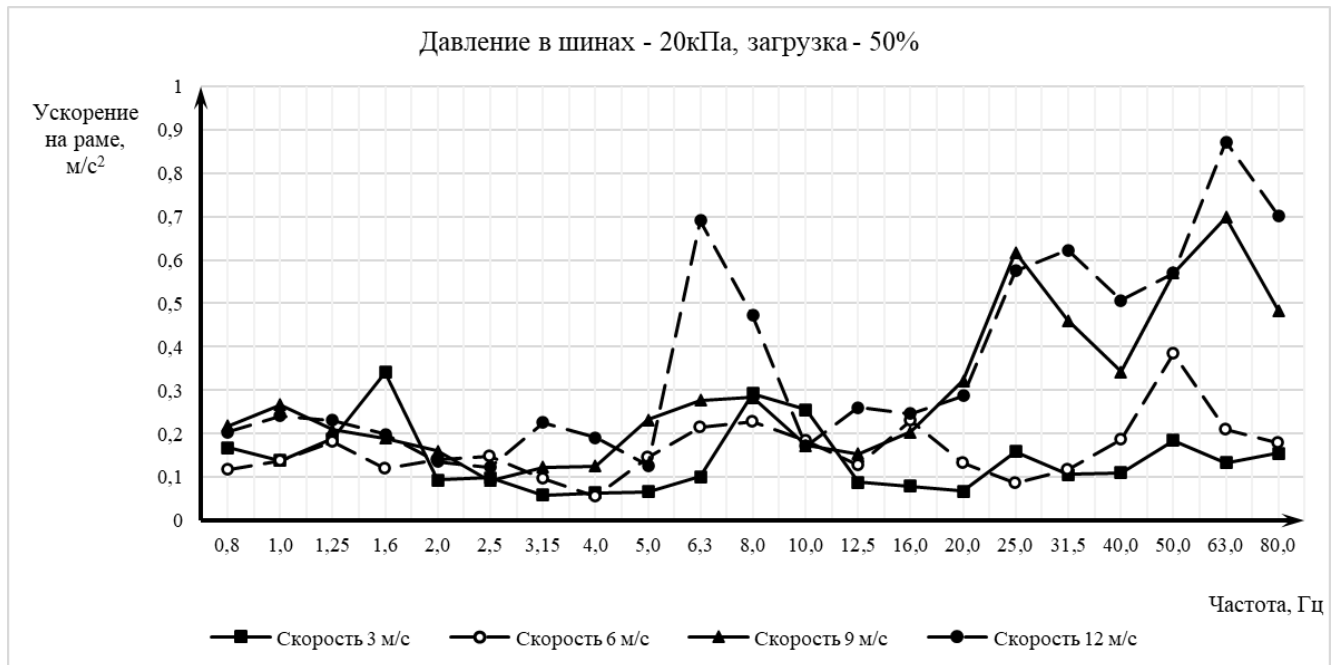


Рисунок 17 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 18 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,180649	0,121171	0,129472	0,276192
1	0,224309	0,168183	0,188619	0,216447
1,25	0,231101	0,290721	0,203636	0,199706
1,6	0,412159	0,160426	0,172653	0,197562
2	0,219026	0,178871	0,116679	0,123259
2,5	0,156342	0,17703	0,138715	0,090295
3,15	0,168713	0,12499	0,136221	0,204983
4	0,101465	0,090376	0,125309	0,173561
5	0,089621	0,187183	0,230168	0,126403
6,3	0,100045	0,338753	0,328747	0,714985
8	0,206929	0,206185	0,608569	0,767638
10	0,198869	0,184177	0,240791	0,312692
12,5	0,098026	0,133232	0,301416	0,448495
16	0,090838	0,199796	0,248567	0,597809
20	0,090119	0,174265	0,26476	0,344282
25	0,105261	0,168865	0,488357	0,498042
31,5	0,101785	0,162385	0,506019	0,601585
40	0,096149	0,257711	0,465483	0,758373
50	0,123982	0,431054	0,686006	0,918514
63	0,130309	0,322983	0,998095	1,302998
80	0,133733	0,225692	0,697517	1,041305

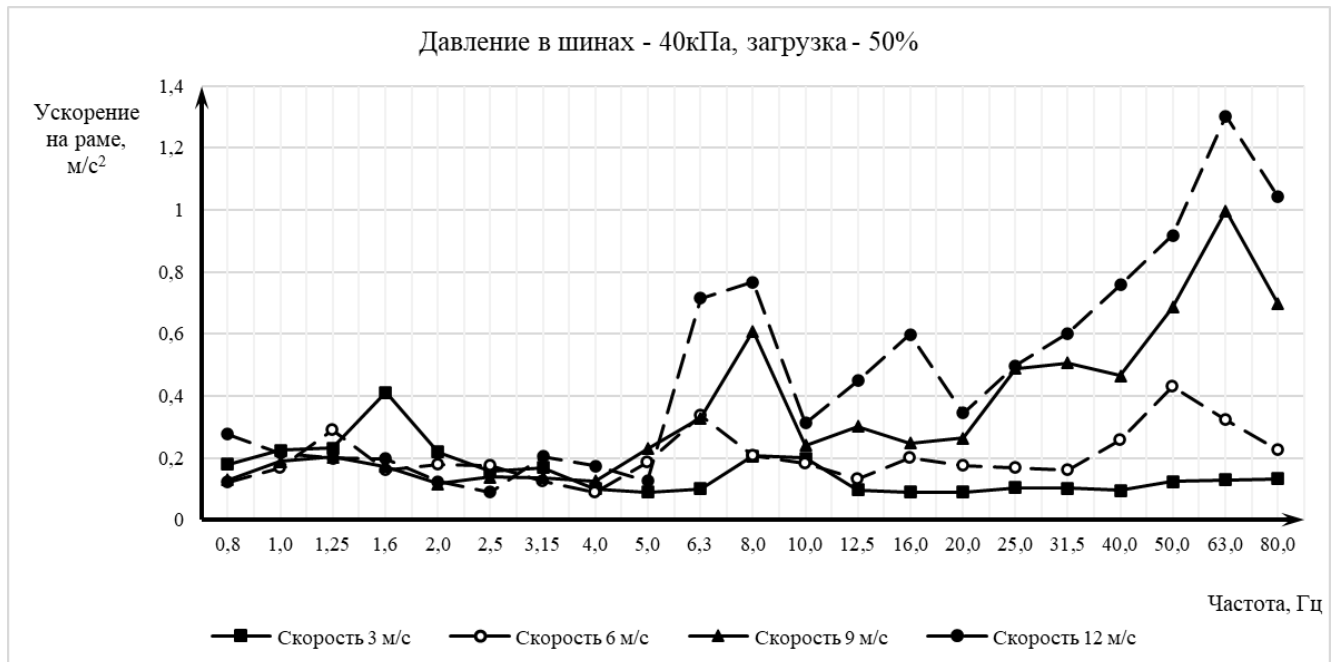


Рисунок 18 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 19 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,221071	0,215573	0,39644	0,47379
1	0,257981	0,243514	0,395786	0,616096
1,25	0,318941	0,267152	0,352586	0,353857
1,6	0,443149	0,249949	0,315092	0,29414
2	0,213739	0,179758	0,215088	0,368142
2,5	0,223604	0,181872	0,294361	0,321389
3,15	0,122559	0,128293	0,200726	0,30629
4	0,126745	0,075361	0,201691	0,2476
5	0,112336	0,138362	0,274417	0,289938
6,3	0,115964	0,324293	0,409794	0,964228
8	0,320715	0,274705	0,755763	0,902951
10	0,212588	0,198542	0,280868	0,718208
12,5	0,074452	0,140115	0,432128	0,683543
16	0,075497	0,178549	0,507462	0,864019
20	0,095832	0,166827	0,3814	0,677422
25	0,145161	0,186008	0,594681	0,718531
31,5	0,117451	0,234803	0,658005	0,914393
40	0,104553	0,227219	0,680374	1,06355
50	0,147044	0,369469	0,808504	1,291033
63	0,145881	0,569101	1,420343	1,735114
80	0,131447	0,402427	0,967993	1,265738

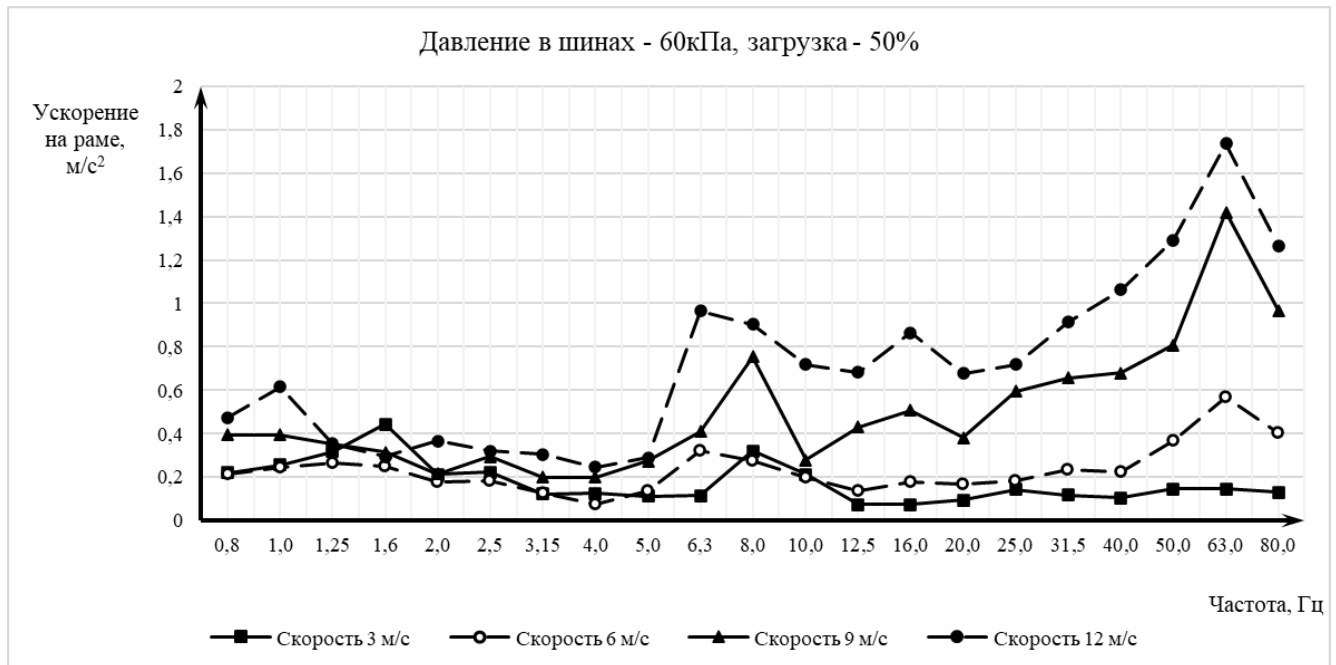


Рисунок 19 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 20 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,24155	0,055906	0,318655	0,702238
1	0,222868	0,046555	0,259806	0,705721
1,25	0,185507	0,053592	0,274953	0,723069
1,6	0,310032	0,103245	0,306841	0,745858
2	0,540959	0,119225	0,334363	0,784389
2,5	0,349272	0,139549	0,262271	0,736525
3,15	0,234486	0,11045	0,166003	0,663552
4	0,135407	0,074956	0,176632	0,538822
5	0,177588	0,152545	0,405698	0,687551
6,3	0,164517	0,386291	0,514432	1,152707
8	0,322983	0,335719	0,976007	1,354068
10	0,119655	0,254715	0,492473	0,826395
12,5	0,081973	0,272859	0,652602	0,684773
16	0,080151	0,335569	0,824538	1,29627
20	0,10693	0,258059	0,485874	0,801866
25	0,123259	0,197029	0,670753	0,997754
31,5	0,102643	0,352111	0,724371	1,117989
40	0,087852	0,328698	1,002251	1,181574
50	0,097689	0,450719	1,139307	1,319206
63	0,096163	0,788945	1,844013	2,11878
80	0,183185	0,503899	1,010852	1,378647

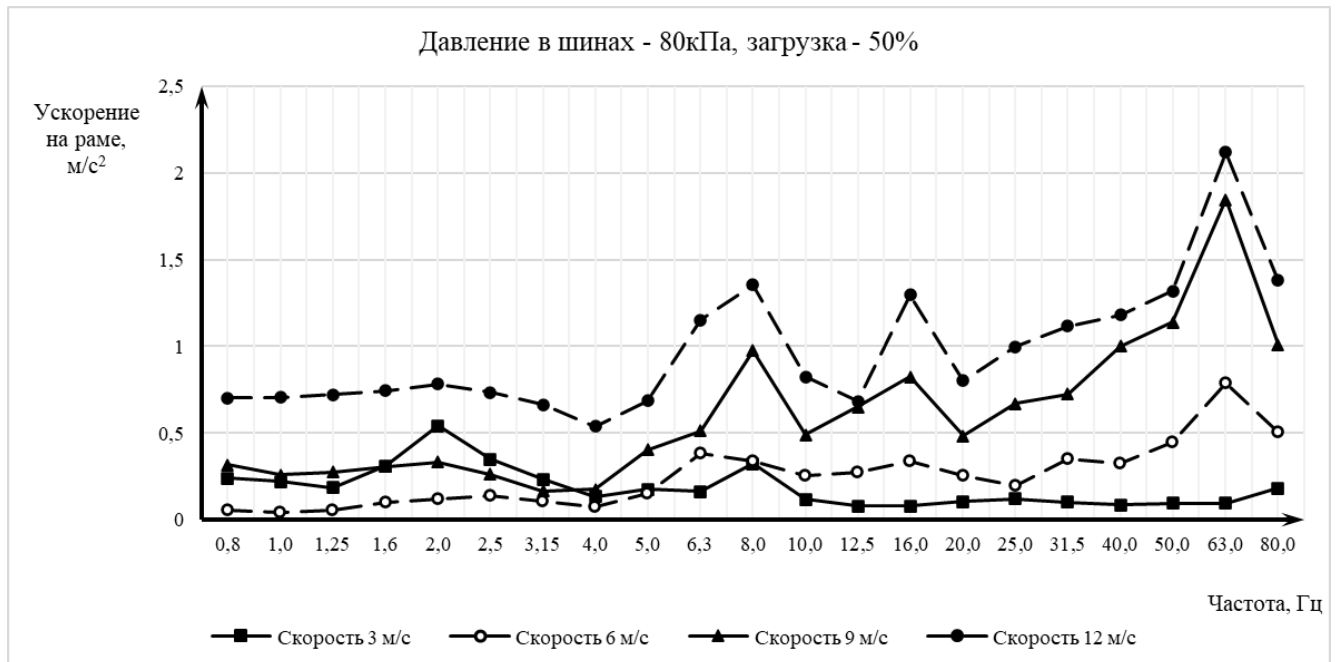


Рисунок 20 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 21 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,090756	0,091152	0,067469	0,096077
1	0,080778	0,069169	0,105735	0,095431
1,25	0,120158	0,051351	0,094491	0,105498
1,6	0,091384	0,087026	0,126063	0,122651
2	0,161028	0,130543	0,196675	0,110947
2,5	0,153762	0,096756	0,306841	0,172627
3,15	0,099447	0,069668	0,24838	0,200245
4	0,080935	0,069972	0,087379	0,095259
5	0,088367	0,099209	0,200065	0,139926
6,3	0,155664	0,179085	0,285795	0,558561
8	0,286653	0,250062	0,271268	0,401704
10	0,251339	0,243477	0,255978	0,256209
12,5	0,094364	0,16469	0,181463	0,238635
16	0,110765	0,309335	0,330328	0,288248
20	0,08438	0,178015	0,322838	0,288507
25	0,140683	0,122651	0,274212	0,309753
31,5	0,121571	0,173223	0,178469	0,481956
40	0,079839	0,161415	0,154617	0,388905
50	0,171184	0,265117	0,293348	0,464716
63	0,102781	0,213706	0,595973	0,684956
80	0,250024	0,30205	0,386638	0,499387

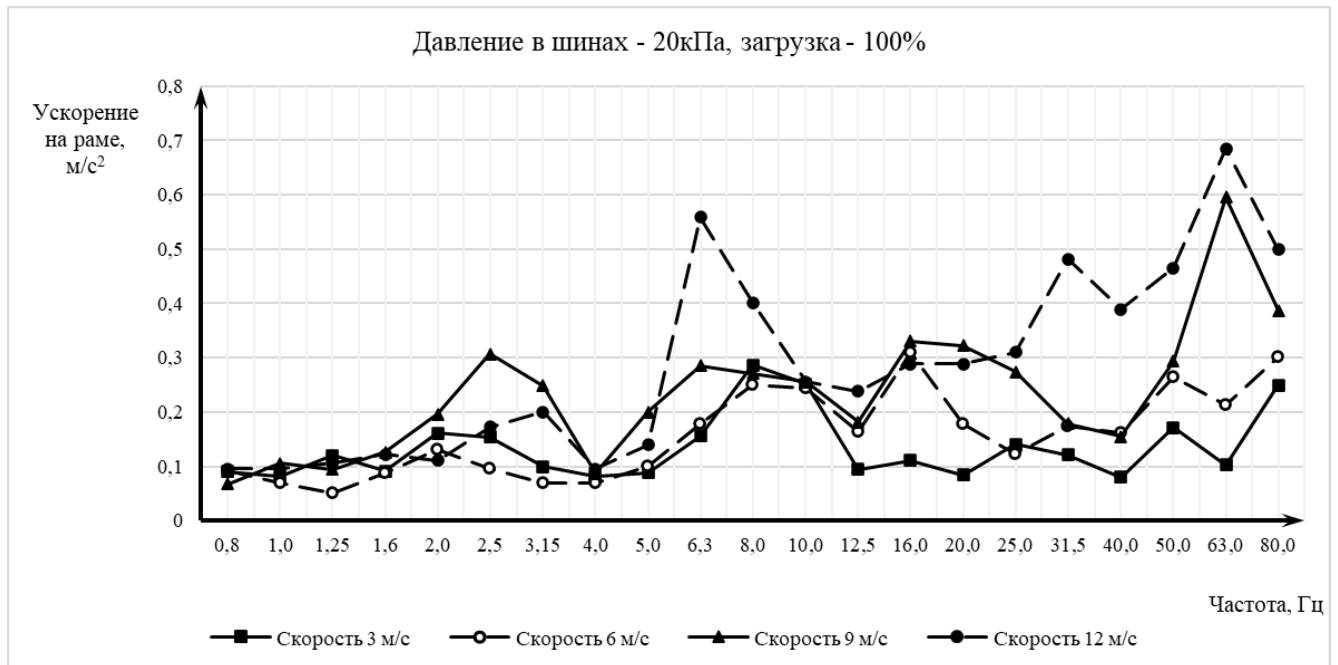


Рисунок 21 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 22 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,241659	0,144336	0,076729	0,113879
1	0,210685	0,102044	0,076902	0,142851
1,25	0,164739	0,122762	0,094491	0,177349
1,6	0,236179	0,158561	0,116312	0,139048
2	0,275919	0,14564	0,145575	0,119493
2,5	0,236924	0,104553	0,22347	0,137865
3,15	0,239711	0,126916	0,143237	0,203697
4	0,149086	0,079148	0,083837	0,115478
5	0,120248	0,208235	0,269323	0,145509
6,3	0,147552	0,23928	0,421886	0,631525
8	0,288803	0,355753	0,492031	0,693139
10	0,105308	0,255403	0,304779	0,341353
12,5	0,063409	0,132873	0,227833	0,400802
16	0,045316	0,136507	0,25085	0,716272
20	0,063096	0,144466	0,264284	0,471876
25	0,089487	0,110201	0,30519	0,70287
31,5	0,108627	0,140683	0,411209	0,773877
40	0,112101	0,171775	0,569467	0,811662
50	0,087418	0,166153	0,666843	0,870259
63	0,067045	0,21801	0,874927	1,106003
80	0,072339	0,206	0,53208	0,87261

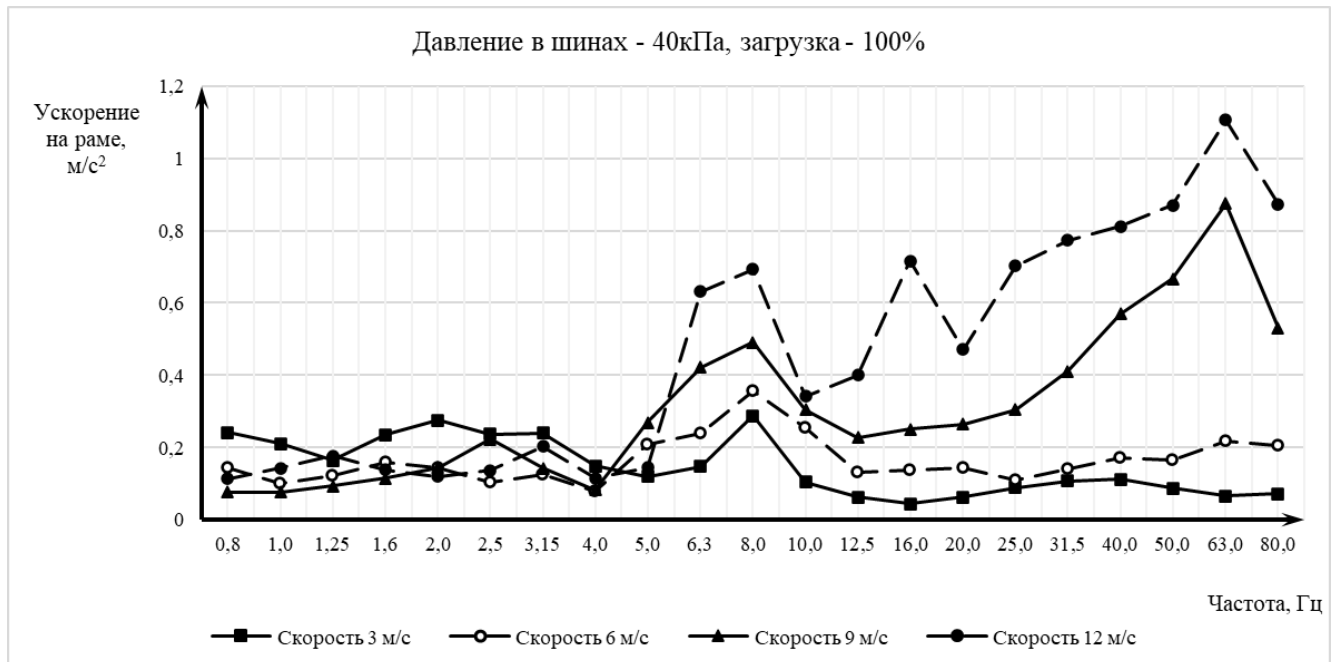


Рисунок 22 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 23 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,183021	0,121991	0,120844	0,142274
1	0,144726	0,293348	0,227424	0,2807
1,25	0,272123	0,31045	0,174658	0,307809
1,6	0,366128	0,103198	0,233329	0,449101
2	0,177748	0,17224	0,134194	0,236605
2,5	0,192043	0,19187	0,16841	0,074653
3,15	0,087931	0,09496	0,155384	0,264165
4	0,076111	0,073852	0,098527	0,121171
5	0,07121	0,108969	0,193343	0,094534
6,3	0,14922	0,27078	0,327076	0,472939
8	0,273596	0,446154	0,68385	0,599694
10	0,236605	0,261211	0,23512	0,49849
12,5	0,101998	0,127087	0,472726	0,565893
16	0,109559	0,243295	0,684158	1,230933
20	0,104553	0,233854	0,332863	0,536646
25	0,090702	0,140052	0,552564	1,069305
31,5	0,055856	0,19509	0,564368	1,024582
40	0,070826	0,226505	0,832737	1,041305
50	0,121717	0,296531	0,833861	1,142385
63	0,124541	0,332863	1,312889	1,666935
80	0,084481	0,250062	1,039434	1,284663

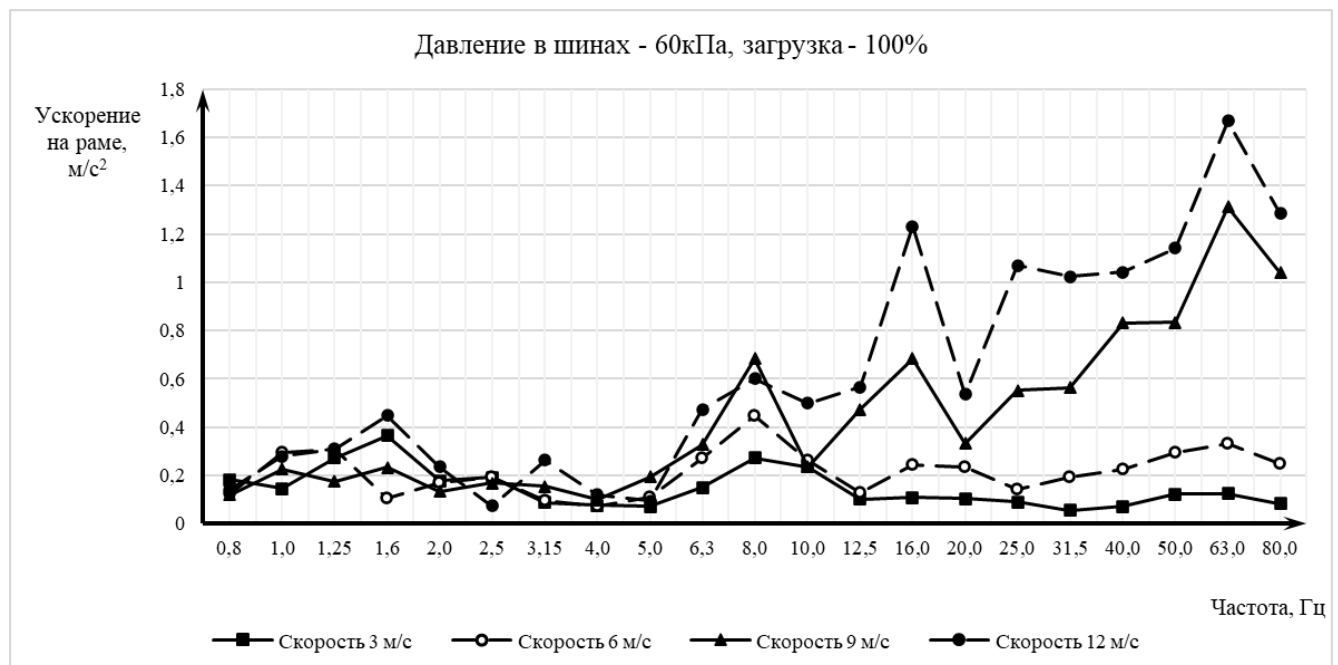


Рисунок 23 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 24 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапециевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,279189	0,125271	0,191181	0,347288
1	0,294405	0,192129	0,244062	0,28946
1,25	0,344695	0,328402	0,254181	0,313537
1,6	0,454655	0,147818	0,229754	0,26
2	0,26176	0,132933	0,135184	0,19771
2,5	0,200396	0,175524	0,176288	0,167906
3,15	0,160065	0,108091	0,127106	0,223805
4	0,125365	0,094152	0,12267	0,109182
5	0,108042	0,127087	0,218566	0,139821
6,3	0,172291	0,548109	0,352164	0,473435
8	0,328599	0,474857	0,674382	0,805601
10	0,216188	0,268356	0,37264	0,545568
12,5	0,094293	0,330625	0,618317	0,611312
16	0,097953	0,282981	0,889516	1,39152
20	0,100828	0,429931	0,463186	0,593523
25	0,108953	0,373143	0,823674	1,01252
31,5	0,130211	0,360442	0,75147	1,081233
40	0,11002	0,416045	0,950451	1,198701
50	0,144683	0,50891	1,172927	1,448781
63	0,182664	0,749816	1,700394	2,049038
80	0,161972	0,501638	1,120506	1,424232

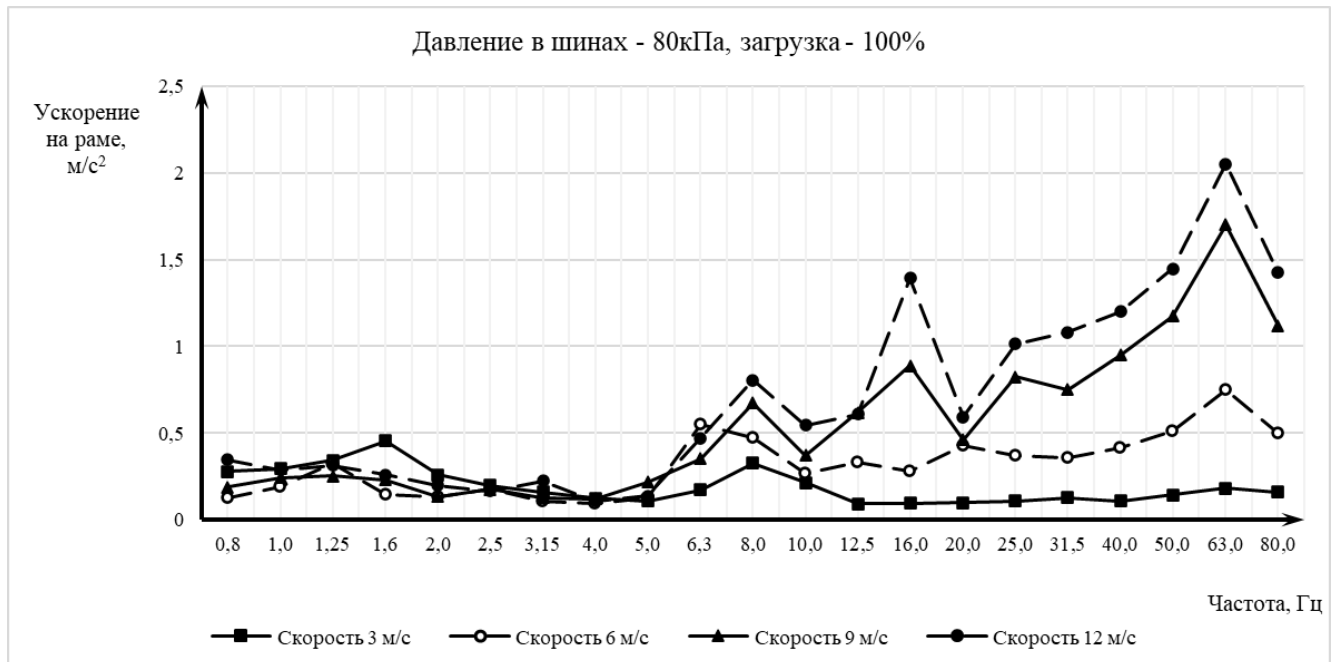


Рисунок 24 – Среднеквадратичные ускорения на раме при проезде единичной трапециевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 25 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,259922	0,188365	0,198363	0,195958
1	0,446796	0,276358	0,317796	0,261634
1,25	0,337233	0,302503	0,278938	0,295298
1,6	0,387857	0,205322	0,211539	0,270333
2	0,422456	0,274376	0,177828	0,240575
2,5	0,238313	0,365941	0,189555	0,178266
3,15	0,191784	0,227322	0,305327	0,225492
4	0,113777	0,274994	0,225084	0,298229
5	0,103757	0,20151	0,186594	0,200689
6,3	0,079612	0,198125	0,250963	0,216179
8	0,100541	0,142487	0,150501	0,146955
10	0,120844	0,114771	0,108042	0,121319
12,5	0,050164	0,09744	0,117786	0,138704
16	0,051791	0,140094	0,124038	0,139473
20	0,10104	0,169728	0,170084	0,152612
25	0,117205	0,101937	0,165482	0,185313
31,5	0,071466	0,072307	0,107654	0,137311
40	0,02902	0,062185	0,061195	0,075451
50	0,021713	0,053041	0,056488	0,047416
63	0,025141	0,105577	0,088765	0,107736
80	0,036174	0,107541	0,094534	0,090299

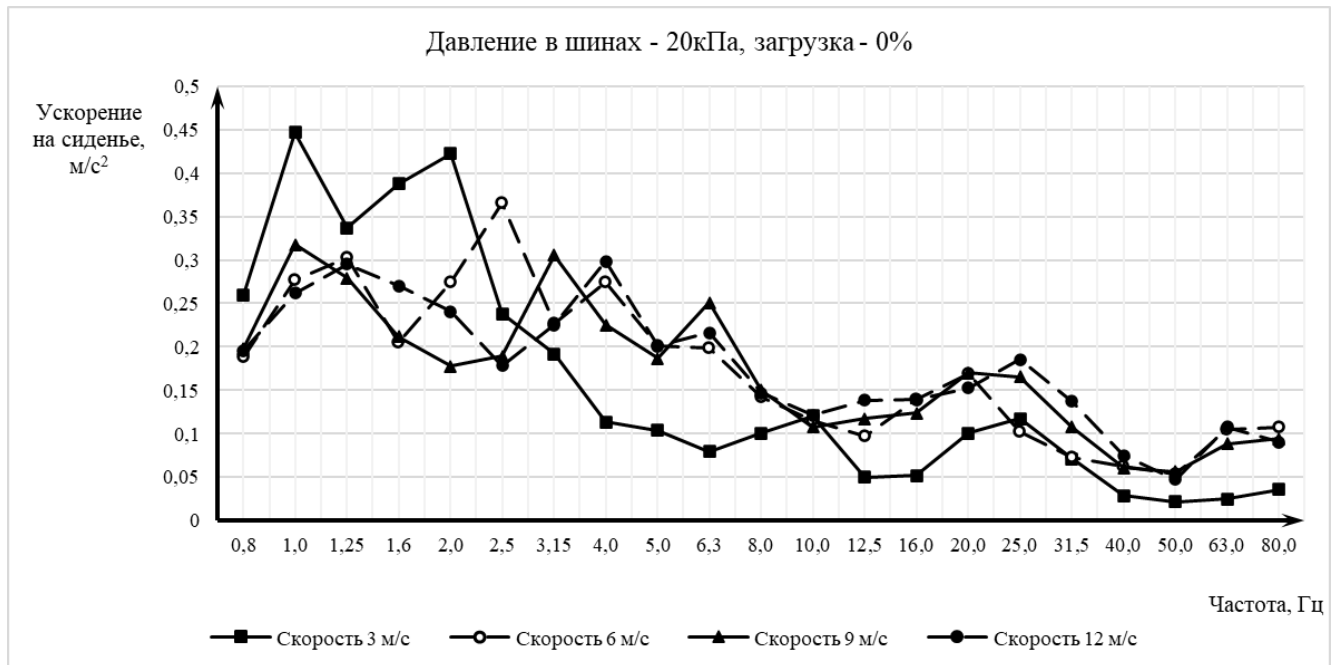


Рисунок 25 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 26 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,270699	0,204707	0,27752	0,266658
1	0,334514	0,314667	0,379347	0,289793
1,25	0,266592	0,445079	0,329883	0,321605
1,6	0,418673	0,360929	0,280868	0,318411
2	0,621383	0,43148	0,284257	0,338893
2,5	0,305236	0,542225	0,244868	0,277218
3,15	0,268034	0,396677	0,296353	0,296868
4	0,140578	0,414738	0,253991	0,357903
5	0,138237	0,229892	0,251038	0,325937
6,3	0,120754	0,3432	0,36359	0,328294
8	0,092445	0,31751	0,234275	0,241998
10	0,10848	0,195705	0,200726	0,220165
12,5	0,077585	0,142018	0,129938	0,12396
16	0,0597	0,184094	0,224814	0,22206
20	0,080054	0,178629	0,194622	0,251342
25	0,057358	0,174265	0,201088	0,170376
31,5	0,062982	0,101358	0,135936	0,172187
40	0,039835	0,098749	0,072459	0,09585
50	0,028192	0,116469	0,064078	0,087366
63	0,033977	0,205907	0,133172	0,100329
80	0,042252	0,173639	0,110235	0,140672

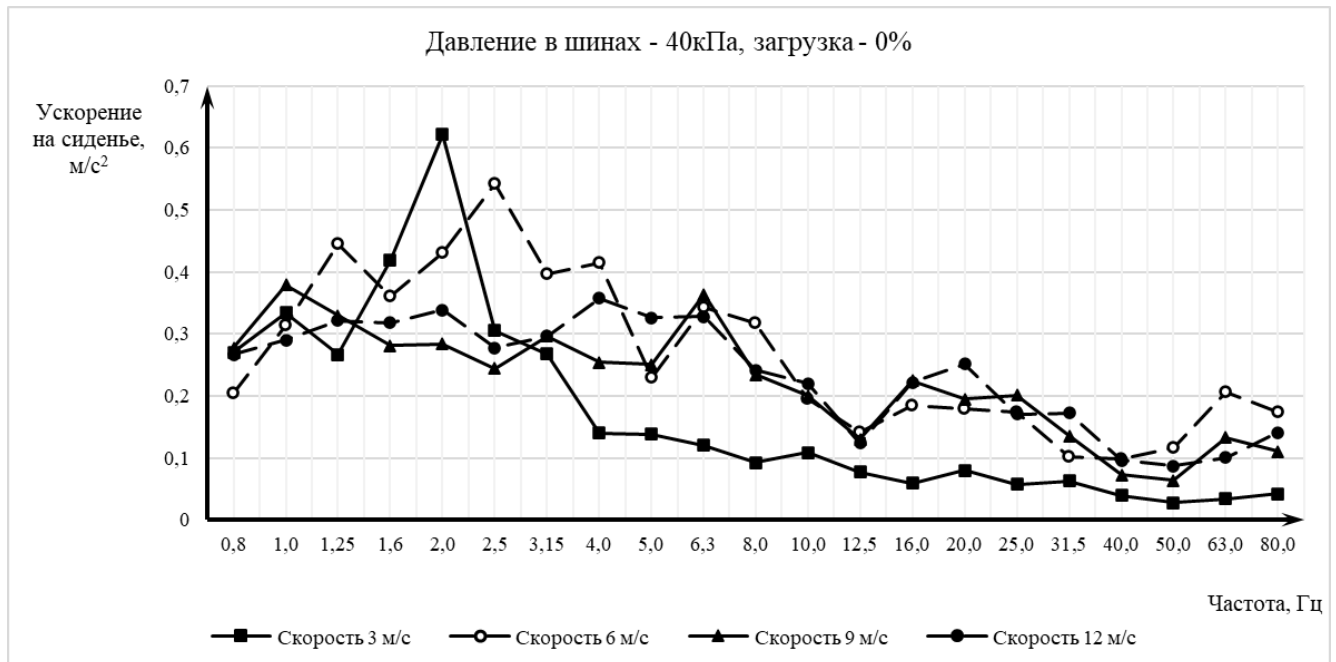


Рисунок 26 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 27 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,214895	0,206031	0,215282	0,212655
1	0,376176	0,351426	0,324439	0,336408
1,25	0,312271	0,474359	0,402427	0,299075
1,6	0,39472	0,441955	0,31694	0,363912
2	0,66049	0,348279	0,399362	0,347857
2,5	0,346768	0,596109	0,239172	0,281593
3,15	0,255288	0,489896	0,432116	0,31648
4	0,147022	0,31618	0,311709	0,408602
5	0,123259	0,196028	0,225185	0,272053
6,3	0,120953	0,273596	0,284257	0,244493
8	0,110947	0,39763	0,258756	0,283181
10	0,133592	0,206742	0,269202	0,305056
12,5	0,110898	0,142765	0,169017	0,200042
16	0,069158	0,195295	0,352586	0,283621
20	0,061306	0,166377	0,19881	0,199872
25	0,10564	0,146978	0,190495	0,239994
31,5	0,049447	0,109002	0,160498	0,206435
40	0,049961	0,086247	0,096553	0,120082
50	0,02752	0,10145	0,125553	0,146976
63	0,033952	0,197384	0,273104	0,301124
80	0,041251	0,181736	0,203789	0,194063

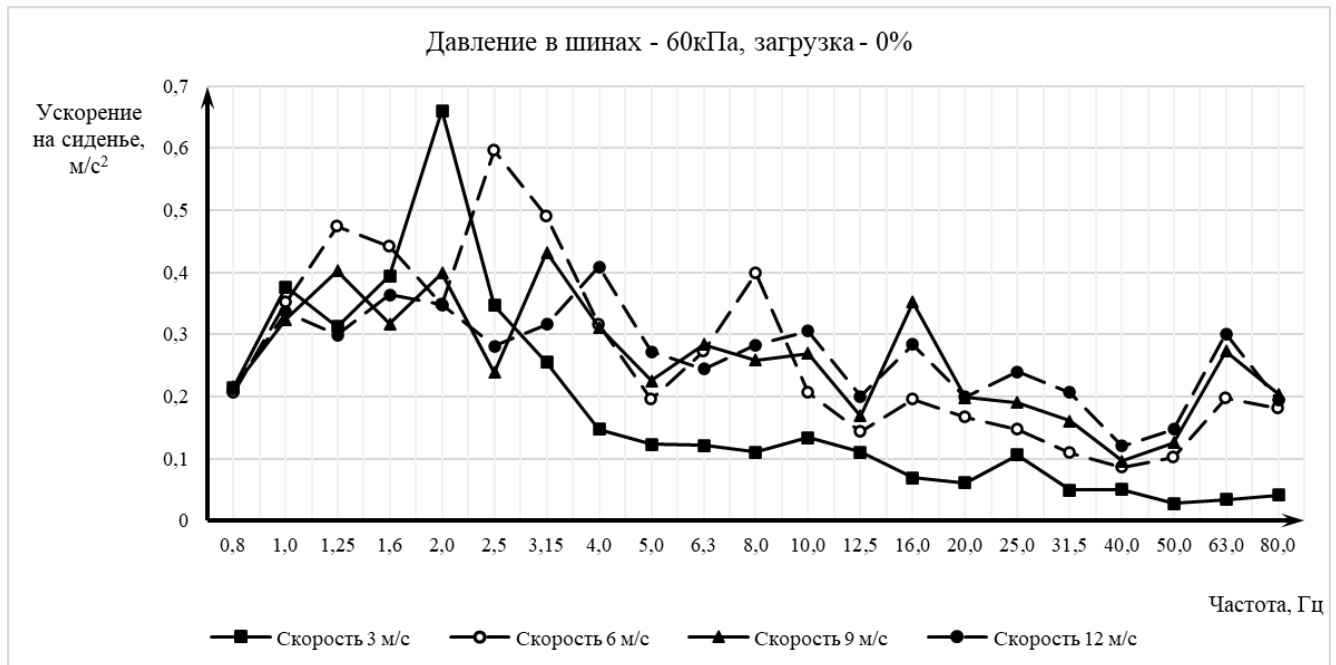


Рисунок 27 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 28 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,167328	0,195969	0,233294	0,251253
1	0,398227	0,302457	0,277603	0,238838
1,25	0,236109	0,450314	0,389022	0,379135
1,6	0,685595	0,440698	0,33693	0,429353
2	0,661962	0,363699	0,42813	0,407772
2,5	0,499537	0,660696	0,324244	0,368113
3,15	0,321823	0,574871	0,505034	0,423634
4	0,243404	0,384903	0,316275	0,472895
5	0,204615	0,258059	0,306106	0,399094
6,3	0,107412	0,297734	0,319755	0,362585
8	0,106052	0,45787	0,342583	0,394648
10	0,104757	0,269687	0,319181	0,352862
12,5	0,083988	0,133053	0,230617	0,219502
16	0,073234	0,240142	0,331966	0,327773
20	0,08577	0,163338	0,180487	0,232718
25	0,061795	0,121171	0,25217	0,189432
31,5	0,034033	0,092515	0,186622	0,237894
40	0,026683	0,116103	0,139382	0,187418
50	0,024003	0,103105	0,182336	0,136336
63	0,032791	0,190923	0,351215	0,258511
80	0,034964	0,178629	0,249163	0,228987

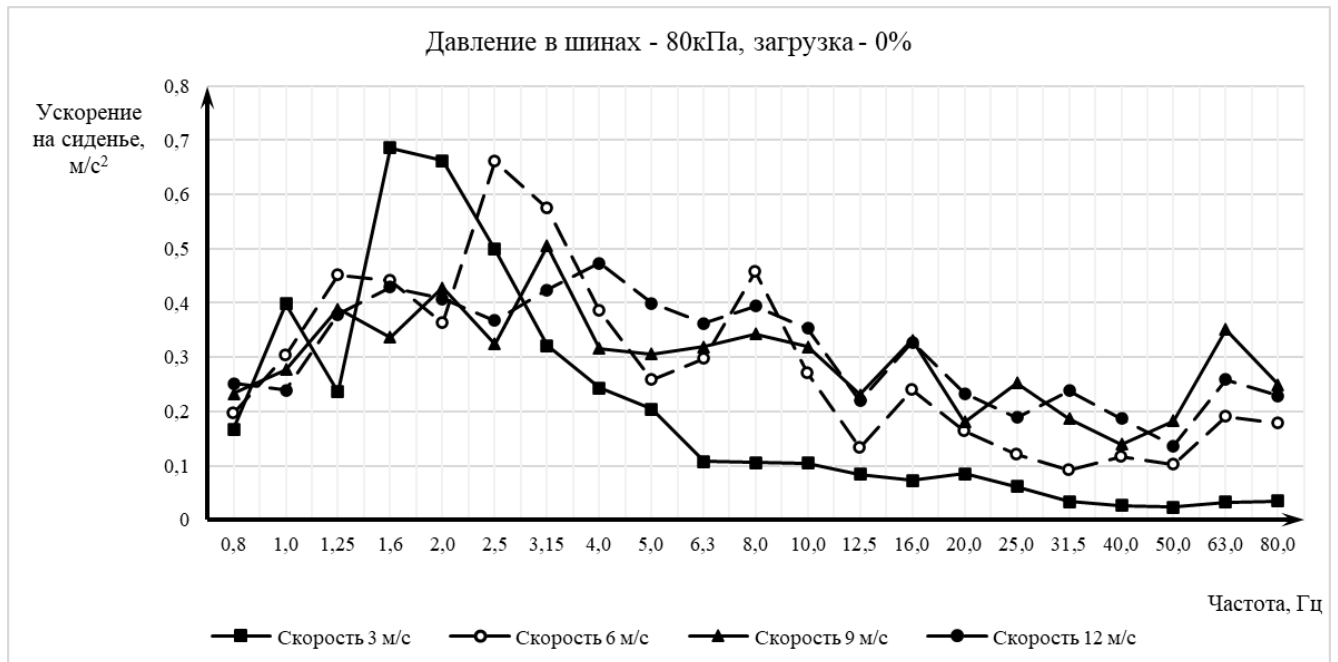


Рисунок 28 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 29 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,188015	0,175136	0,163223	0,151752
1	0,361814	0,297729	0,254245	0,233207
1,25	0,211376	0,244279	0,199278	0,197936
1,6	0,318746	0,218138	0,198593	0,237954
2	0,360117	0,311048	0,173171	0,219878
2,5	0,151289	0,294556	0,136831	0,121421
3,15	0,124189	0,186736	0,220326	0,154299
4	0,095269	0,292582	0,211241	0,24458
5	0,080406	0,196611	0,161217	0,162953
6,3	0,056206	0,173314	0,19351	0,157307
8	0,074543	0,132703	0,124387	0,114492
10	0,095488	0,114737	0,096135	0,101663
12,5	0,041206	0,099664	0,10715	0,118719
16	0,041628	0,140052	0,110214	0,11663
20	0,072421	0,152331	0,135393	0,114709
25	0,096984	0,106694	0,153721	0,161812
31,5	0,060927	0,07728	0,102582	0,123122
40	0,024811	0,065677	0,057819	0,067284
50	0,015347	0,045079	0,043039	0,034402
63	0,02133	0,110519	0,082772	0,094646
80	0,027261	0,099176	0,077831	0,070284

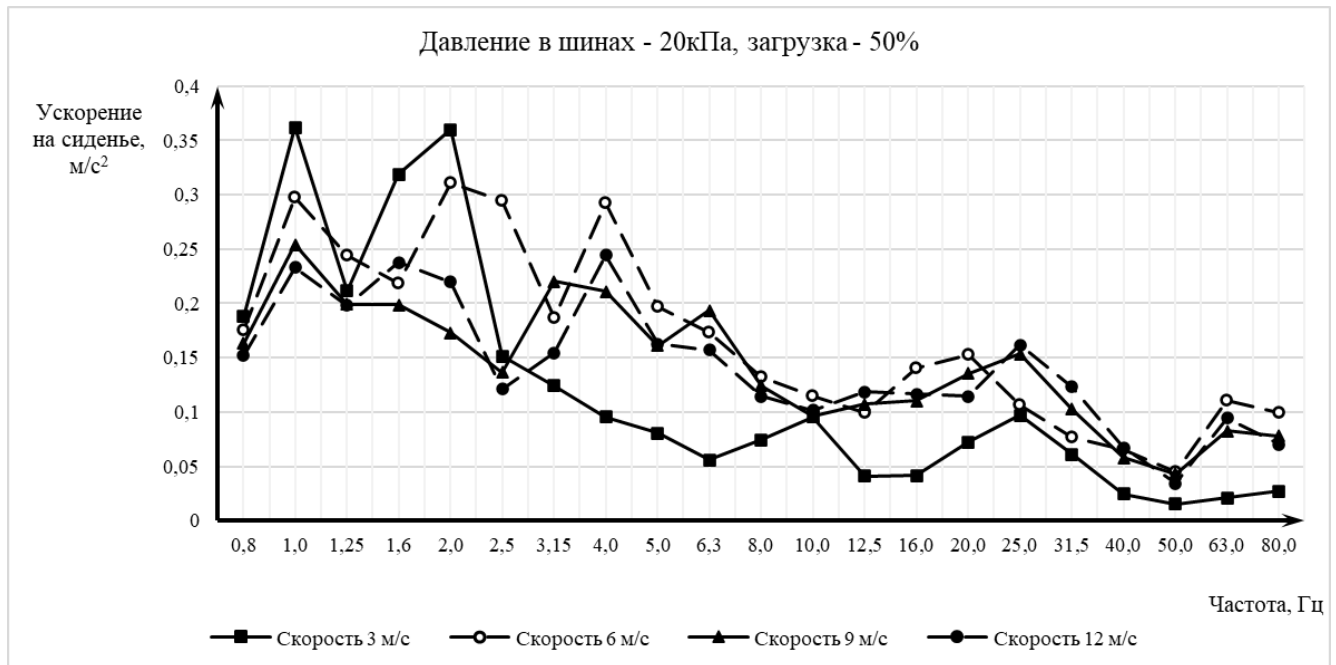


Рисунок 29 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 30 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,21868	0,166159	0,238633	0,21547
1	0,240681	0,22676	0,289987	0,209281
1,25	0,205122	0,338792	0,269245	0,246478
1,6	0,390912	0,337262	0,280077	0,297729
2	0,528183	0,363846	0,256749	0,28668
2,5	0,255383	0,47174	0,218749	0,232257
3,15	0,201218	0,295127	0,236354	0,222343
4	0,121708	0,354374	0,232453	0,307823
5	0,123945	0,205159	0,238369	0,289937
6,3	0,105946	0,297618	0,318645	0,253859
8	0,066492	0,220393	0,174413	0,169297
10	0,095292	0,170782	0,18624	0,191874
12,5	0,06059	0,109446	0,106404	0,095815
16	0,0474	0,142751	0,184618	0,171515
20	0,07214	0,159783	0,184996	0,224117
25	0,040501	0,118782	0,144927	0,116214
31,5	0,056269	0,090116	0,127908	0,152262
40	0,036886	0,090839	0,070701	0,088192
50	0,020157	0,079496	0,047104	0,060196
63	0,024644	0,141292	0,09818	0,070386
80	0,038702	0,157208	0,106239	0,127581

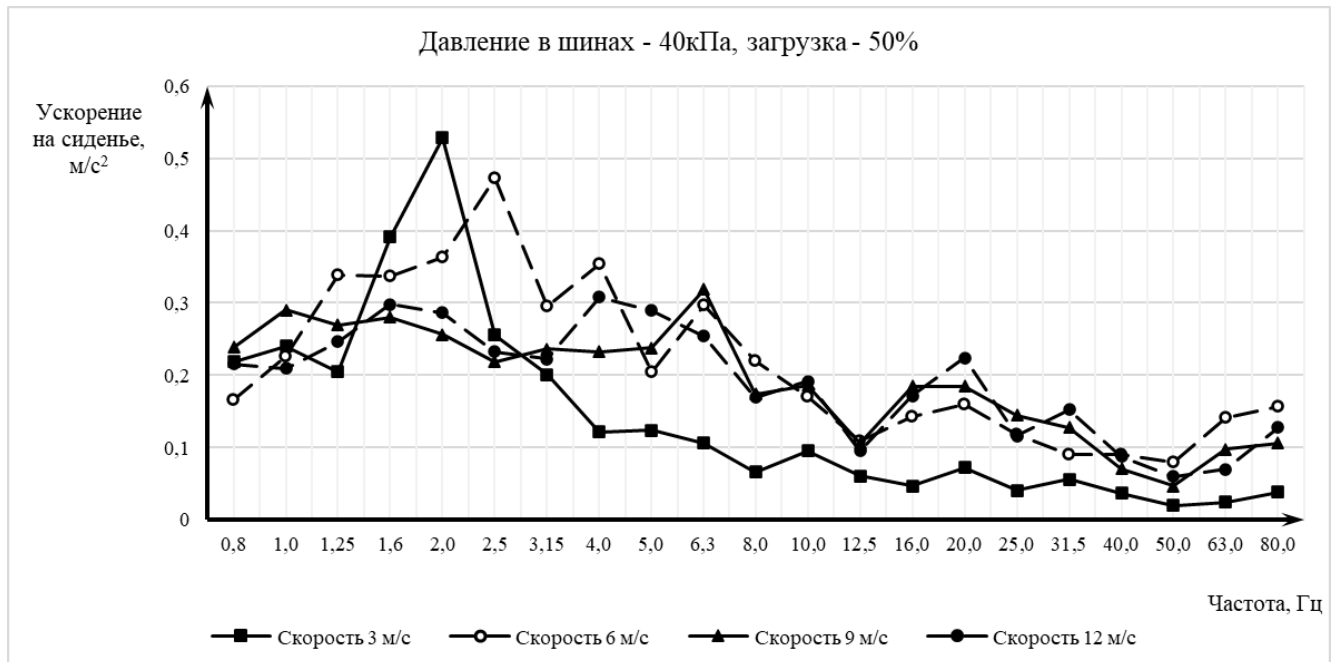


Рисунок 30 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 31 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,166095	0,165338	0,166388	0,168479
1	0,309886	0,30117	0,267864	0,284787
1,25	0,208942	0,32558	0,267105	0,205442
1,6	0,324926	0,377705	0,261765	0,307753
2	0,594435	0,330016	0,363665	0,325385
2,5	0,231253	0,548422	0,227973	0,193781
3,15	0,174021	0,340287	0,380252	0,219748
4	0,130219	0,288736	0,273977	0,367764
5	0,100919	0,165179	0,182484	0,225341
6,3	0,089347	0,205405	0,205385	0,181773
8	0,08695	0,315343	0,199218	0,223138
10	0,111785	0,178317	0,222887	0,258576
12,5	0,095199	0,126608	0,144289	0,174639
16	0,058447	0,168559	0,290738	0,240637
20	0,047096	0,129362	0,148491	0,152938
25	0,092824	0,13339	0,166285	0,214243
31,5	0,044757	0,101454	0,143706	0,189029
40	0,044741	0,079497	0,085886	0,109125
50	0,020293	0,074462	0,088488	0,105559
63	0,030214	0,178706	0,237438	0,268256
80	0,032664	0,144441	0,155808	0,152186

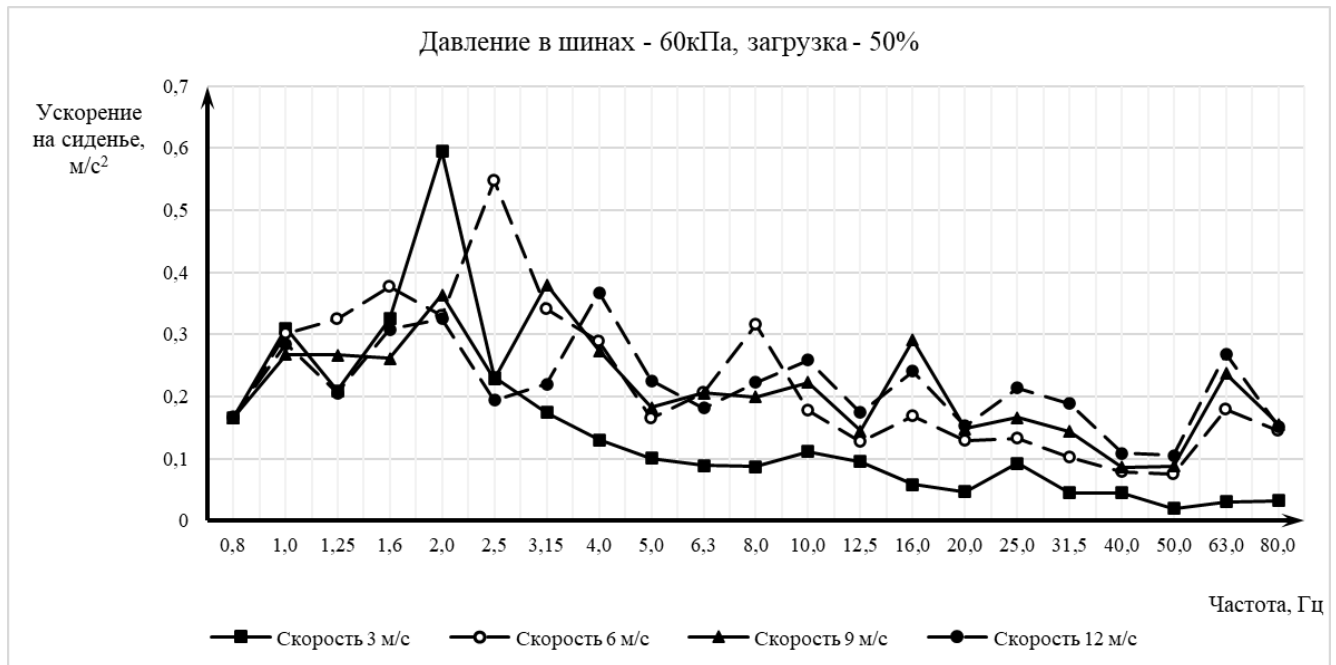


Рисунок 31 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 32 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,125576	0,150099	0,171585	0,173432
1	0,367937	0,287144	0,253826	0,205376
1,25	0,270352	0,370561	0,308698	0,282303
1,6	0,553068	0,367448	0,271431	0,322857
2	0,630753	0,353855	0,400338	0,357287
2,5	0,351344	0,473598	0,227838	0,241939
3,15	0,301476	0,58141	0,469675	0,366363
4	0,236867	0,384068	0,303683	0,430325
5	0,145635	0,187037	0,212776	0,258326
6,3	0,07963	0,220414	0,227592	0,241431
8	0,102221	0,451023	0,324761	0,350294
10	0,091141	0,23787	0,270533	0,280155
12,5	0,06626	0,106431	0,175963	0,157722
16	0,061228	0,201935	0,2675	0,24794
20	0,076494	0,148266	0,157835	0,190721
25	0,056509	0,112833	0,22515	0,159512
31,5	0,030953	0,085322	0,1651	0,197269
40	0,022221	0,096384	0,111356	0,140151
50	0,02234	0,097206	0,165239	0,116681
63	0,031401	0,186013	0,328752	0,227564
80	0,03279	0,169954	0,227998	0,197006



Рисунок 32 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 33 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,174539	0,153279	0,134357	0,117575
1	0,212152	0,262306	0,218639	0,181216
1,25	0,198494	0,215643	0,165484	0,154324
1,6	0,311159	0,217472	0,185755	0,208408
2	0,278745	0,247895	0,134322	0,15928
2,5	0,142313	0,286171	0,11428	0,095617
3,15	0,116939	0,185461	0,182684	0,120914
4	0,08882	0,254655	0,173181	0,210338
5	0,075881	0,173943	0,13431	0,127554
6,3	0,05314	0,153526	0,160766	0,123223
8	0,070375	0,117867	0,104038	0,090268
10	0,090034	0,102059	0,080723	0,080348
12,5	0,039021	0,088778	0,089824	0,093532
16	0,039418	0,124328	0,092353	0,091919
20	0,068382	0,135114	0,113096	0,090436
25	0,091438	0,094975	0,128158	0,126679
31,5	0,05758	0,069015	0,086052	0,096928
40	0,023556	0,058749	0,048927	0,053627
50	0,014607	0,040476	0,036585	0,027797
63	0,020267	0,098344	0,069662	0,074911
80	0,02587	0,088347	0,065564	0,055968

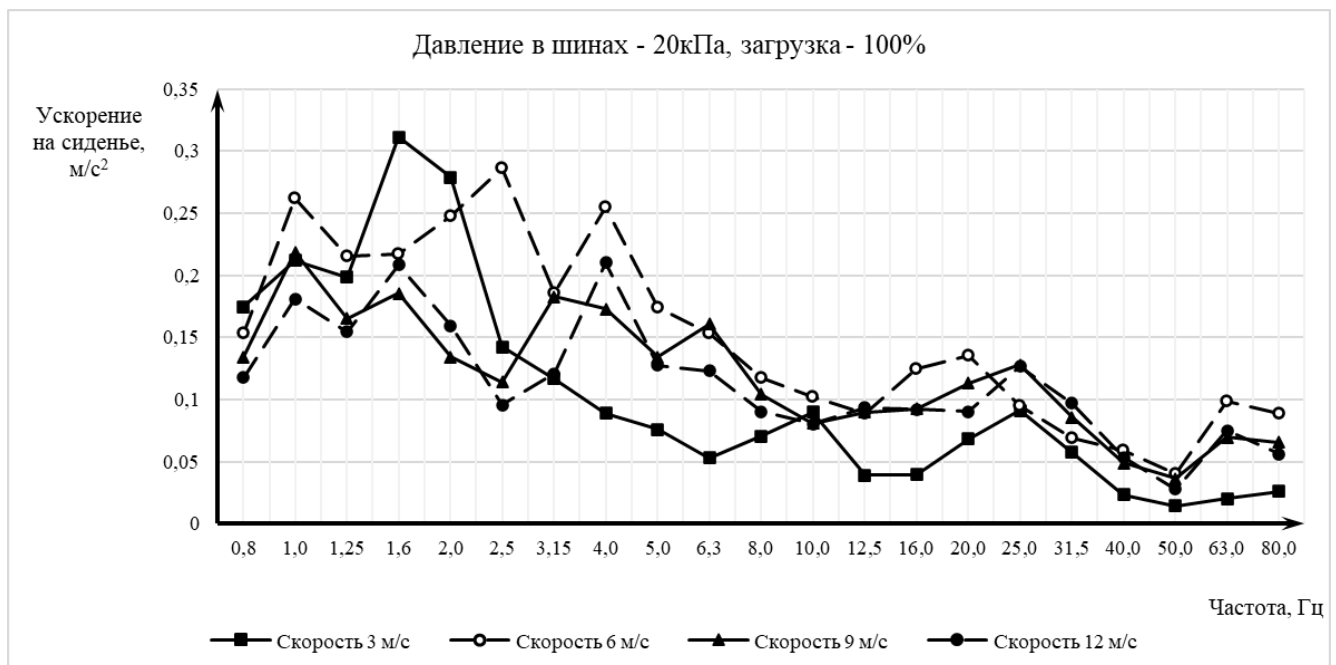


Рисунок 33 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 34 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,188407	0,168358	0,213351	0,181097
1	0,268409	0,298506	0,336975	0,227251
1,25	0,162419	0,314012	0,220341	0,18967
1,6	0,374759	0,383303	0,279462	0,278391
2	0,470076	0,34617	0,241018	0,25218
2,5	0,184966	0,339148	0,165112	0,164506
3,15	0,165258	0,357933	0,253156	0,223869
4	0,113191	0,429281	0,283598	0,286269
5	0,102725	0,198127	0,203058	0,231091
6,3	0,081277	0,262905	0,261038	0,208291
8	0,066376	0,259306	0,180746	0,164844
10	0,082953	0,173097	0,16693	0,161577
12,5	0,061113	0,128998	0,111312	0,094421
16	0,046287	0,162927	0,186642	0,162932
20	0,05585	0,142063	0,145437	0,164932
25	0,04645	0,161829	0,175426	0,131867
31,5	0,052018	0,096607	0,1219	0,136392
40	0,032822	0,09307	0,064643	0,075939
50	0,019155	0,08716	0,046075	0,055613
63	0,027794	0,191017	0,116714	0,078532
80	0,030714	0,141492	0,085426	0,096332

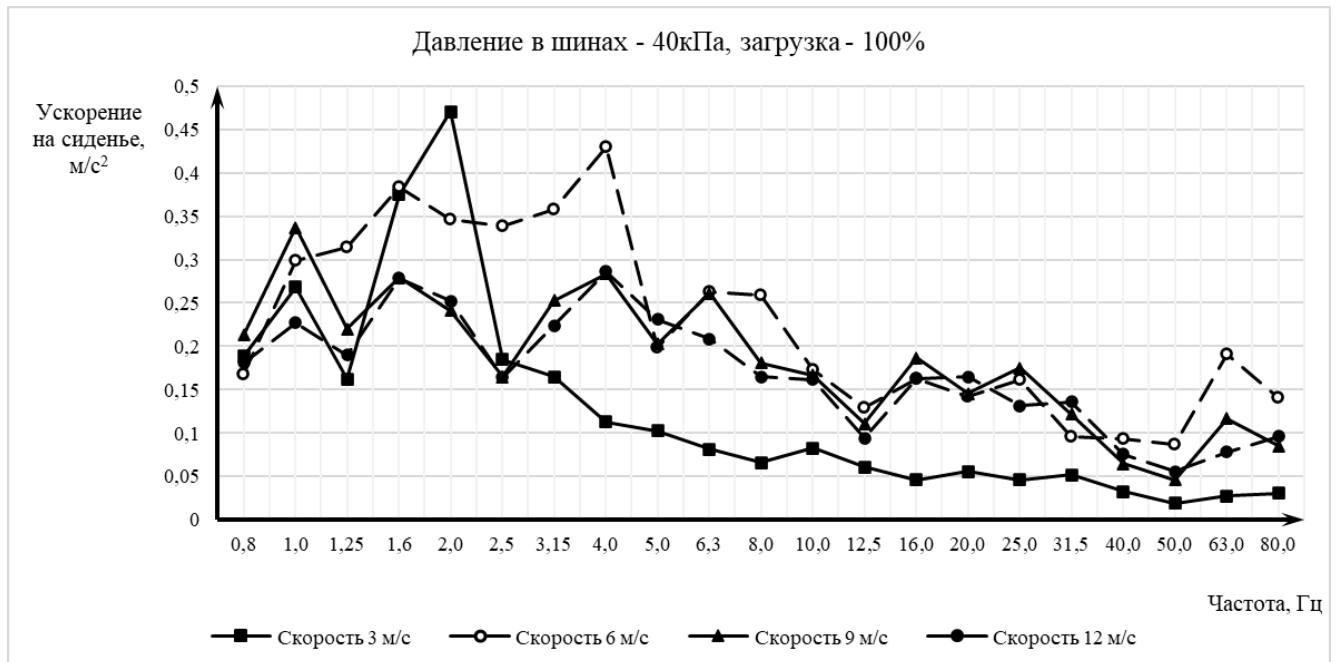


Рисунок 34 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 35 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,150852	0,153856	0,142195	0,130633
1	0,32588	0,324945	0,264067	0,253357
1,25	0,236522	0,38	0,240773	0,197432
1,6	0,392691	0,504552	0,297698	0,313601
2	0,552819	0,314058	0,315909	0,255391
2,5	0,231253	0,417284	0,21522	0,237981
3,15	0,224843	0,457931	0,342224	0,24162
4	0,134855	0,307512	0,26671	0,323635
5	0,083974	0,13969	0,141541	0,157659
6,3	0,084367	0,197989	0,1815	0,145813
8	0,10082	0,381657	0,21923	0,222048
10	0,109228	0,178404	0,204272	0,213947
12,5	0,082103	0,111388	0,116586	0,127634
16	0,05474	0,160738	0,253032	0,189854
20	0,051905	0,147398	0,155527	0,145248
25	0,090743	0,133466	0,152729	0,17779
31,5	0,042448	0,098094	0,12758	0,151679
40	0,03898	0,070327	0,070075	0,080769
50	0,024303	0,093456	0,102595	0,11146
63	0,030838	0,187611	0,228415	0,232971
80	0,036629	0,168723	0,167124	0,147956

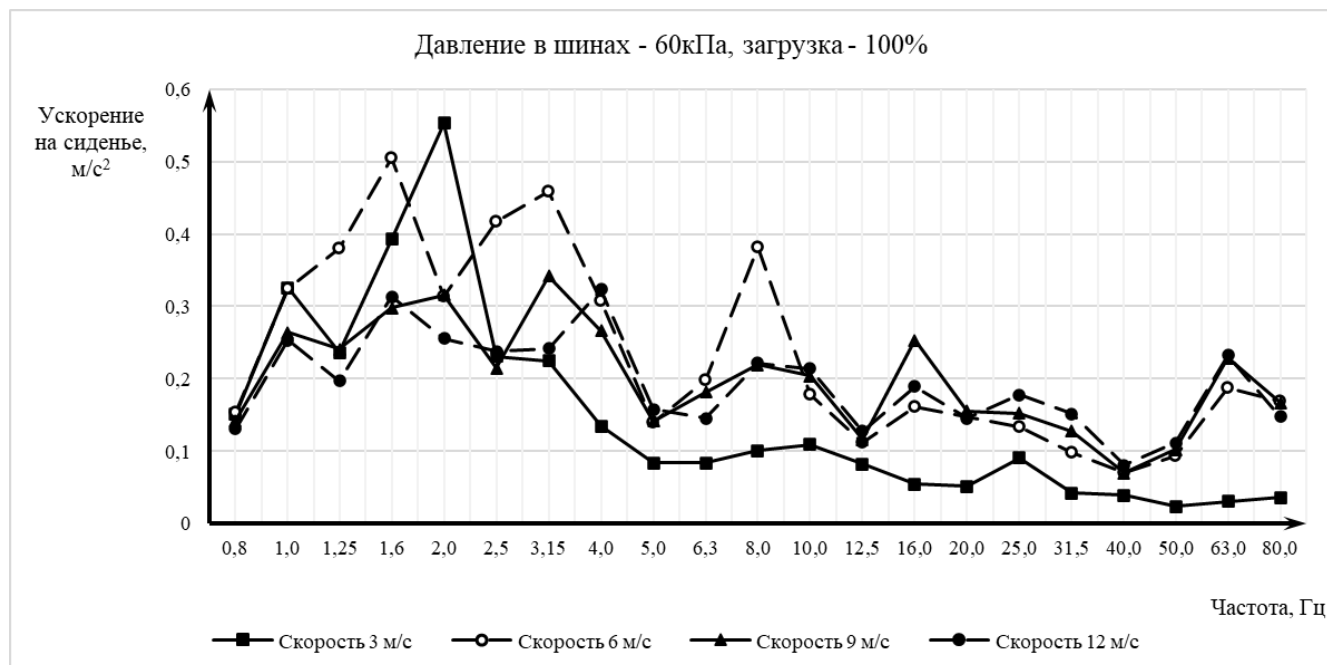


Рисунок 35 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 36 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,120798	0,161143	0,198547	0,190943
1	0,250919	0,220939	0,210956	0,163
1,25	0,180595	0,347178	0,312632	0,271572
1,6	0,484989	0,444263	0,353086	0,356315
2	0,592899	0,311368	0,380418	0,322439
2,5	0,363728	0,558153	0,285256	0,288
3,15	0,212013	0,429722	0,432108	0,295024
4	0,184729	0,333475	0,324268	0,387301
5	0,161539	0,232967	0,286733	0,331986
6,3	0,083955	0,261911	0,292073	0,294583
8	0,067746	0,318573	0,249571	0,255386
10	0,081922	0,237477	0,291552	0,286811
12,5	0,058471	0,1039	0,184727	0,157575
16	0,051767	0,187483	0,2675	0,235671
20	0,068861	0,14801	0,169527	0,195083
25	0,039035	0,084522	0,178436	0,121275
31,5	0,027536	0,083286	0,173179	0,196967
40	0,022349	0,107945	0,134185	0,16137
50	0,015618	0,071465	0,128648	0,08733
63	0,021483	0,132904	0,249355	0,165622
80	0,028854	0,163679	0,236517	0,194323

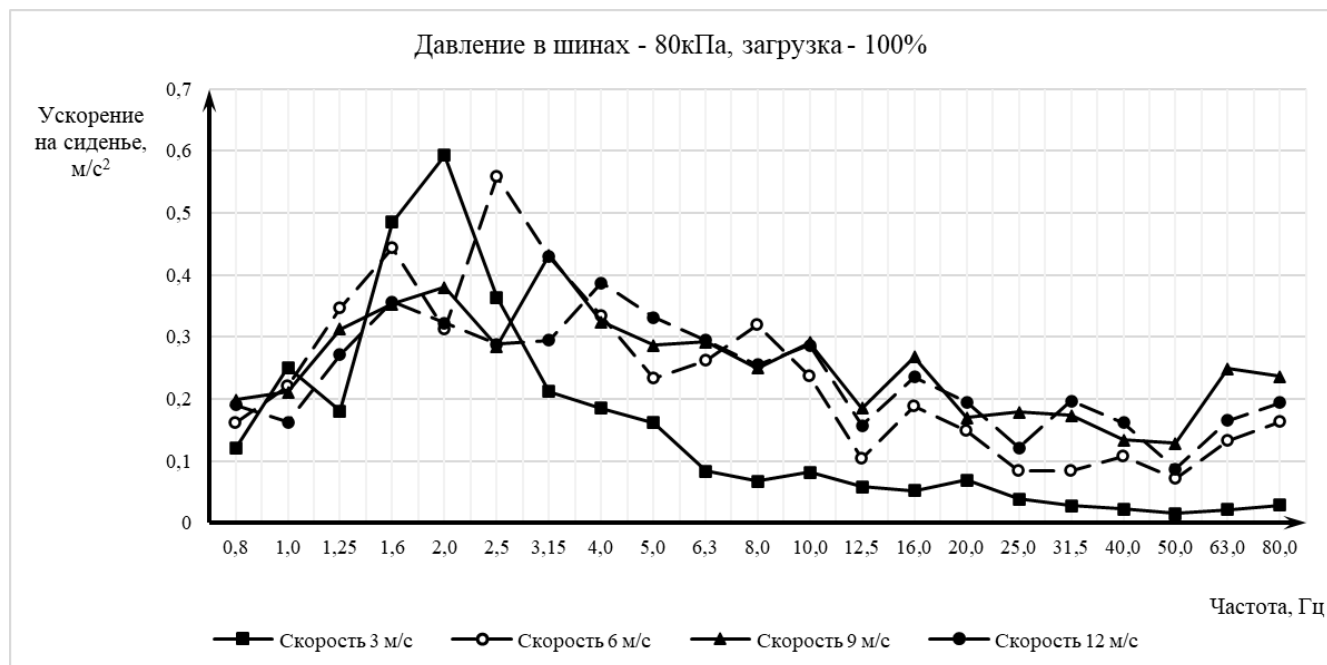


Рисунок 36 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 37 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,083611	0,137041	0,242912	0,178148
1	0,139048	0,112219	0,255403	0,175998
1,25	0,345989	0,134618	0,220277	0,147188
1,6	0,638953	0,392478	0,407527	0,27551
2	1,347968	0,780401	0,799885	0,734375
2,5	0,669547	0,945194	0,612505	0,68385
3,15	0,389781	0,589444	0,703344	0,59929
4	0,258756	0,359363	0,432452	0,328107
5	0,186762	0,763392	0,764365	0,584517
6,3	0,319085	0,72058	0,766775	0,900923
8	0,304094	0,344437	0,414365	0,500849
10	0,251867	0,234275	0,326635	0,453566
12,5	0,250963	0,21752	0,354415	0,315801
16	0,214509	0,477641	0,519314	0,462943
20	0,15949	1,206815	1,143413	1,193591
25	0,158632	0,654758	1,32277	1,443361
31,5	0,183433	0,400562	0,763678	1,113473
40	0,18752	0,297555	0,323783	0,797909
50	0,085282	0,173639	0,196985	0,176672
63	0,072698	0,149915	0,201918	0,18964
80	0,096945	0,159132	0,232543	0,158098

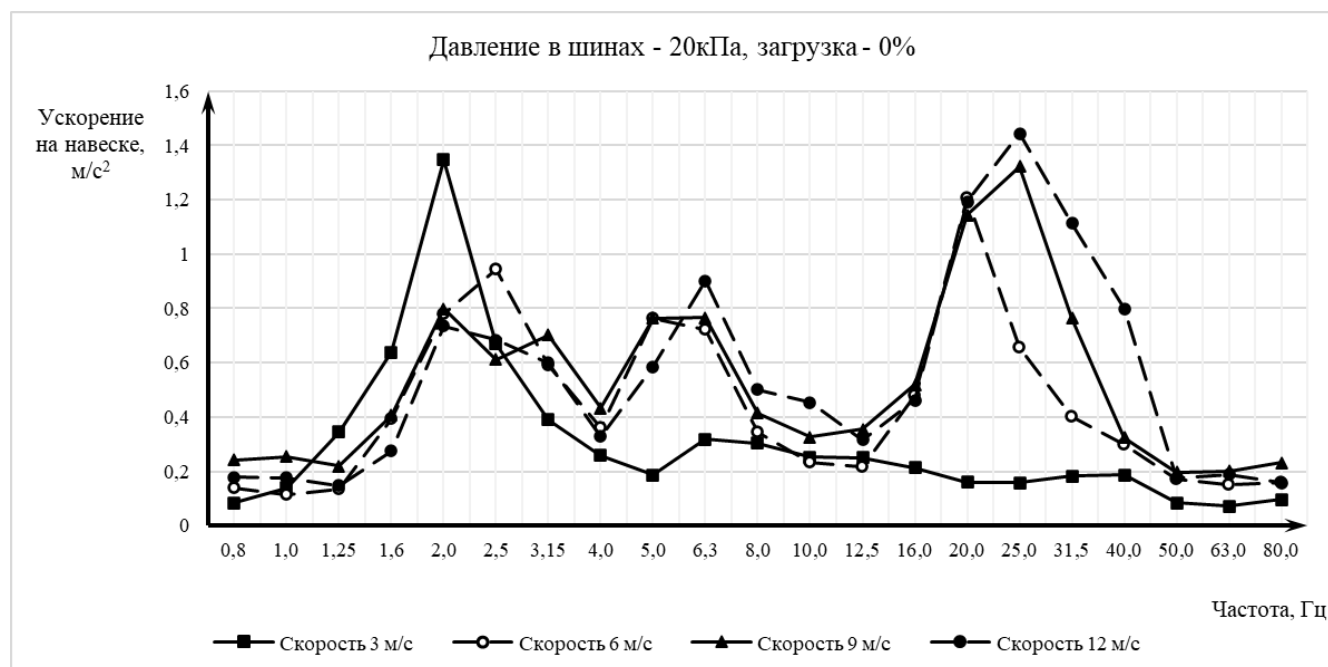


Рисунок 37 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 38 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,191353	0,282515	0,348801	0,47052
1	0,316797	0,247971	0,384125	0,524171
1,25	0,588208	0,194914	0,336627	0,438681
1,6	1,099375	0,417044	0,359229	0,393886
2	1,552908	1,14805	0,646759	0,646759
2,5	0,939966	1,52568	0,99955	0,89085
3,15	0,573838	0,851164	1,172048	1,044589
4	0,321871	0,476282	0,73454	0,873003
5	0,711243	0,889516	1,046234	1,243452
6,3	0,593167	0,993277	1,111222	1,386721
8	0,339719	0,572978	0,613607	0,918101
10	0,272042	0,465972	0,478393	0,588552
12,5	0,23072	0,406246	0,641112	0,719339
16	0,146341	0,39965	0,543446	0,684158
20	0,222767	0,680782	1,396745	1,479508
25	0,166477	0,301914	1,268587	1,268587
31,5	0,19768	0,307348	0,767983	0,767983
40	0,190438	0,398704	0,424646	0,424646
50	0,102243	0,213867	0,259339	0,259339
63	0,078639	0,21361	0,229169	0,229169
80	0,092348	0,263611	0,281838	0,281838

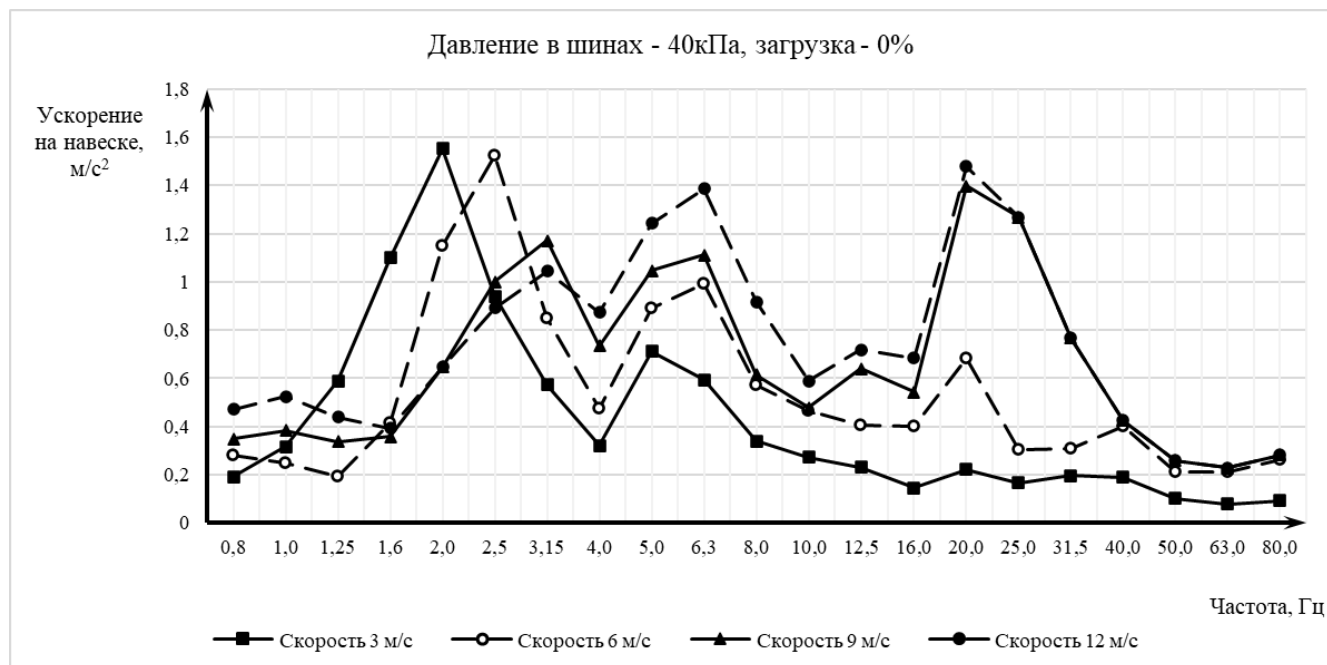


Рисунок 38 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 39 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,215121	0,347444	0,381457	0,56513
1	0,382487	0,30119	0,373143	0,500286
1,25	0,657019	0,243076	0,312552	0,461177
1,6	0,970172	0,371134	0,35818	0,497146
2	1,750008	1,056558	0,902951	0,83762
2,5	1,20573	1,697785	1,539035	1,257794
3,15	0,644532	1,067543	1,257228	0,968139
4	0,339464	0,676813	1,077027	0,801866
5	0,818136	0,895268	1,040369	1,090348
6,3	0,559986	0,946612	1,268017	1,654162
8	0,308872	0,809839	0,806567	0,744406
10	0,281669	0,550828	0,640391	0,553642
12,5	0,255442	0,390073	0,317653	0,463811
16	0,133272	0,533277	0,623903	0,693763
20	0,167277	0,995214	1,036167	1,133515
25	0,157141	0,260234	1,147534	1,214255
31,5	0,225624	0,361959	0,682928	0,978205
40	0,193517	0,41536	0,333762	1,154955
50	0,102658	0,209143	0,190666	0,313819
63	0,076065	0,198274	0,184094	0,275035
80	0,101953	0,275778	0,267032	0,371413

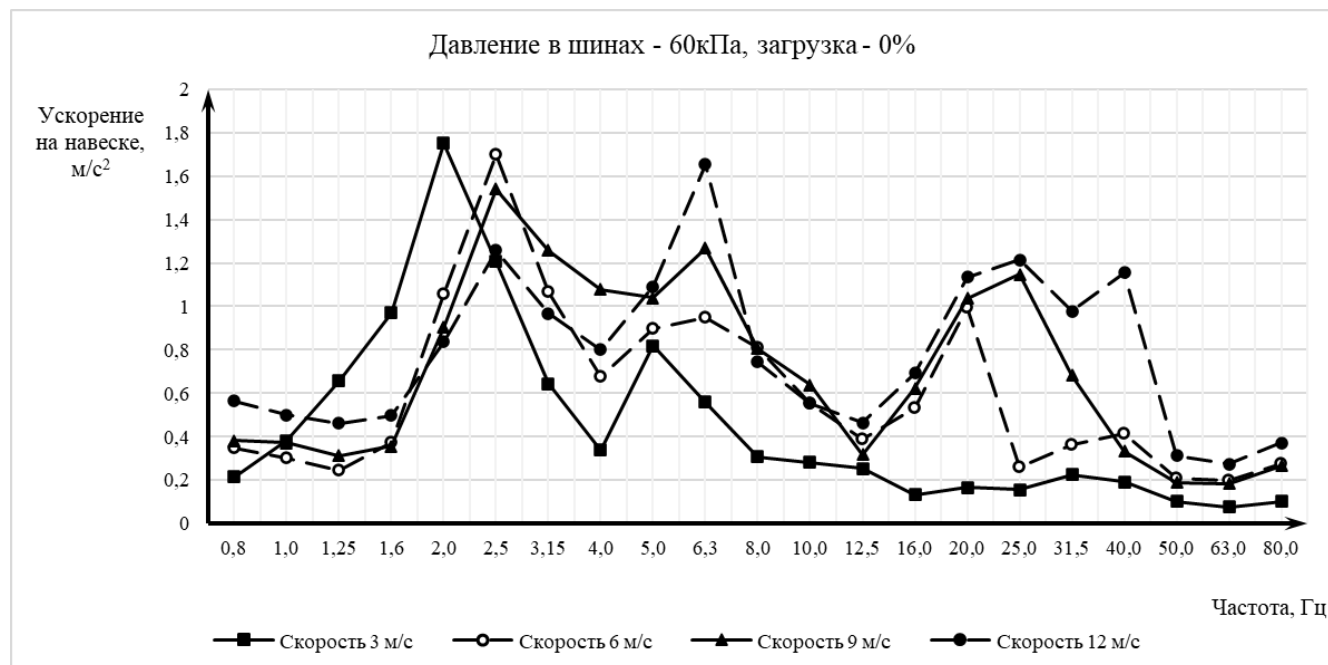


Рисунок 39 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 40 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,150501	0,413062	0,429222	0,401523
1	0,359633	0,332763	0,446416	0,368584
1,25	0,677727	0,307763	0,351636	0,424424
1,6	1,225961	0,438523	0,341148	0,417044
2	1,806193	1,184944	0,788751	0,795162
2,5	1,073159	1,81981	1,32933	1,16574
3,15	0,716917	1,26441	1,673951	1,218814
4	0,386986	0,717885	1,043962	0,878648
5	0,91316	0,84798	1,099869	1,181397
6,3	0,730916	1,031208	1,336323	1,708447
8	0,358825	0,864408	0,909199	0,828379
10	0,276565	0,669648	0,879439	0,538903
12,5	0,264998	0,365065	0,399962	0,441425
16	0,186092	0,426145	0,427617	0,479219
20	0,278938	0,849506	1,117654	1,052763
25	0,166452	0,260664	1,153744	1,20573
31,5	0,29827	0,328649	0,740955	0,997006
40	0,211254	0,467091	0,472726	1,009186
50	0,103198	0,234592	0,291157	0,30205
63	0,090133	0,243185	0,211952	0,289243
80	0,091357	0,282981	0,243623	0,344282



Рисунок 40 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 0%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 41 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,189555	0,144336	0,11853	0,150975
1	0,377022	0,219782	0,136569	0,170467
1,25	0,414178	0,27644	0,166078	0,245603
1,6	0,554307	0,211539	0,372975	0,38716
2	0,503446	0,315659	0,243185	0,352904
2,5	0,337536	0,323565	0,275572	0,210211
3,15	0,222467	0,272736	0,224679	0,191957
4	0,079647	0,183185	0,217423	0,196941
5	0,113777	0,31185	0,334063	0,370801
6,3	0,226709	0,406429	0,43148	0,489052
8	0,335871	0,357697	0,367977	0,428483
10	0,39101	0,292557	0,351795	0,259806
12,5	0,269565	0,209362	0,223168	0,203148
16	0,166452	0,404423	0,544669	0,539428
20	0,138424	0,651722	1,085293	1,174158
25	0,128524	0,2826	0,860529	0,824538
31,5	0,21567	0,202965	0,618595	0,92224
40	0,172938	0,268235	0,381972	1,065465
50	0,087733	0,164148	0,22357	0,225033
63	0,090539	0,124765	0,142658	0,146923
80	0,093351	0,170161	0,129045	0,145378

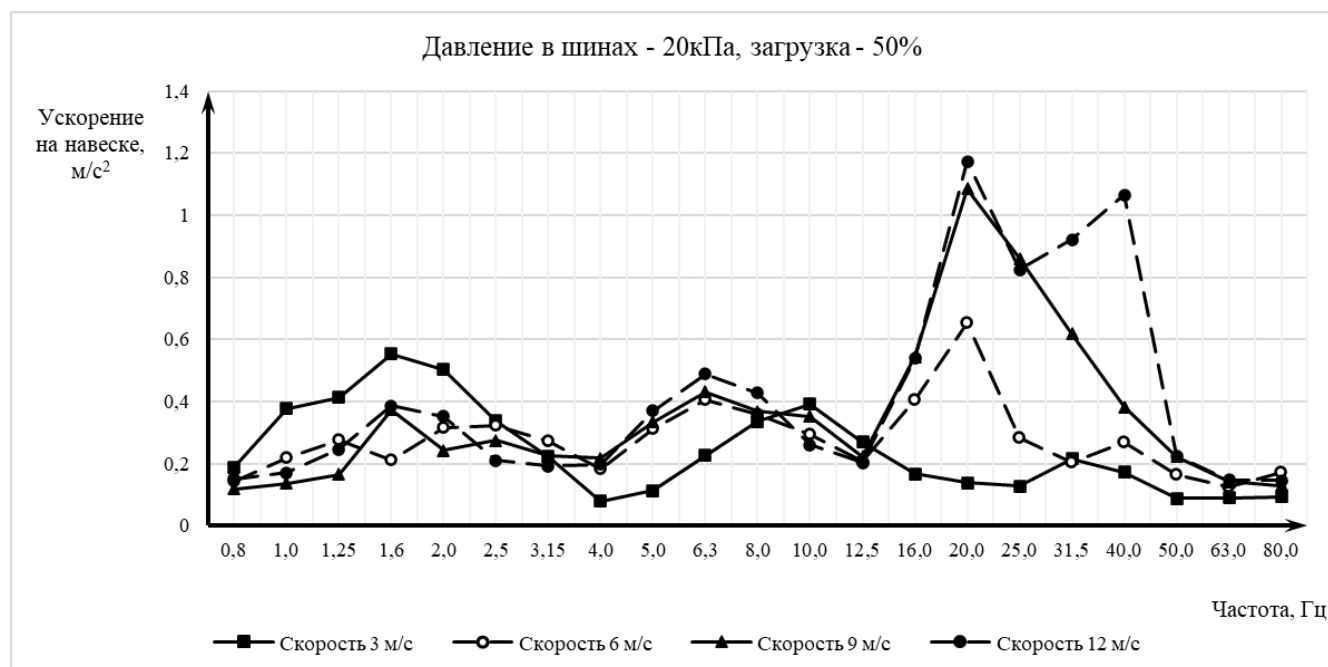


Рисунок 41 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 42 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,257165	0,1793	0,283853	0,243632
1	0,33064	0,216072	0,241975	0,267172
1,25	0,366201	0,11647	0,174968	0,191057
1,6	0,698431	0,316807	0,275569	0,295821
2	0,722037	0,470633	0,424496	0,514589
2,5	0,432465	0,371264	0,415213	0,502171
3,15	0,237884	0,27571	0,310584	0,377646
4	0,148812	0,271033	0,270333	0,307636
5	0,160274	0,241723	0,296264	0,249567
6,3	0,234391	0,363245	0,465013	0,444956
8	0,255749	0,359511	0,362319	0,524905
10	0,216014	0,210358	0,217586	0,232586
12,5	0,148182	0,183171	0,26179	0,272303
16	0,069654	0,166516	0,229891	0,240854
20	0,089491	0,829952	1,133764	1,363458
25	0,090912	0,538631	0,825811	1,019962
31,5	0,107886	0,300385	0,364507	0,465845
40	0,119671	0,192052	0,230692	0,281275
50	0,053305	0,090112	0,121337	0,124584
63	0,059962	0,11809	0,161514	0,158007
80	0,047603	0,09895	0,127903	0,133996

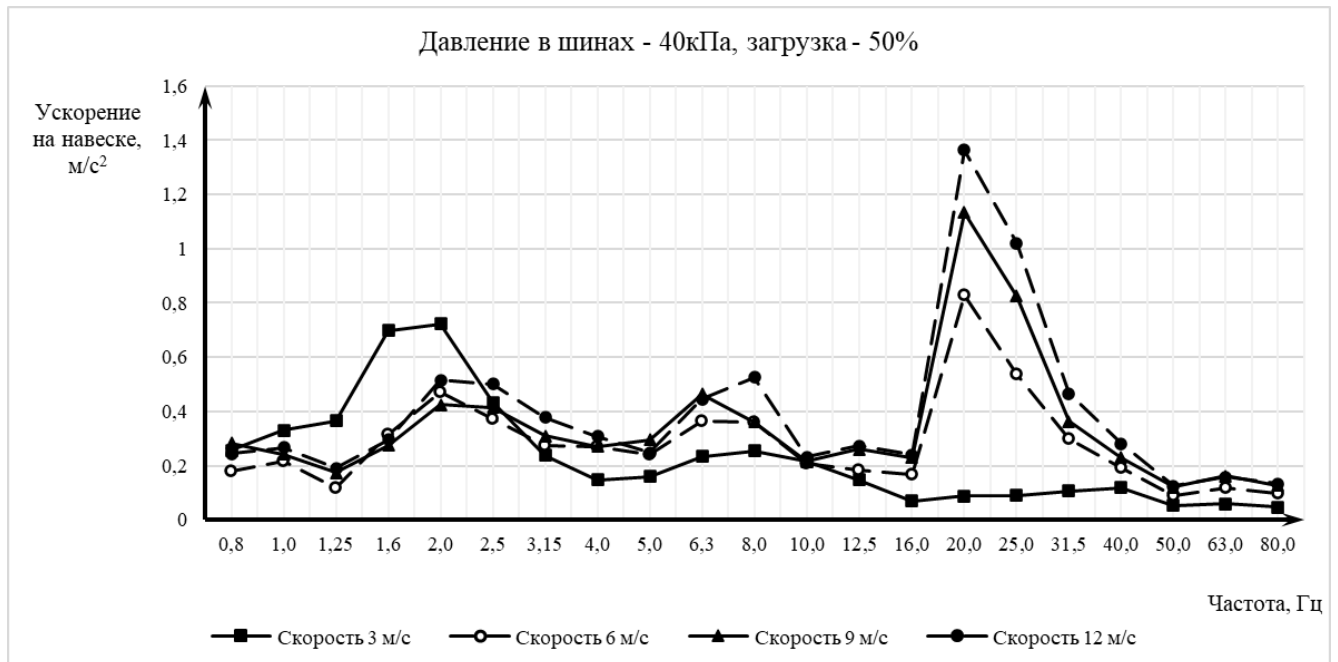


Рисунок 42 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 43 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,180944	0,171379	0,250628	0,223395
1	0,226618	0,202038	0,215665	0,293384
1,25	0,4712	0,174916	0,189591	0,311564
1,6	0,702038	0,362665	0,287142	0,401315
2	0,829095	0,474823	0,368818	0,42793
2,5	0,59641	0,495996	0,525847	0,472215
3,15	0,211652	0,303294	0,3243	0,285039
4	0,189855	0,385779	0,412776	0,398333
5	0,335504	0,417813	0,470927	0,49103
6,3	0,180199	0,31274	0,328678	0,407947
8	0,31864	0,445545	0,51448	0,528626
10	0,170967	0,255919	0,257018	0,374598
12,5	0,169621	0,220144	0,234274	0,422807
16	0,080628	0,236835	0,282385	0,527042
20	0,157976	0,841466	1,107884	1,2064
25	0,140706	0,985162	1,244351	1,438826
31,5	0,127987	0,594804	0,72847	0,876219
40	0,159791	0,340896	0,303404	1,290474
50	0,080375	0,187139	0,16679	0,332717
63	0,041253	0,095798	0,086055	0,153535
80	0,07874	0,190752	0,177719	0,304547

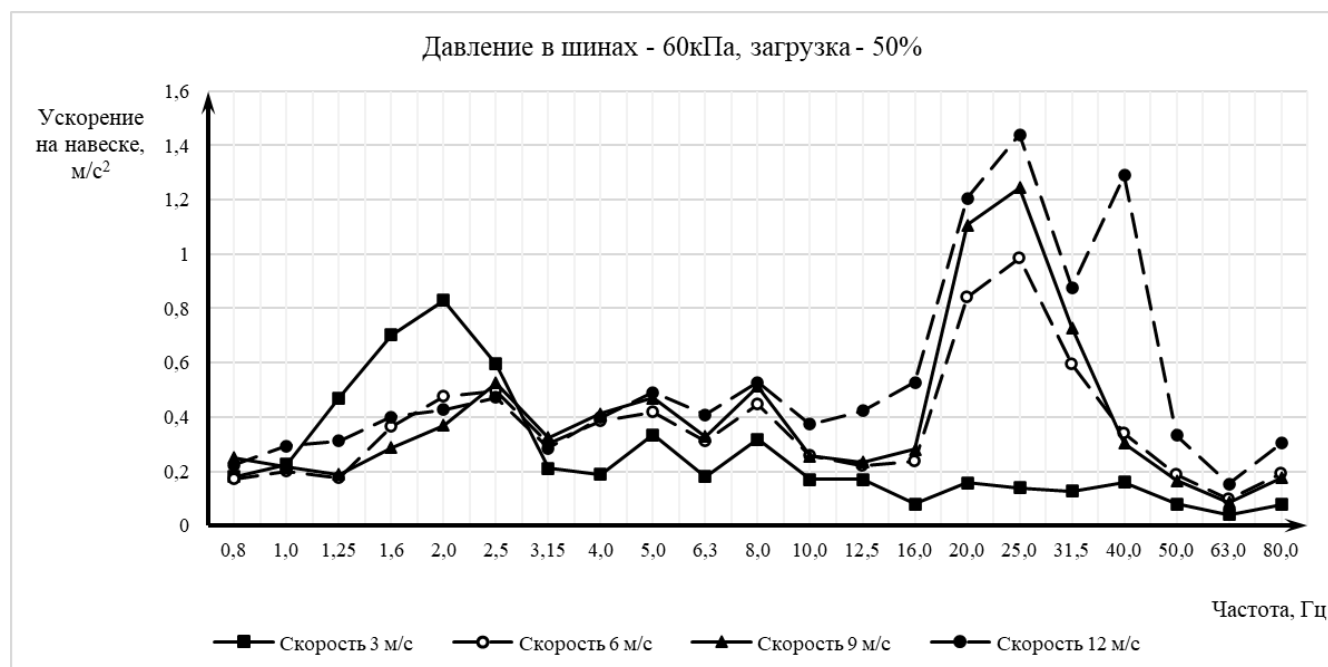


Рисунок 43 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 44 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,204309	0,143108	0,138362	0,177429
1	0,525028	0,334363	0,114908	0,278813
1,25	0,823427	0,229892	0,148151	0,263453
1,6	1,105324	0,31059	0,300154	0,499387
2	0,815076	0,60023	0,383004	0,428387
2,5	0,658696	0,533757	0,49849	0,375162
3,15	0,30698	0,411949	0,410654	0,377871
4	0,220541	0,303275	0,378381	0,328107
5	0,199646	0,404969	0,430318	0,336173
6,3	0,258834	0,476779	0,516976	0,395253
8	0,33855	0,414551	0,436359	0,549114
10	0,302729	0,343354	0,301778	0,330625
12,5	0,132993	0,248269	0,247377	0,375162
16	0,095516	0,634657	0,480874	0,569211
20	0,148885	1,032446	1,340135	1,310336
25	0,198661	0,356894	0,99955	0,913982
31,5	0,177083	0,262271	0,723069	1,042242
40	0,247563	0,332115	0,41047	1,511113
50	0,116277	0,271268	0,232073	0,249388
63	0,107091	0,184259	0,253686	0,145706
80	0,127737	0,210022	0,363045	0,212493

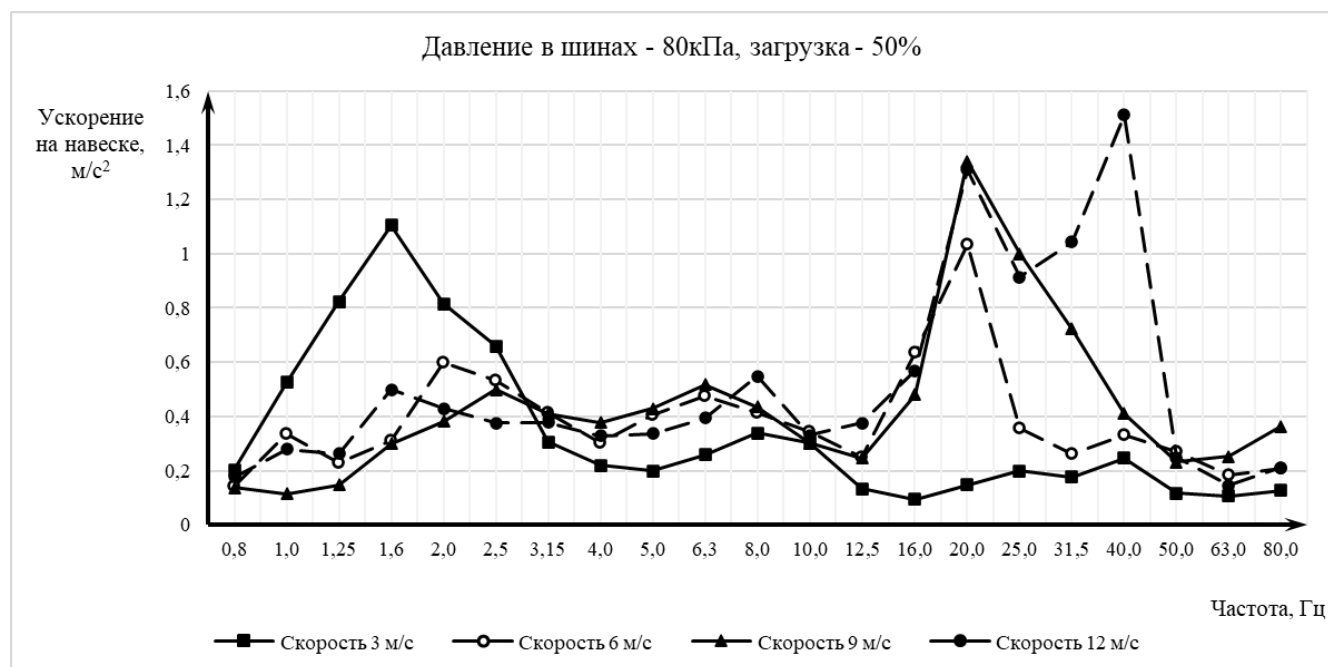


Рисунок 44 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 50%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

Таблица 45 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,269687	0,240575	0,242203	0,15381
1	0,380771	0,355292	0,237137	0,152547
1,25	0,474216	0,345367	0,309614	0,163591
1,6	0,362882	0,324147	0,263927	0,335288
2	0,215476	0,270902	0,205537	0,355528
2,5	0,180974	0,209834	0,253344	0,181106
3,15	0,16057	0,128755	0,261329	0,127366
4	0,055957	0,185757	0,126063	0,178119
5	0,080693	0,125215	0,211127	0,24063
6,3	0,287212	0,319659	0,293216	0,26609
8	0,33854	0,357054	0,266312	0,334822
10	0,300965	0,320812	0,244135	0,156647
12,5	0,128755	0,240467	0,197977	0,166903
16	0,084519	0,150433	0,192966	0,277433
20	0,150501	0,592723	0,796713	1,090328
25	0,161004	0,222467	0,921825	1,071031
31,5	0,17039	0,233434	0,567422	0,801682
40	0,134436	0,247934	0,297243	0,437697
50	0,073421	0,117205	0,209237	0,138133
63	0,086674	0,121827	0,148284	0,133203
80	0,075023	0,116784	0,150501	0,099664

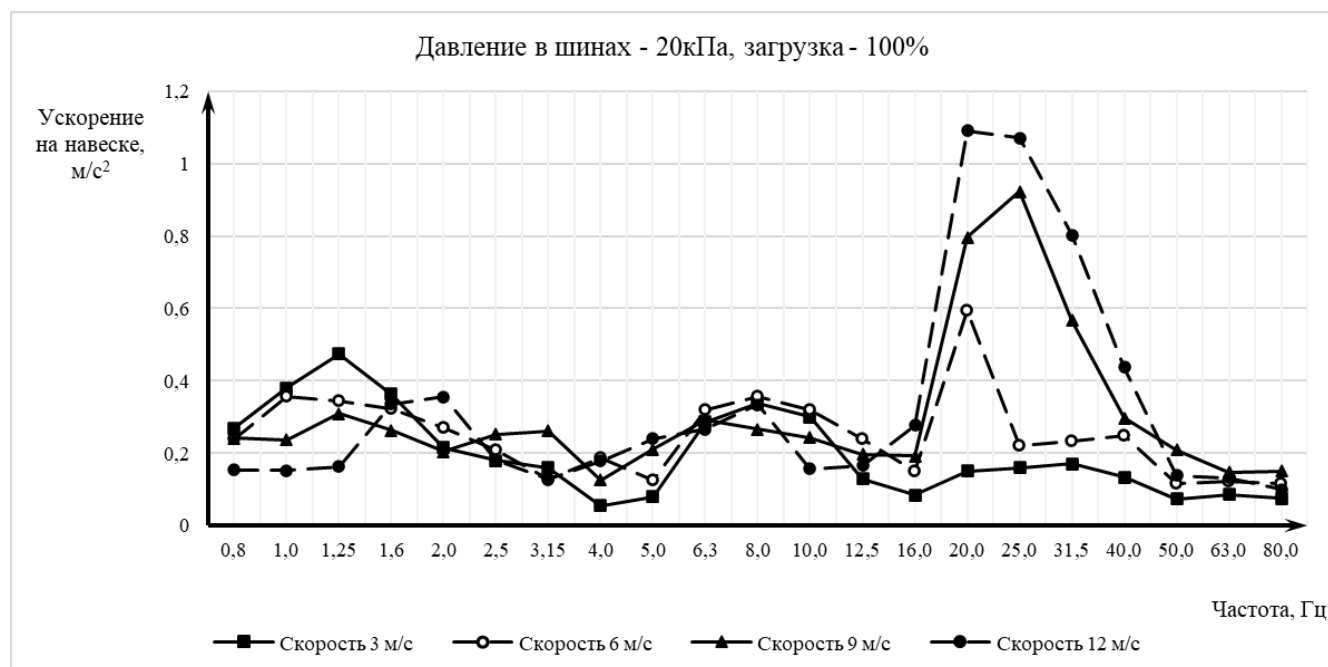


Рисунок 45 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 20 кПа.

Таблица 46 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,337992	0,126063	0,256901	0,140115
1	0,444679	0,273227	0,221967	0,198899
1,25	0,552316	0,176315	0,237992	0,219288
1,6	0,612489	0,371803	0,325023	0,342429
2	0,336475	0,376683	0,318941	0,469632
2,5	0,278687	0,290983	0,276068	0,456226
3,15	0,237992	0,248828	0,231552	0,390307
4	0,085206	0,219782	0,141763	0,155035
5	0,084747	0,181056	0,23512	0,138424
6,3	0,241442	0,410634	0,395004	0,449303
8	0,286825	0,388206	0,368308	0,494951
10	0,493138	0,31059	0,324731	0,303547
12,5	0,142722	0,141572	0,186175	0,179839
16	0,068354	0,17193	0,246932	0,216058
20	0,093519	0,649674	1,029663	1,001801
25	0,146099	0,367315	0,965964	1,123028
31,5	0,144531	0,402464	0,534959	0,892856
40	0,156717	0,225895	0,310171	0,467861
50	0,06922	0,111648	0,171698	0,181463
63	0,055706	0,090865	0,159849	0,152889
80	0,050481	0,090661	0,144531	0,159204

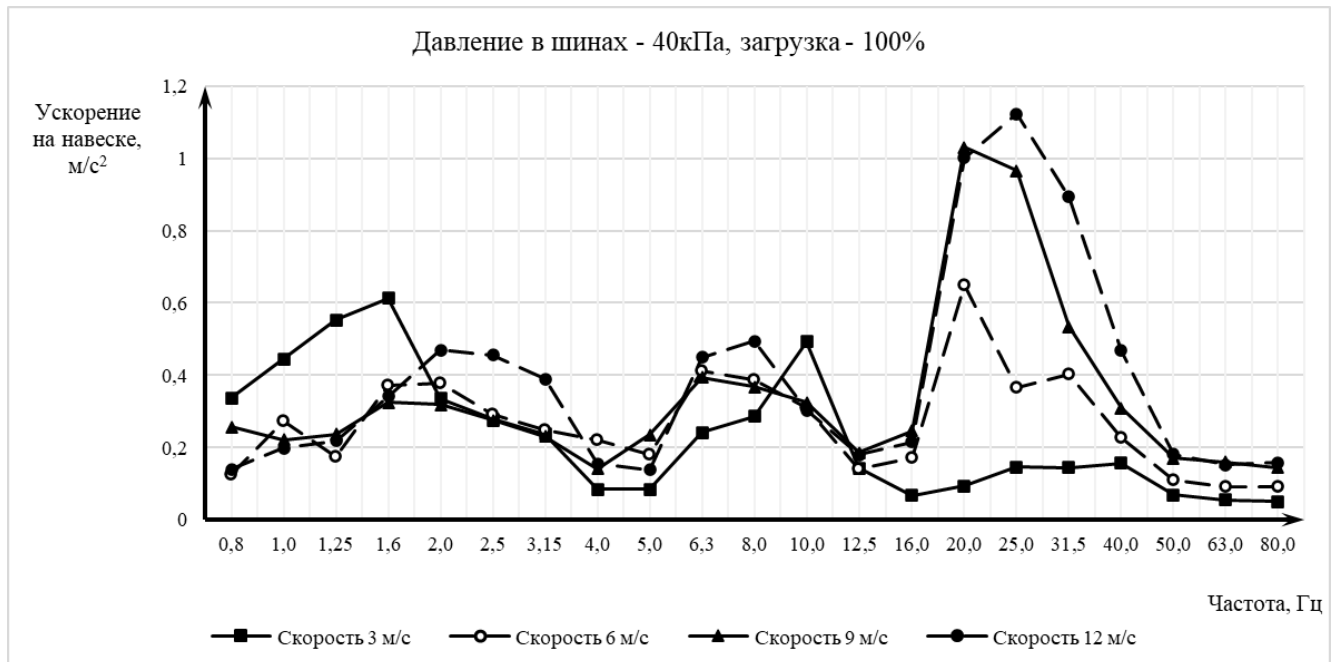


Рисунок 46 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 40 кПа.

Таблица 47 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,215282	0,119386	0,304916	0,125666
1	0,301507	0,30205	0,362393	0,392949
1,25	0,607566	0,216447	0,256439	0,371468
1,6	0,670451	0,461384	0,387509	0,422646
2	0,347861	0,373647	0,341813	0,381114
2,5	0,365667	0,284641	0,260742	0,255288
3,15	0,20665	0,264521	0,339515	0,256209
4	0,107219	0,222167	0,208704	0,187435
5	0,122762	0,173639	0,247934	0,204615
6,3	0,174422	0,326782	0,355932	0,385423
8	0,340433	0,402971	0,446483	0,452344
10	0,253116	0,298807	0,338448	0,38473
12,5	0,122101	0,134921	0,242421	0,249949
16	0,084862	0,192909	0,308225	0,445079
20	0,173561	0,751244	0,830867	0,872218
25	0,160859	0,429351	1,057826	1,287555
31,5	0,145902	0,283874	0,547863	1,006316
40	0,136385	0,289807	0,370634	0,853208
50	0,06211	0,16511	0,184342	0,20908
63	0,058847	0,131447	0,144531	0,154201
80	0,060023	0,130094	0,149624	0,148551

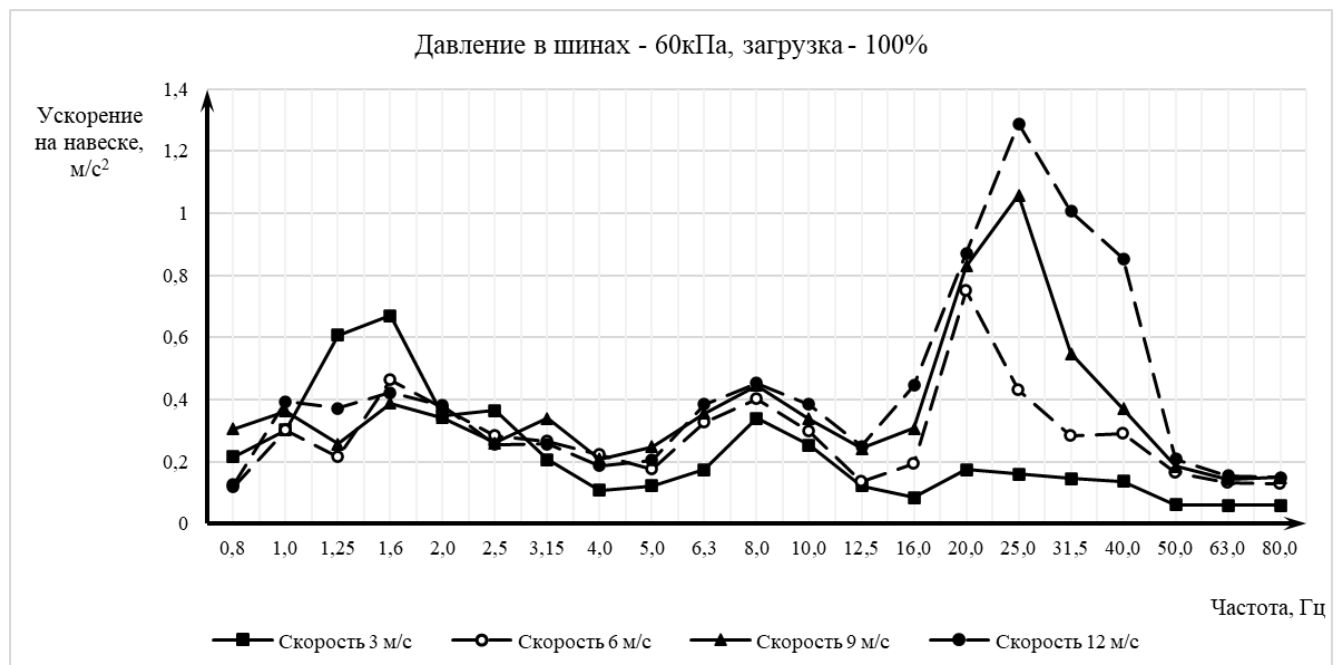


Рисунок 47 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 60 кПа.

Таблица 48 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,299345	0,172705	0,226539	0,177828
1	0,512124	0,374319	0,249163	0,186762
1,25	0,804756	0,463255	0,262192	0,227322
1,6	0,875888	0,499126	0,306244	0,255633
2	0,495584	0,358502	0,344385	0,32737
2,5	0,348174	0,313904	0,311943	0,296931
3,15	0,285025	0,29467	0,336829	0,279189
4	0,202145	0,286181	0,264442	0,280069
5	0,088089	0,251528	0,233259	0,220178
6,3	0,210022	0,31396	0,294891	0,329142
8	0,266671	0,337081	0,344351	0,39477
10	0,228038	0,291638	0,279315	0,327812
12,5	0,085359	0,18	0,25251	0,231136
16	0,06922	0,271024	0,312599	0,582679
20	0,097776	0,802587	0,850143	0,824909
25	0,250174	0,507995	1,155475	1,190107
31,5	0,115738	0,307118	0,676915	1,484172
40	0,144661	0,241333	0,413062	0,729274
50	0,070858	0,16057	0,221336	0,238421
63	0,047635	0,123259	0,169346	0,204339
80	0,059889	0,151315	0,15202	0,208892

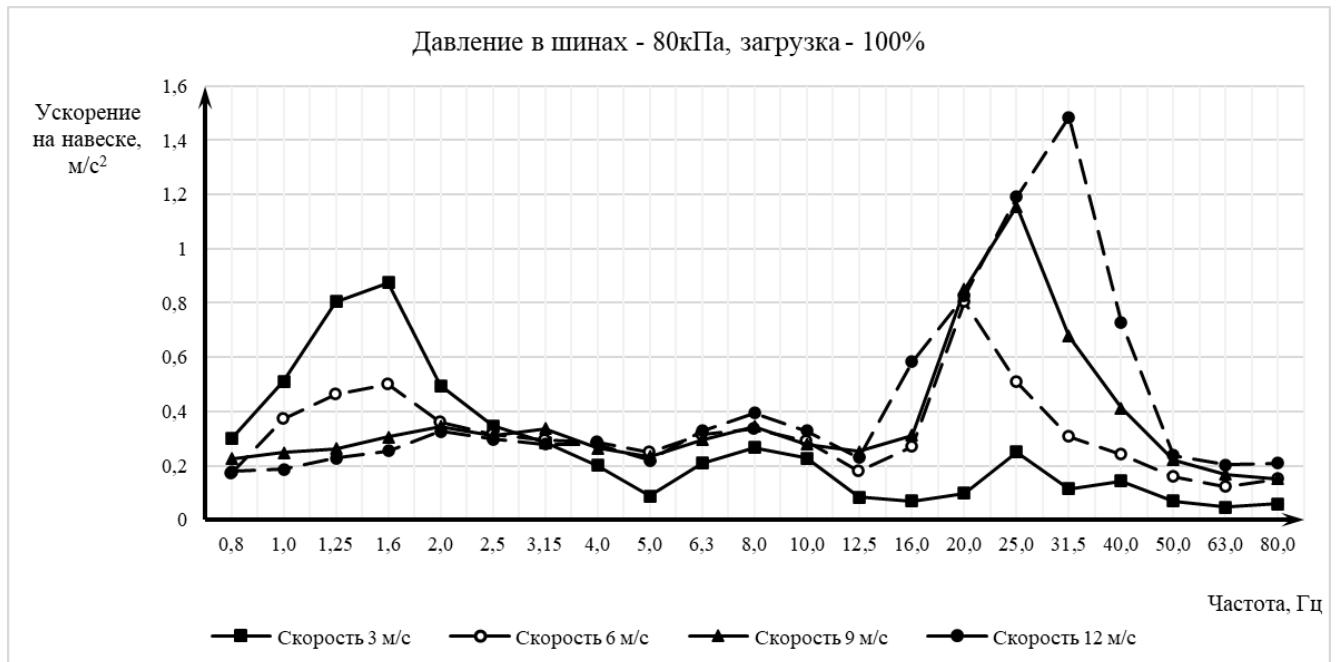


Рисунок 48 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при проезде единичной трапецевидной неровности: загрузка 100%, давление воздуха в шинах – 80 кПа.

## Приложение Б. Результаты проведенных полевых исследований

Таблица 1 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 0%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,056846	0,084425	0,100499	0,213758
1	0,115763	0,098309	0,287027	0,359007
1,25	0,062411	0,162375	0,098287	0,246186
1,6	0,129387	0,13968	0,217087	0,23952
2	0,261989	0,338012	0,2712	0,200025
2,5	0,200369	0,242231	0,444646	0,338009
3,15	0,306442	0,429044	0,555396	0,505
4	0,231673	1,288117	0,879071	1,106688
5	0,526821	1,409545	1,299902	1,578851
6,3	0,401486	3,112584	5,486965	4,832065
8	0,592738	1,905086	2,434223	8,517427
10	0,685448	0,733897	2,437611	3,236207
12,5	0,59356	0,522377	1,379385	2,939525
16	0,496397	0,569596	0,977999	1,434108
20	0,503718	0,491423	0,587447	0,896152
25	1,446763	0,632686	0,539741	0,636005
31,5	0,682813	0,928105	0,548741	0,759717
40	0,337789	1,474258	1,080518	0,823665
50	0,961346	1,554841	1,289098	0,818377
63	0,500468	1,047739	1,447978	0,780381
80	0,246593	0,500604	1,450218	0,803454

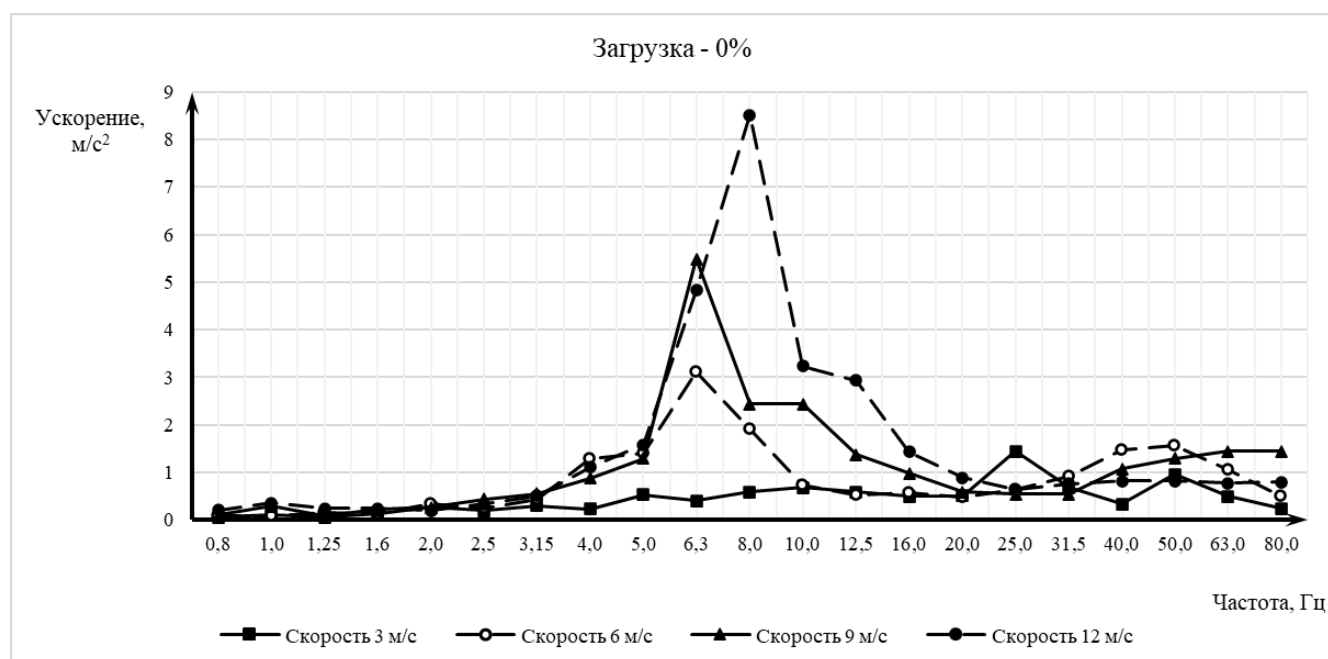


Рисунок 1 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 0%.

Таблица 2 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 50%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,042189	0,055747	0,071082	0,192273
1	0,152066	0,071103	0,066296	0,269283
1,25	0,046201	0,104162	0,069564	0,187885
1,6	0,075226	0,10003	0,117363	0,1813
2	0,18651	0,144401	0,186175	0,23431
2,5	0,080947	0,1708	0,201058	0,253876
3,15	0,217227	0,351426	0,373143	0,503295
4	0,284385	0,866484	0,447689	0,809353
5	0,367977	0,668043	0,851291	1,190821
6,3	0,298673	1,584181	2,975999	3,418646
8	0,412691	0,792069	1,564357	5,698088
10	0,469126	0,501563	1,948267	2,310319
12,5	0,413248	0,367977	0,901733	2,392799
16	0,586623	0,392066	0,488064	1,042711
20	0,352269	0,353539	0,394011	0,975569
25	0,942788	0,434205	0,49849	0,470958
31,5	0,473577	0,706991	0,368805	0,60321
40	0,249837	0,987931	0,3818	0,606384
50	0,660575	1,344965	0,844428	0,613056
63	0,334815	0,708902	0,853975	0,575216
80	0,17584	0,305327	0,946612	0,755763

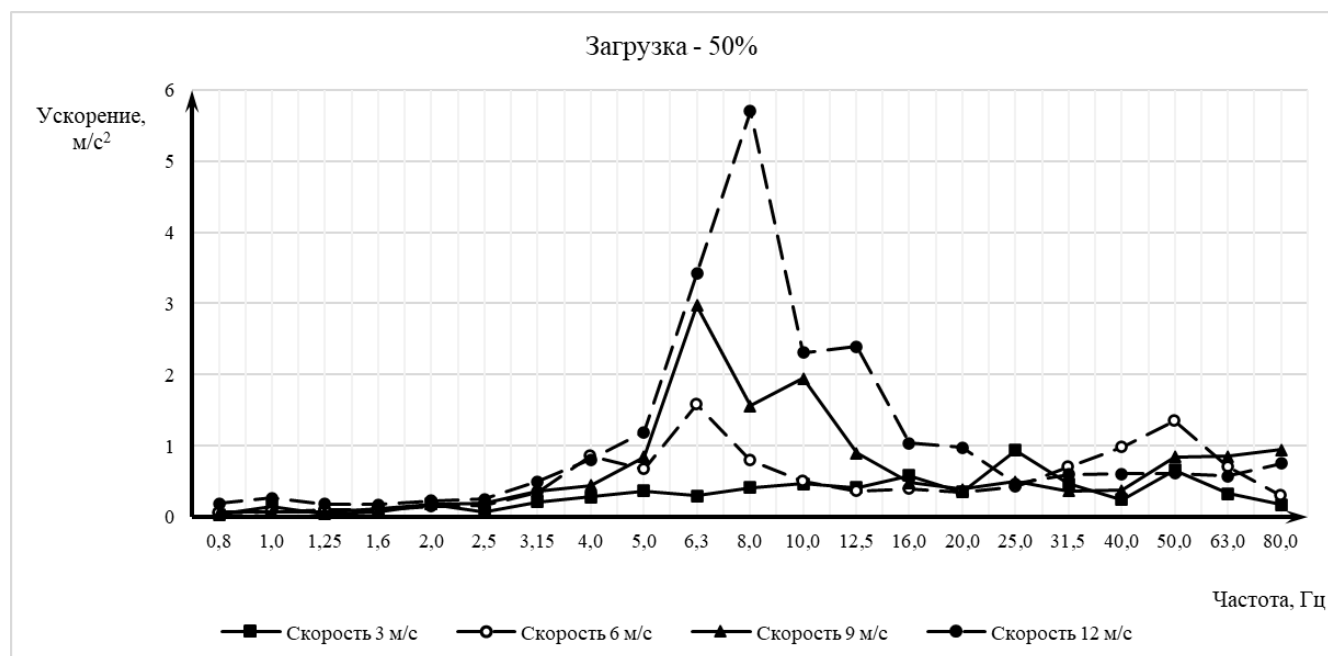


Рисунок 2 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 50%.

Таблица 3 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 100%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,053464	0,061324	0,148306	0,162215
1	0,084266	0,078122	0,196705	0,245199
1,25	0,063011	0,11579	0,137617	0,186231
1,6	0,093898	0,100195	0,150028	0,161415
2	0,211191	0,236109	0,187688	0,15202
2,5	0,143688	0,218501	0,300739	0,223637
3,15	0,284939	0,297689	0,459451	0,375894
4	0,165482	0,657906	0,582505	0,564284
5	0,251905	0,945761	1,644431	1,145472
6,3	0,282515	1,335322	2,584072	2,311704
8	0,345212	1,267447	1,75366	4,161077
10	0,475355	0,804032	1,566469	2,043698
12,5	0,376006	0,360442	0,920306	2,10306
16	0,347288	0,482607	0,645983	0,974984
20	0,370134	0,339668	0,43401	0,658498
25	0,785448	0,299749	0,362937	0,380657
31,5	0,619151	0,630107	0,425124	0,560322
40	0,238814	0,861304	0,711563	0,522594
50	0,565893	1,040369	0,638761	0,602578
63	0,350058	0,510514	0,945194	0,830493
80	0,149131	0,345834	0,942364	0,591835

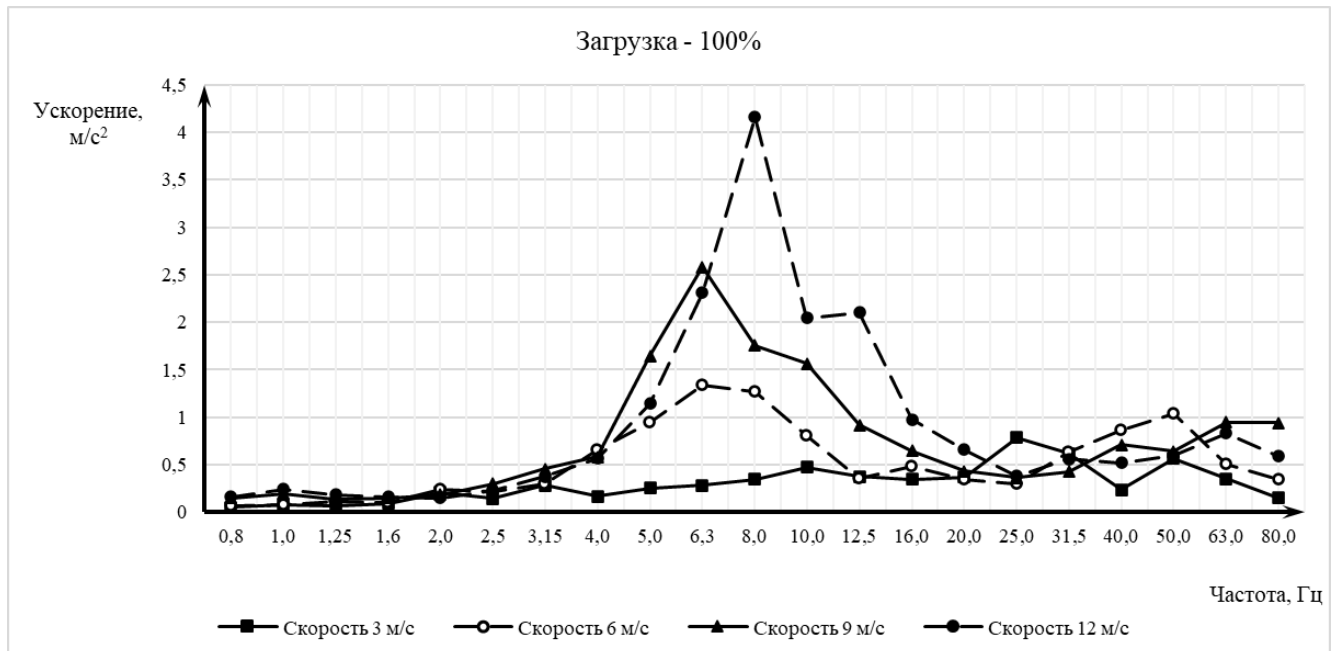


Рисунок 3 – Среднеквадратичные ускорения на оси колеса при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 100%.

Таблица 4 – Среднеквадратичные ускорения на раме при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 0%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,099372	0,198498	0,247502	0,199597
1	0,204045	0,237154	0,386145	0,526259
1,25	0,221293	0,281108	0,290298	0,354131
1,6	0,155736	0,199515	0,207394	0,290769
2	0,23312	0,453401	0,241555	0,169594
2,5	0,075308	0,15934	0,366266	0,259903
3,15	0,132654	0,235288	0,340441	0,353967
4	0,212644	0,177144	0,155334	0,286826
5	0,131847	0,176651	0,519111	0,379938
6,3	0,23709	0,80375	0,584138	1,180879
8	0,469868	0,679986	1,423951	2,392217
10	0,445656	0,21541	0,795243	0,532383
12,5	0,127469	0,212527	0,274197	0,294016
16	0,097839	0,258557	0,26314	0,294425
20	0,119479	0,304633	0,436348	0,363428
25	0,120832	0,126606	0,617283	0,580103
31,5	0,137468	0,135114	0,439832	0,569069
40	0,151343	0,22702	0,253832	0,687804
50	0,217588	0,277217	0,354137	0,452356
63	0,115837	0,239924	0,543289	0,407436
80	0,120041	0,268347	0,676083	0,73503

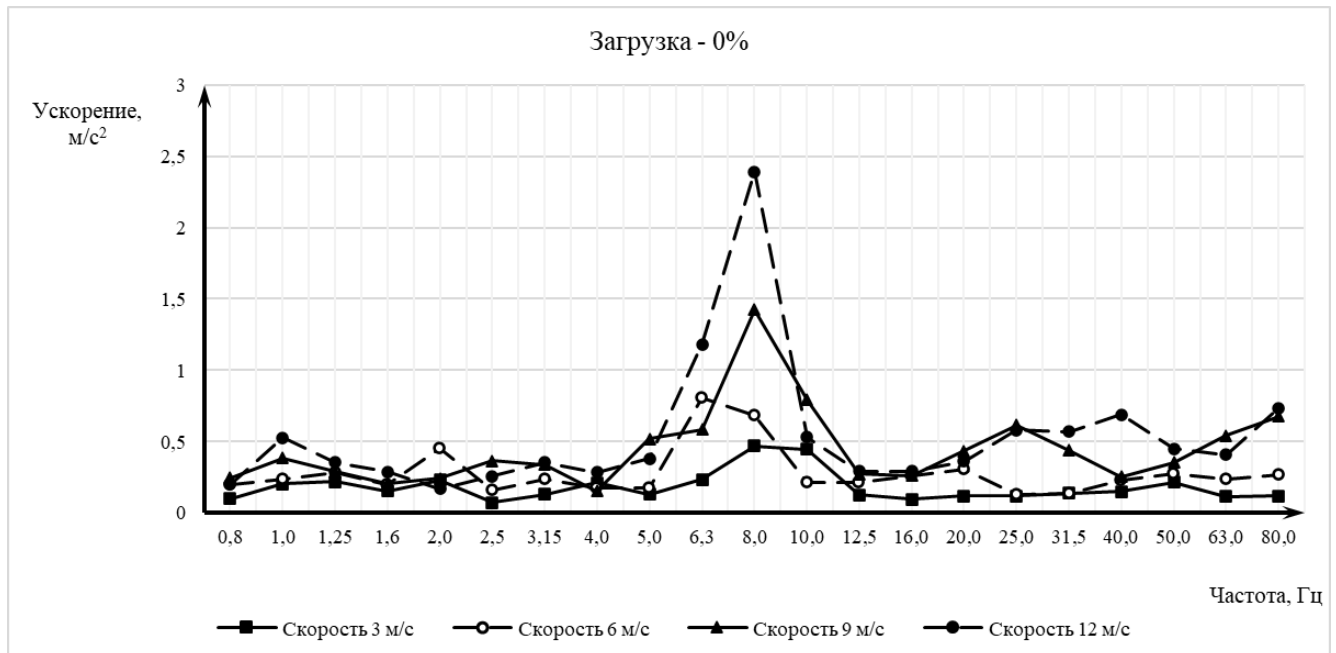


Рисунок 4 – Среднеквадратичные ускорения на раме при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 0%.

Таблица 5 – Среднеквадратичные ускорения на раме при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 50%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,039561	0,114341	0,153509	0,177548
1	0,063924	0,159706	0,202024	0,363045
1,25	0,133232	0,176712	0,178951	0,29381
1,6	0,131329	0,135103	0,150433	0,203972
2	0,140052	0,248492	0,14996	0,186762
2,5	0,049871	0,108676	0,149736	0,182897
3,15	0,081569	0,124709	0,208579	0,290264
4	0,099686	0,12041	0,101998	0,201284
5	0,081093	0,170928	0,312927	0,247878
6,3	0,086674	0,475498	0,754744	0,796295
8	0,253458	0,269808	0,49834	1,549653
10	0,238742	0,145509	0,42347	0,36715
12,5	0,078509	0,115582	0,169397	0,268476
16	0,058347	0,173639	0,170621	0,206464
20	0,073785	0,141127	0,264799	0,227833
25	0,117521	0,086987	0,406246	0,399093
31,5	0,084405	0,097425	0,266831	0,38777
40	0,087418	0,153095	0,173223	0,470922
50	0,131093	0,195529	0,216642	0,20651
63	0,126346	0,161511	0,289851	0,283109
80	0,074118	0,205537	0,460969	0,459107

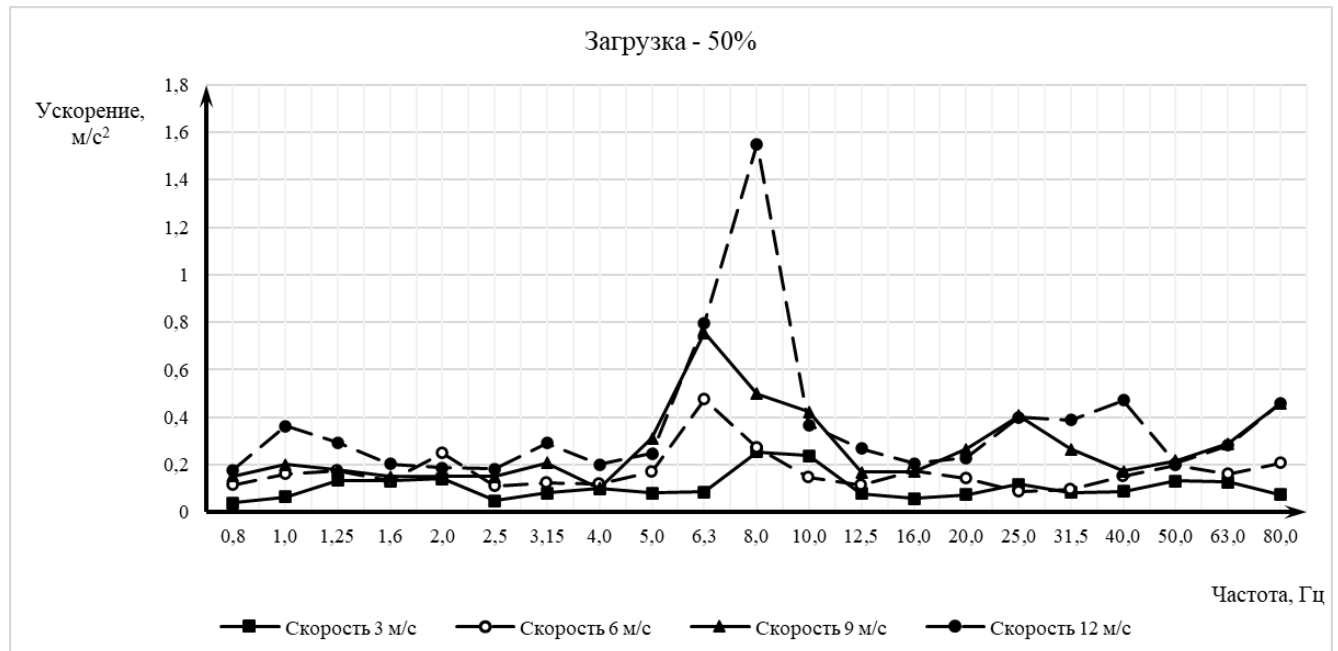


Рисунок 5 – Среднеквадратичные ускорения на раме при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 50%.

Таблица 6 – Среднеквадратичные ускорения на раме при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 100%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,077457	0,134436	0,197207	0,141508
1	0,123259	0,16788	0,235437	0,362882
1,25	0,141254	0,18828	0,217227	0,247044
1,6	0,095131	0,166153	0,12951	0,203697
2	0,208986	0,299076	0,162166	0,12079
2,5	0,0474	0,09239	0,223771	0,185173
3,15	0,053761	0,158489	0,310171	0,246932
4	0,128235	0,133893	0,098085	0,116626
5	0,083236	0,120086	0,231032	0,264521
6,3	0,142338	0,398824	0,350531	0,595127
8	0,255288	0,436555	0,599694	1,305631
10	0,244611	0,19774	0,482607	0,29059
12,5	0,066057	0,143624	0,15023	0,206185
16	0,060921	0,191009	0,162824	0,280195
20	0,059996	0,203514	0,239172	0,253344
25	0,074586	0,070826	0,369635	0,435183
31,5	0,121608	0,09264	0,166377	0,391714
40	0,092556	0,126403	0,157282	0,5132
50	0,124821	0,185757	0,199437	0,313396
63	0,071627	0,137617	0,326929	0,43872
80	0,078899	0,18	0,323856	0,502315

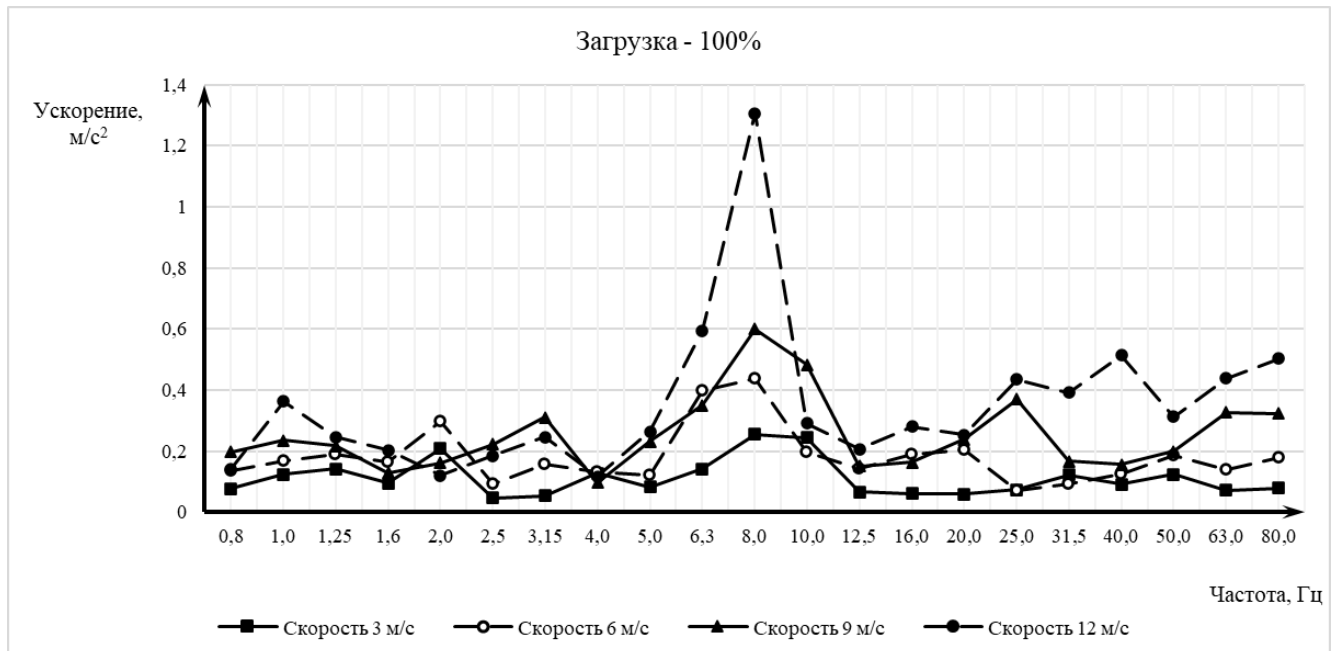


Рисунок 6 – Среднеквадратичные ускорения на раме при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 100%.

Таблица 7 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 0%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,200925	0,164914	0,417998	0,300954
1	0,257426	0,3511	0,271987	0,524315
1,25	0,384537	0,301853	0,867289	1,089664
1,6	0,196152	0,767892	0,363282	0,724351
2	0,242635	0,397884	0,349541	0,297167
2,5	0,11796	0,249689	0,194934	0,394772
3,15	0,133519	0,218392	0,619244	0,518689
4	0,192826	0,227761	0,383752	0,319802
5	0,155885	0,226564	0,287982	0,373078
6,3	0,219576	0,404726	0,462549	0,369508
8	0,21131	0,210711	0,279415	0,58679
10	0,157261	0,156545	0,150911	0,286423
12,5	0,070937	0,105335	0,205059	0,227236
16	0,090049	0,218494	0,158675	0,341347
20	0,050641	0,142775	0,227866	0,185251
25	0,048735	0,058439	0,168475	0,191614
31,5	0,037619	0,042974	0,114359	0,132095
40	0,026806	0,064945	0,036607	0,155225
50	0,04937	0,029887	0,072232	0,05898
63	0,022435	0,03781	0,04293	0,07978
80	0,026806	0,045335	0,053829	0,139285

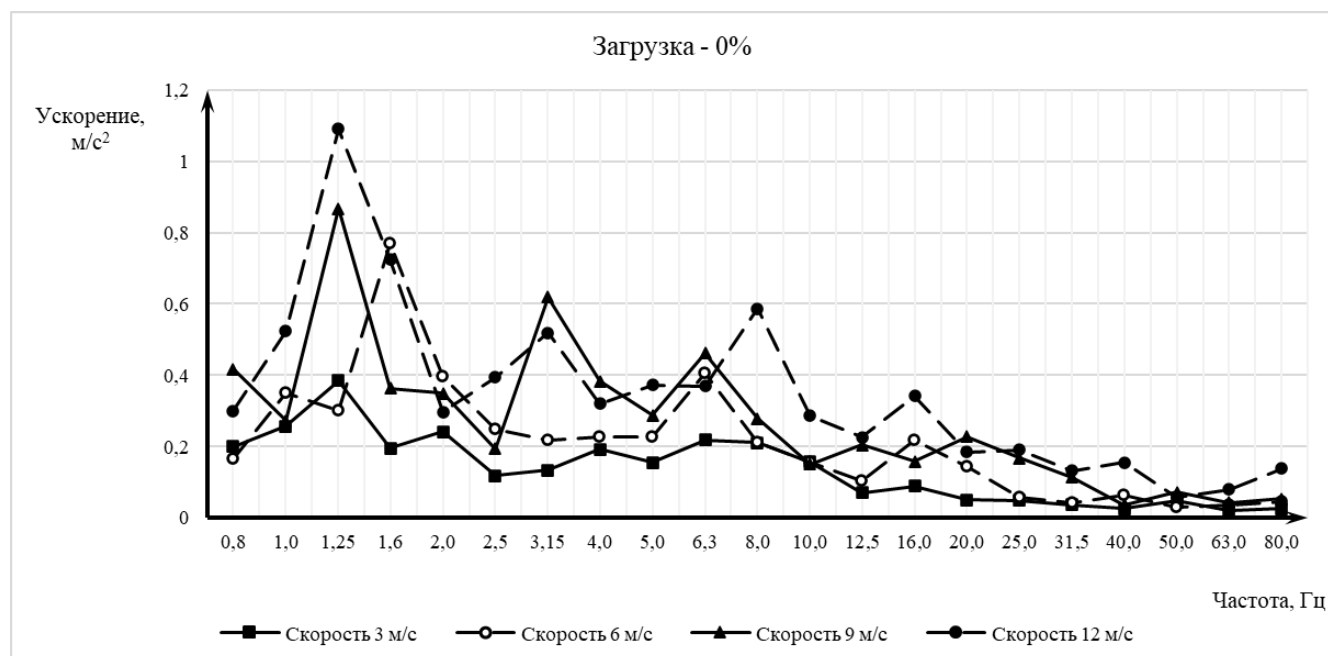


Рисунок 7 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 0%.

Таблица 8 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 50%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,144077	0,221038	0,27644	0,20388
1	0,184011	0,23072	0,296798	0,448092
1,25	0,202601	0,301959	0,465553	0,55058
1,6	0,123038	0,49179	0,325608	0,415298
2	0,173094	0,21965	0,232491	0,23512
2,5	0,107412	0,165929	0,216934	0,232073
3,15	0,096814	0,255288	0,404423	0,471452
4	0,10848	0,151815	0,166677	0,18964
5	0,112556	0,162142	0,192735	0,179677
6,3	0,153716	0,26472	0,262389	0,217814
8	0,151315	0,140199	0,187183	0,339363
10	0,109608	0,10564	0,184342	0,170621
12,5	0,05233	0,085808	0,138735	0,121662
16	0,04057	0,145837	0,167052	0,201873
20	0,037702	0,096005	0,153647	0,144012
25	0,0265	0,040734	0,111749	0,116051
31,5	0,028235	0,036028	0,078828	0,081642
40	0,064212	0,045112	0,062897	0,094832
50	0,036781	0,038089	0,050526	0,050435
63	0,02186	0,026735	0,044488	0,050096
80	0,020306	0,019845	0,038009	0,047571

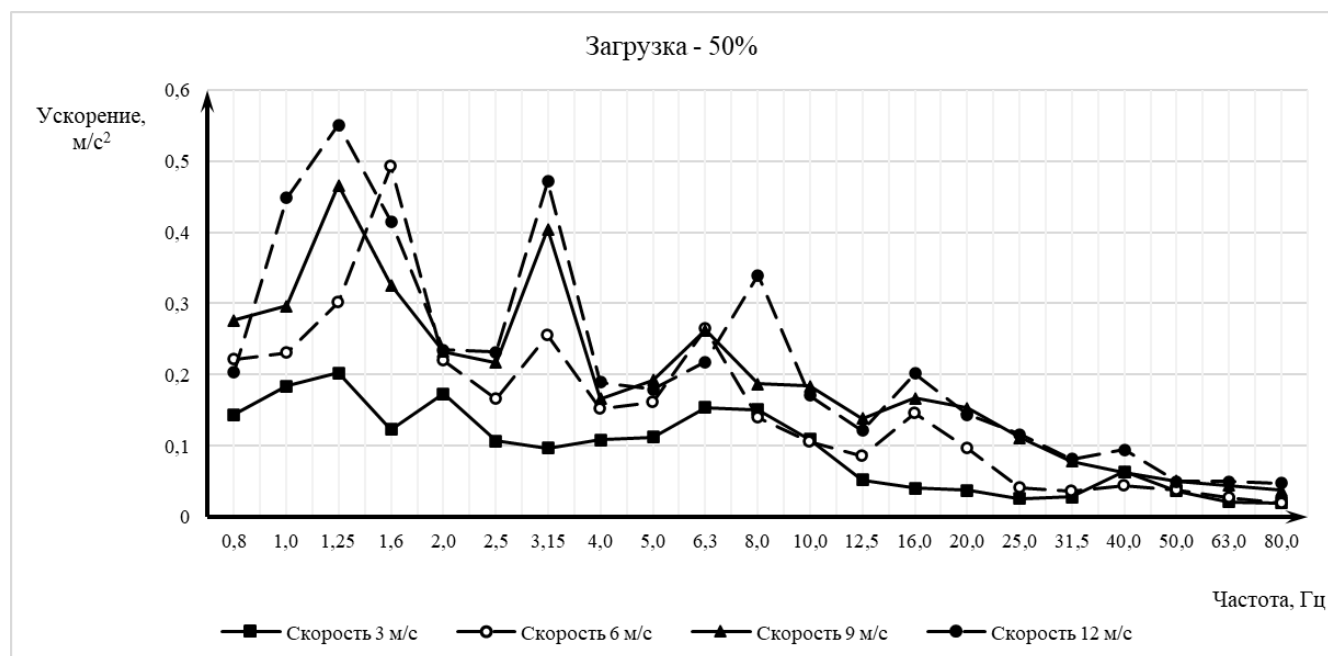


Рисунок 8 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 50%.

Таблица 9 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 100%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,132694	0,111097	0,108529	0,178911
1	0,18335	0,162021	0,182363	0,304641
1,25	0,13559	0,199347	0,248604	0,25323
1,6	0,140746	0,115686	0,241333	0,215379
2	0,161802	0,26039	0,181382	0,176752
2,5	0,085821	0,233749	0,132099	0,208563
3,15	0,082158	0,145771	0,371635	0,301507
4	0,138424	0,21998	0,254486	0,213979
5	0,112454	0,151043	0,235543	0,219831
6,3	0,15707	0,197118	0,304916	0,29948
8	0,130036	0,14081	0,17879	0,474963
10	0,113522	0,086014	0,103105	0,140968
12,5	0,083988	0,072015	0,122817	0,136661
16	0,065998	0,146758	0,108237	0,119493
20	0,05454	0,09664	0,125328	0,112353
25	0,036321	0,026944	0,114702	0,107945
31,5	0,033152	0,030259	0,056108	0,081239
40	0,020306	0,024384	0,026168	0,075446
50	0,023364	0,021297	0,026607	0,037499
63	0,017077	0,017552	0,030533	0,0565
80	0,022057	0,031865	0,068879	0,085474

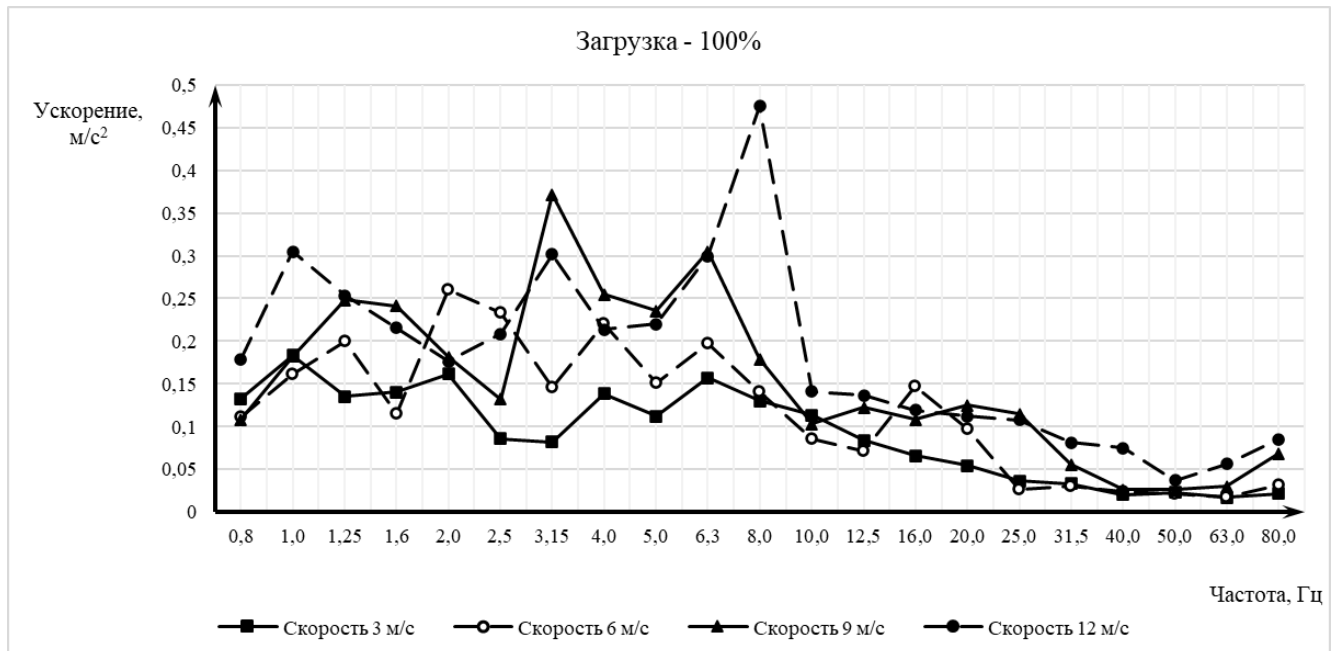


Рисунок 9 – Среднеквадратичные ускорения на сиденье при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 100%.

Таблица 10 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 0%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,15949	0,193082	0,232282	0,229479
1	0,259339	0,411209	0,442008	0,508223
1,25	0,212971	0,26039	0,380942	0,398645
1,6	0,186092	0,248269	0,262271	0,296398
2	0,181545	0,377362	0,322113	0,388206
2,5	0,139989	0,241877	0,360118	0,458076
3,15	0,124821	0,225387	0,289677	0,362393
4	0,124597	0,270415	0,222167	0,276689
5	0,103059	0,312692	0,239603	0,235014
6,3	0,119762	0,214509	0,400081	0,283363
8	0,11496	0,147884	0,199437	0,466391
10	0,092473	0,094321	0,118317	0,166153
12,5	0,054296	0,074485	0,098129	0,141
16	0,043616	0,091604	0,111548	0,151997
20	0,048456	0,076557	0,113879	0,129278
25	0,035625	0,038026	0,097864	0,103059
31,5	0,019291	0,030492	0,065348	0,069034
40	0,026274	0,030396	0,04723	0,071498
50	0,01871	0,024003	0,034506	0,047829
63	0,015503	0,018845	0,03698	0,046576
80	0,019783	0,027706	0,054418	0,054984

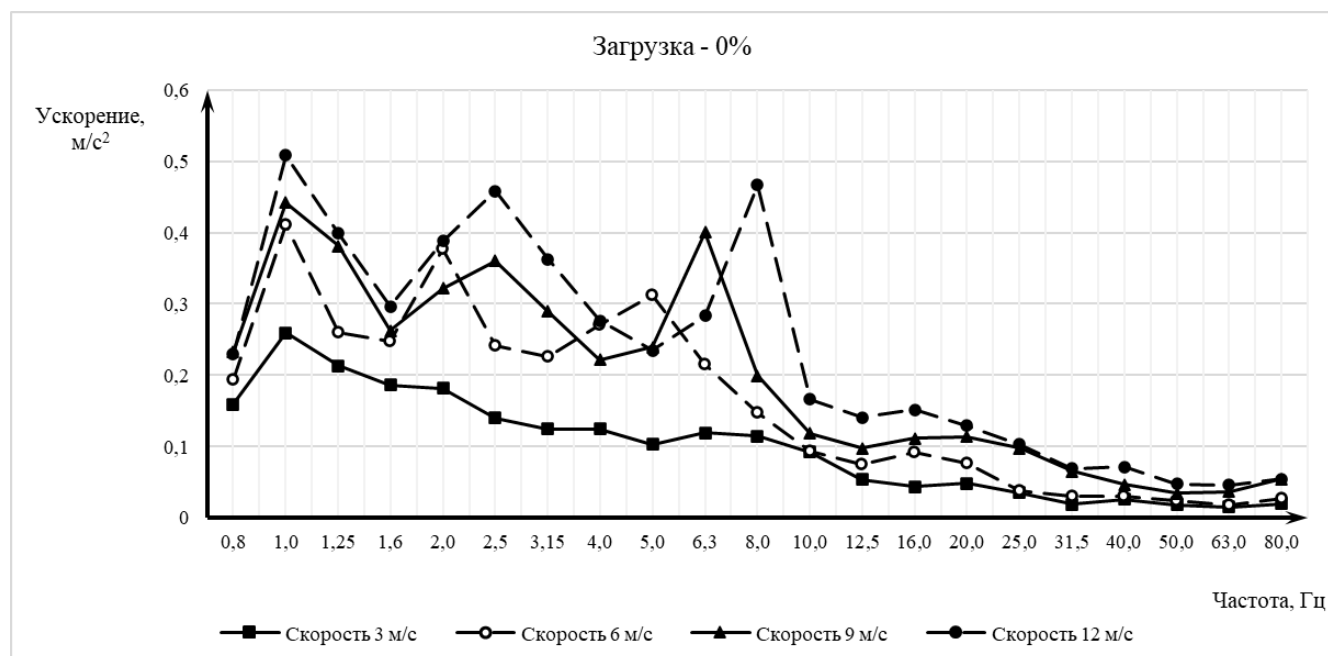


Рисунок 10 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 0%.

Таблица 11 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 50%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,068048	0,083236	0,11626	0,158703
1	0,18261	0,193865	0,177349	0,224174
1,25	0,114084	0,285795	0,284129	0,268235
1,6	0,131211	0,32371	0,220178	0,44528
2	0,516751	0,682007	0,359795	0,342429
2,5	0,143237	0,288118	0,379404	0,378552
3,15	0,184674	0,178068	0,437341	0,45952
4	0,270902	0,302457	0,221868	0,525894
5	0,187773	0,262389	0,391714	0,298136
6,3	0,254715	0,647049	0,775968	0,706038
8	0,381114	0,411764	0,488943	0,823797
10	0,555554	0,290199	0,292163	0,325023
12,5	0,0726	0,187183	0,197029	0,218304
16	0,045173	0,263571	0,285795	0,332414
20	0,082602	0,745188	1,113473	1,170994
25	0,125949	0,151247	0,74318	0,905391
31,5	0,135834	0,162458	0,402971	1,004507
40	0,120465	0,223872	0,21998	1,150117
50	0,095947	0,116364	0,133712	0,172938
63	0,044288	0,04589	0,067136	0,113216
80	0,035085	0,055381	0,11035	0,149287

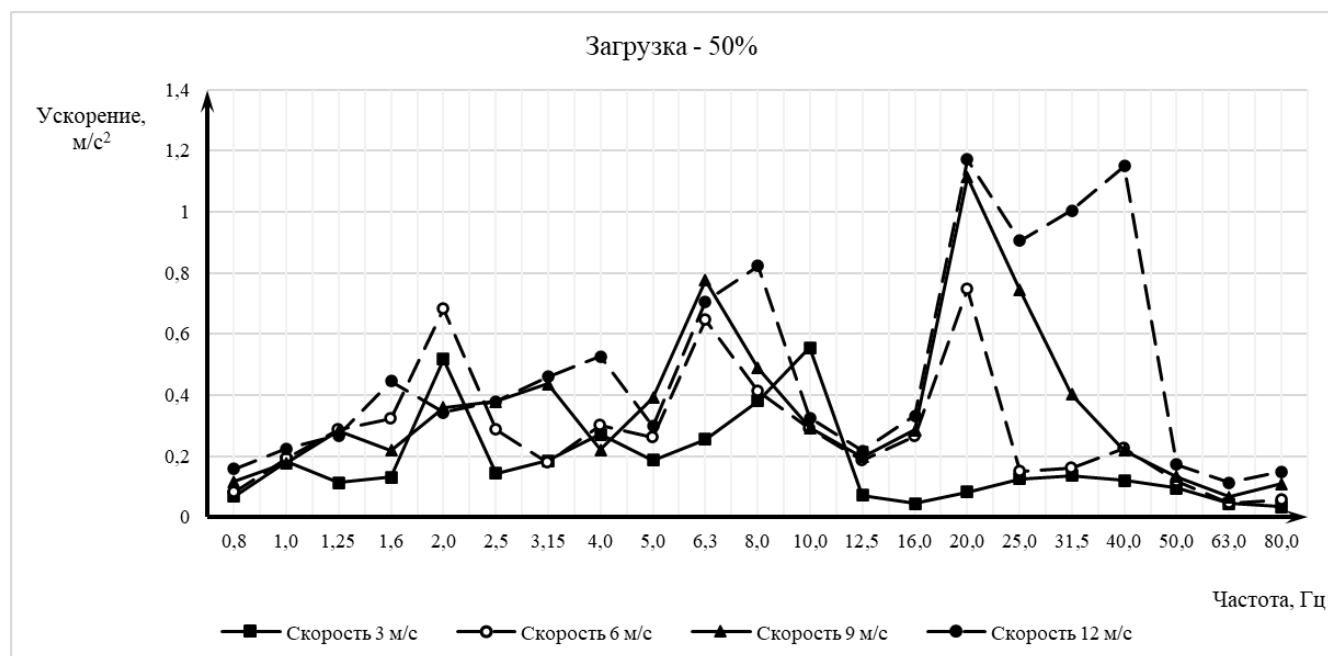


Рисунок 11 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 50%.

Таблица 12 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 100%.

1/3 октавы, Гц	Среднеквадратичное ускорение, м/с <sup>2</sup>			
	3 м/с	6 м/с	9 м/с	12 м/с
0,8	0,090011	0,095131	0,128871	0,0873
1	0,21635	0,094534	0,183763	0,137123
1,25	0,241116	0,219683	0,277978	0,266192
1,6	0,17695	0,278562	0,321293	0,32855
2	0,267272	0,353062	0,363209	0,30205
2,5	0,147552	0,169397	0,306841	0,245824
3,15	0,104506	0,129161	0,266951	0,270172
4	0,095131	0,207955	0,131112	0,346612
5	0,086869	0,155734	0,218174	0,185173
6,3	0,212302	0,706673	0,890717	0,935608
8	0,291376	0,254372	0,387799	0,640679
10	0,512354	0,226709	0,304641	0,250512
12,5	0,097557	0,170237	0,189924	0,185256
16	0,051305	0,152203	0,158466	0,173639
20	0,099775	0,274212	0,665844	0,679253
25	0,113828	0,117205	0,852952	0,899303
31,5	0,171235	0,151792	0,653973	0,935187
40	0,133232	0,284001	0,294229	0,766947
50	0,096466	0,105925	0,134194	0,150433
63	0,037668	0,04257	0,097747	0,10018
80	0,03723	0,067408	0,10015	0,138175

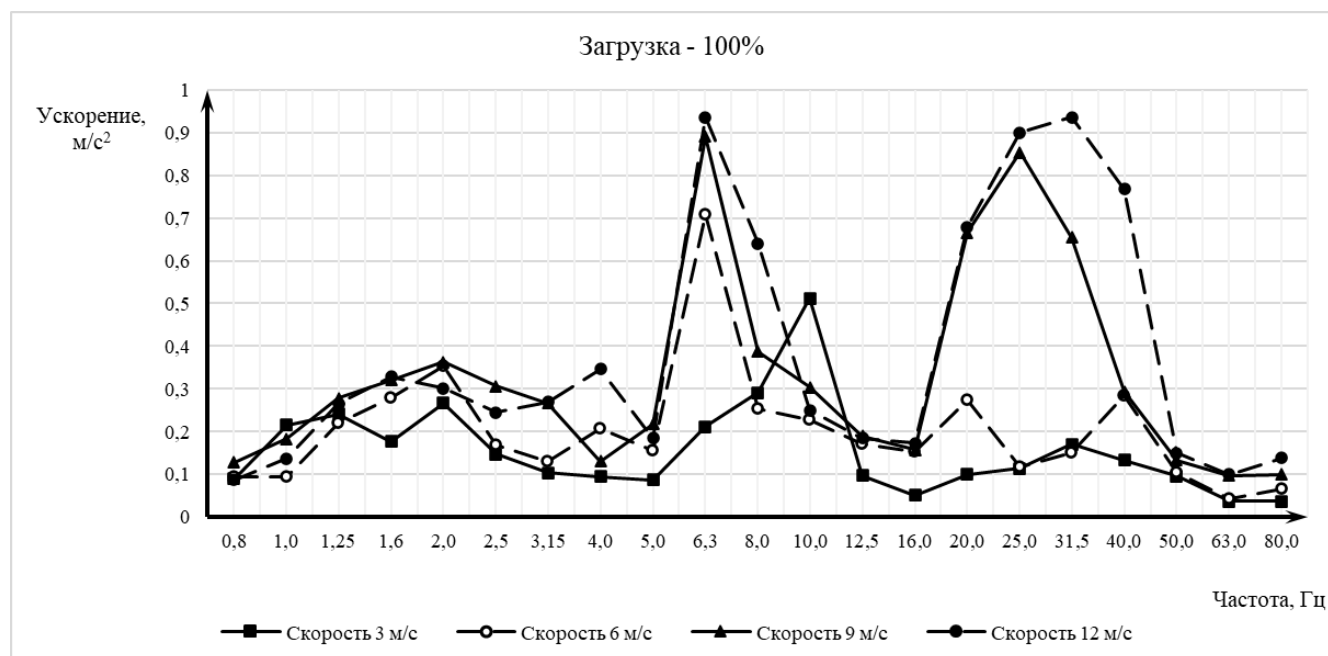


Рисунок 12 – Среднеквадратичные ускорения на навеске при движении по естественному агрофону с давлением воздуха в шинах 40 кПа: загрузка 100%.

Приложение В. Акты внедрения результатов исследования в практическую  
деятельность

УТВЕРЖДАЮ:



Генеральный директор  
ООО «ТРАНСМАШ»  
С.Е. Манянин  
01.12.2024 г.

**АКТ**

**о внедрении результатов диссертационной работы  
в производство**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Колядина Павла Александровича «Повышение виброзащитных свойств МЭС малой мощности на шинах сверхнизкого давления», выполненной в Воронежском государственном лесотехническом университете имени Г.Ф. Морозова, внедрены в ООО «ТРАНСМАШ» (г. Нижний Новгород).

**Вид внедрения результатов** – результаты экспериментальных исследований конструкторско-технологических параметров виброзащитных свойств мобильного транспортно-технологического средства, оборудованного шинами сверхнизкого давления при эксплуатации в полевых условиях.

**Область и форма внедрения** – использование полученных результатов исследования плавности хода при проектировании и модернизации существующих и перспективных транспортно-технологических средств на шинах сверхнизкого давления.

**Эффект от внедрения** – выявлено, что оснащение мобильного средства независимой подвеской и шинами сверхнизкого давления обеспечило высокие виброзащитные свойства. Установлено, что радиальная жесткость шины 1020x420-18 находится в пределах 73 – 146,1 кН/м. Для наиболее вибронегруженного режима работы при скоростях движения от 3 до 12 м/с, уровень колебаний на сиденье оператора находится в диапазоне от 0,037 до 0,063g и не превышает нормативных показателей. Снижение давления воздуха в шинах с 80 до 20 кПа позволяет уменьшить уровень колебаний на раме над осью передних колес в 2,1 раза, а на сиденье – не менее 1,53 раз. Результаты исследований планируется использовать для проведения ОКР при разработке перспективных моделей транспортно-технологических машин.

Представители  
ФГБОУ ВО ВГЛУ

д.т.н., доцент В.И. Прядкин  
соискатель П.А. Колядин

Представители  
ООО «Трансмаш»

Блиноватов/А.В. Блиноватов/

## УТВЕРЖДАЮ



Директор ООО «Центрально-черноземная агропромышленная компания» филиал МТС Воронеж, к.т.н.

В.Н. Коротких  
«23» декабря 2025 г.

## АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы  
в производство**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Колядина Павла Александровича по исследованию улучшения эксплуатационных показателей сельскохозяйственных мобильных энергосредств, выполненной в Санкт-Петербургском государственном аграрном университете, внедрены в период с 15.02.2023 г. по 13.05.2023 г. ООО «ЦЧ АПК» филиал МТС Воронеж Верхнехавского района Воронежской области.

Вид внедрения результатов – выбор оптимальных параметров эксплуатационных показателей мобильных средств химизации.

Область и форма внедрения – полевые испытания самоходного опрыскивателя, оборудованного шинами сверхнизкого давления.

Эффект от внедрения – выявлено снижение совокупных затрат денежных средств на 216,7 руб. на выполнение 1 га обработанной площади. Эффект наблюдается при использовании самоходного опрыскивателя на рабочих скоростях движения от 8 до 10 м/с и внутреннем давлении воздуха в шинах 40 кПа за счет снижения сопротивления качения в шине и уменьшения повреждения растений на 7% на разворотных участках. В результате при наработке мобильных средств на 1000 га потребности в моторном топливе уменьшаются на 3,5%, а общая себестоимость выполнения работ снижается на 5,6%.

Представители  
ФГБОУ ВО ВГЛТУ

д.т.н., доцент В.И. Прядкин

соискатель П.А. Колядин

«16» декабря 2025 г.

Представители ООО «Центрально-черноземная агропромышленная компания» филиал МТС Воронеж

Гл. инженер Е.А. Васильев

«23» декабря 2025 г.

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор

ООО МТС «АГРОСЕРВИС»

В.Н. Подрезов

«14» января 2026 г.

**АКТ****о внедрении результатов диссертационной работы  
в производство**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Колядина Павла Александровича по исследованию улучшения эксплуатационных показателей сельскохозяйственных мобильных энергосредств, выполненной в Санкт-Петербургском государственном аграрном университете, внедрены в период с 12.03.2025 г. по 11.07.2025 г. ООО МТС «АГРОСЕРВИС» Верхнехавского района Воронежской области.

Вид внедрения результатов – выбор оптимальных параметров эксплуатационных показателей мобильных средств химизации.

Область и форма внедрения – полевые испытания самоходного опрыскивателя, оборудованного шинами сверхнизкого давления.

Эффект от внедрения – выявлено уменьшение потребности в моторном топливе на 3,5% и общей себестоимости выполнения работ на 5,6% при наработке мобильных средств на 1000 га. Эффект наблюдается при использовании самоходного опрыскивателя на рабочих скоростях движения от 8 до 10 м/с и внутреннем давлении воздуха в шинах 40 кПа за счет снижения сопротивления качения в шине и уменьшения повреждения растений на 7% на разворотных участках. В результате наблюдается снижение совокупных затрат денежных средств на 216,7 руб. на выполнение 1 га обработанной площади.

Представители  
ФГБОУ ВО ВГЛТУ

д.т.н., доцент В.И. Прядкин

соискатель П.А. Колядин

«14» января 2026 г.

Представитель

ООО МТС «АГРОСЕРВИС»

Гл. инженер С.В. Севостьянов

«14» января 2026 г.

## Приложение Г. Акт внедрения результатов исследования в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебно-воспитательной работе  
ФГБОУ ВО Воронежского государственного  
лесотехнического университета  
имени Г.Ф. Морозова



А.С. Черных

«    »    202    г.

## АКТ

внедрения в учебный процесс результатов кандидатской диссертации  
Колядина Павла Александровича по исследованию плавности хода  
МЭС на шинах сверхнизкого давления.

Комиссия в составе:

заведующий кафедрой автомобилей и сервиса, профессор, доктор  
технических наук, доцент Прядкин В.И.,

доцент кафедры автомобилей и сервиса, кандидат технических наук,  
доцент Хрипченко М.С.,

доцент кафедры автомобилей и сервиса, кандидат технических наук,  
доцент Новиков А.П.,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы  
используются в ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова в процессе подготовки бакалавров  
по направлению 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и  
комплексов. Сконструированный стенд и методика для определения жесткости  
упругих элементов применяются на кафедре «Автомобилей и сервиса» при  
проведении лабораторных работ по дисциплине «Конструкция и  
эксплуатационные свойства транспортных и транспортно-технологических  
машин и оборудования», а также используется в курсовом проектировании и  
при подготовке выпускных квалификационных работ

заведующий кафедрой автомобилей и сервиса,  
доктор технических наук

В.И. Прядкин

доцент кафедры автомобилей и сервиса,  
кандидат технических наук

М.С. Хрипченко

доцент кафедры автомобилей и сервиса,  
кандидат технических наук

А.П. Новиков

## Приложение Д. Свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020618418

«Программа для моделирования режима торможения  
мобильного средства»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (RU)*

Авторы: *Прядкин Владимир Ильич (RU), Артёмов Артём Владимирович (RU), Колядин Павел Александрович (RU), Посметьев Виктор Валерьевич (RU)*

Заявка № 2020617563

Дата поступления 14 июля 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 июля 2020 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ившин



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020618425

«Программа для моделирования режима криволинейного  
движения шины мобильного средства»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Воронежский  
государственный лесотехнический университет им. Г.Ф.  
Морозова» (RU)*

Авторы: *Прядкин Владимир Ильич (RU), Артёмов Артём  
Владимирович (RU), Колядин Павел Александрович (RU),  
Посметьев Виктор Валерьевич (RU)*

Заявка № 2020617551

Дата поступления 14 июля 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 июля 2020 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020619071

**«Программа для моделирования и исследования плавности  
хода мобильного средства, оборудованного шинами  
сверхнизкого давления»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Воронежский  
государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.  
Морозова» (RU)*

Авторы: *Прядкин Владимир Ильич (RU), Артёмов Артём  
Владимирович (RU), Колядин Павел Александрович (RU),  
Посметьев Виктор Валерьевич (RU)*

Заявка № 2020617539

Дата поступления 14 июля 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 августа 2020 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020661823

**«Программа для моделирования вибронагруженности мобильного средства на шинах сверхнизкого давления при работе с переменным объемом технологической жидкости»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова» (RU)**

Авторы: **см. на обороте**

Заявка № **2020661038**

Дата поступления **24 сентября 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **01 октября 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**



Авторы: *Прядкин Владимир Ильич (RU), Артёмов Артём Владимирович (RU), Колядин Павел Александрович (RU), Посметьев Виктор Валерьевич (RU)*

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021663261

**«Программа для моделирования маневренности  
мобильного средства, оборудованного шинами  
сверхнизкого давления, при различном объеме  
технологической жидкости»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова» (RU)*

Авторы: *Прядкин Владимир Ильич (RU), Артёмов Артём  
Владимирович (RU), Колядин Павел Александрович (RU), Губанов  
Максим Алексеевич (RU), Посметьев Виктор Валерьевич (RU)*

Заявка № 2021662453

Дата поступления 04 августа 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 августа 2021 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023619267

**Программа для моделирования движения  
оборудованного шинами сверхнизкого давления  
мобильного средства с опрыскивателем**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Воронежский государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова" (RU)*

Авторы: *Прядкин Владимир Ильич (RU), Артёмов Артём  
Владимирович (RU), Колядин Павел Александрович (RU),  
Посметьев Виктор Валерьевич (RU)*

Заявка № 2023618680

Дата поступления 06 мая 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 мая 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 68b80077e14c40f0a94edbd24145d5c7  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 2013-02-22 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025668123

**Программа для моделирования воздействия шины  
сверхнизкого давления мобильного транспортного  
средства на растительный покров**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Воронежский государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова" (RU)*

Авторы: *Прядкин Владимир Ильич (RU), Колядин Павел  
Александрович (RU), Посметьев Виктор Валерьевич (RU)*

Заявка № 2025666647

Дата поступления 13 июня 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 июля 2025 г.







*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0692e7e1a630061542401670bca2026  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

*Ю.С. Зубов*

## Приложение Е. Свидетельство о поверке анализатора шума и вибрации Ассистент

		<p><b>Общество с ограниченной ответственностью</b>  <b>«НТМ-Защита» (ООО «НТМ-Защита»)</b>  <b>Номер в реестре аккредитованных лиц</b>  <b>РОСС RU.0001.310216</b>  <small>наименование аккредитованного в соответствии с законодательством Российской Федерации об аккредитации в национальной системе аккредитации юридического лица или индивидуального предпринимателя, выполнившего поверку, регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц</small></p>
<h2>СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ</h2>		
<p>№ С-ГЛР/26-01-2024/311725625</p>		
<p>Действительно до: «25» января 2025 г.</p>		
<p><b>Средство измерений</b> <u>Анализатор шума и вибрации Ассистент,</u>  <small>наименование и обозначение типа, модификация (при наличии) СИ, рег. номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа</small>  <b>Регистрационный номер №39671-08</b></p>		
<p><b>заводской номер</b> <u>075011</u></p>		
<p><b>в составе</b> <u>предусилитель ПУ-01 №075011, микрофон МК233 №6678, вибропреобразователь АР38 №1079</u></p>		
<p><b>поверено</b> <u>в полном объеме</u>  <small>наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений</small></p>		
<p><b>в соответствии с</b> <u>методикой поверки БВЕК.438150-005 Д1</u>  <small>наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка</small></p>		
<p><b>с применением эталонов:</b> <u>67480.17.РЭ.00320577 (67480-17; Калибраторы акустические; 4231; зав №3022408; Рабочий эталон по ГПС, приказ №2537 50247.12.2Р.00581139 (50247-12; Виброустановки калибровочные портативные; 9100D; зав №268; Эталон 2-го разряда по ГПС, приказ №2772)</u>  <small>регистрационные номера эталонов и (или) наименование и обозначения типов СИ, заводские номера, обязательные требования к эталонам</small></p>		
<p><b>при следующих значениях влияющих факторов:</b> <u>температура 22,2 °С, относительная влажность 48,9 %, атмосферное давление 99,1 кПа</u>  <small>перечень влияющих факторов, нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений</small></p>		
<p><b>и на основании результатов <u>первичной (периодической)</u> поверки признано пригодным к применению.</b>  <small>ненужное зачеркнуть</small></p>		
<p><b>Поверитель</b> <u>Кутырова Татьяна Игоревна</u>  <small>фамилия, инициалы</small></p>		
<p><b>Знак поверки</b></p>		<p><u>311725625</u>  <small>номер записи сведений в ФИФ о результате поверки</small></p>
<p><b>Руководитель метрологической службы -</b>  <u>Главный метролог ООО «НТМ-Защита»</u>  <small>должность руководителя или другого уполномоченного лица</small></p>	 <small>подпись</small>	<p><u>Персиянцев</u>  <small>фамилия, инициалы</small>  <u>Николай Игоревич</u></p>
<p><b>Дата поверки:</b> <u>«26» января 2024 г.</u></p>		

## Метрологические характеристики

Калибровочная поправка (фактор коррекции) для МК233 №6678  
 $L_m = 11,0$

Калибровочные поправки (фактор коррекции) для АР38 №1079  
 $L_x = 1,7$  (ось X)  
 $L_y = 1,7$  (ось Y)  
 $L_z = 1,7$  (ось Z)

Поверитель \_\_\_\_\_



подпись

Кутырова \_\_\_\_\_

фамилия, инициалы

Татьяна Игоревна \_\_\_\_\_

Приказом Федеральной службы по аккредитации №А-3108 от  
03 сентября 2013г. метрологической службе ООО "НТМ-Защита"  
предоставлено право поверки средств измерений.

ООО «НТМ-Защита».  
115230, г. Москва, 1-й Нагатинский проезд, дом 10, строение 1  
Телефон: (495) 5000-300  
Факс: (495) 231-3020