

Сафронов Евгений Викторович

**МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПАЛЛЕТ НА
РОЛИКОВЫХ КОНВЕЙЕРАХ ГРАВИТАЦИОННЫХ СТЕЛЛАЖЕЙ**

Специальность 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Официальные оппоненты: **Анцев Виталий Юрьевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортно-технологические машины и процессы» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Лускань Олег Александрович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Атомная энергетика» Балаковского инженерно-технологического института – филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Репин Сергей Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»**

Защита диссертации состоится «01» июля 2026 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.13 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Косицын Борис Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (далее Стратегия), утвержденная распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р, предусматривает рост производительности труда в транспортном комплексе на 67,2%. При этом отмечено, что в настоящее время средний уровень производительности труда на транспорте в России в 2 - 4 раза ниже в сравнении со странами из группы развитых и развивающихся. Для достижения поставленных в Стратегии задач заложен комплекс мероприятий в виде развития мультимодальных транспортно-логистических центров, расположенных вблизи крупнейших точек потребления и являющихся базовым элементом транспортно-логистической инфраструктуры, одним из основных элементов которой являются складские комплексы, оснащенные различными типами стеллажного оборудования.

Для решения задач увеличения плотности хранения, производительности обработки грузов, а также разделения функциональных зон склада и снижения длины фронта подбора товара при выполнении задач его комплектации на складе используются гравитационные стеллажи для паллет, характеризующиеся наличием установленного под углом гравитационного роликового конвейера. Основной грузовой единицей при стеллажном хранении и перевозке грузов в РФ являются деревянные поддоны с грузом (далее паллета) размерами 1200x800 и 1200x1000 мм, объем продаж которых за период с 2017 по 2024 гг. вырос в 3 раза до 68 млн шт.

Основными источниками опасности при эксплуатации роликовых конвейеров в гравитационных стеллажах для паллет являются высокая скорость их движения и давление на первую паллету со стороны следующих за ней при выгрузке. В связи с этим для обеспечения безопасной эксплуатации роликовых конвейеров гравитационных стеллажей используется два основных элемента безопасности роликового полотна – тормозной ролик и устройство остановки и разделения паллет, которые работают совместно, как система.

Широкому развитию производства и использованию гравитационных стеллажей для паллет в России препятствует отсутствие научно обоснованных методов и методик расчета параметров, используемых в конструкции стеллажа роликовых конвейеров и его элементов безопасности. Таким образом, разработка научно обоснованных методов определения конструктивных параметров роликовых конвейеров гравитационного стеллажа, обеспечивающих безопасность движения паллет, является актуальной научной проблемой.

Целью диссертационной работы является обеспечение безопасности движения паллет на конвейерах гравитационных стеллажей за счет использования роликового полотна с рациональными параметрами, оснащенного устройствами ограничения скорости, остановки и разделения паллет.

Для достижения цели работы поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработана методика расчета шага расстановки несущих роликов, основанная на математической модели взаимодействия паллеты с ненагруженным несущим роликом, которая позволяет определить сопротивление передвижению паллеты по роликовому полотну с учетом жесткости несущего ролика.

2. Разработана математическая модель группового движения паллет и их ударного взаимодействия с упором устройства остановки и разделения паллет,

позволяющая определить скорость движения групп паллет и её допустимые значения.

3. Разработан метод расчета динамических процессов, возникающих при движении паллеты по роликовому конвейеру гравитационного стеллажа, основанный на математической модели взаимодействия паллеты с тормозными роликами фрикционного и магнитного типов, для описания которых используются экспериментальные данные о величине коэффициента трения, температуры на поверхности контакта, а также коэффициента магнитной вязкости.

4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования для обоснования возможности использования разработанных математических моделей и основанных на них методов и методик расчета.

5. Разработан метод выбора рациональных параметров гравитационного роликового конвейера стеллажа с элементами безопасности, основанный на применении разработанных методик и математических моделей.

6. Выполнены теоретические исследования по определению рациональных параметров устройства остановки и разделения паллет, а также роликового полотна гравитационного конвейера стеллажа при использовании паллет массой до 1500 кг и разработанных конструкций тормозных роликов фрикционного и магнитного типов.

Предметом исследования являются конструктивные параметры устройства остановки и разделения паллет, а также гравитационного роликового конвейера стеллажа, обеспечивающие безопасное движение паллет.

Объектом исследования является роликовый конвейер гравитационного стеллажа для паллет, оснащенный устройством остановки и разделения паллет и тормозными роликами фрикционного и магнитного типов.

Научная новизна работы заключается в разработке совокупности методов, методик и математических моделей для выбора рациональных параметров гравитационного роликового конвейера стеллажа, а также его элементов безопасности (тормозного ролика и устройства остановки и разделения паллет):

1. Разработана математическая модель процесса взаимодействия паллеты с ненагруженным несущим роликом, отличающаяся учетом его жесткости и позволяющая определить сопротивление передвижению паллеты по роликовому полотну гравитационного конвейера стеллажа.

2. Разработана математическая модель группового движения паллет на гравитационном роликовом конвейере стеллажа, отличающаяся учетом количества тормозных роликов и паллет в группе и позволяющая определить скорость установившегося движения группы паллет при использовании тормозных роликов фрикционного и магнитного типов.

3. Разработана математическая модель ударного взаимодействия групп паллет с упором устройства остановки и разделения паллет, отличающаяся учетом группового движения, и позволяющая определить допустимую скорость движения паллет из условия работоспособности упора устройства остановки и разделения паллет с учетом его конструктивных параметров и материала изготовления.

4. Разработан метод расчета динамических процессов, возникающих при движении паллеты по роликовому конвейеру гравитационного стеллажа, основанный на математических моделях взаимодействия паллеты с тормозными роликами различных конструктивных исполнений и отличающийся учетом

раздельного и совместного движения паллеты и тормозного ролика при их взаимодействии.

5. Разработан метод выбора рациональных параметров гравитационного роликового конвейера стеллажа, обеспечивающий разомкнутое движение паллет и неперевышение ими допустимых скоростей, и отличающийся учетом режимов работы конвейера и группового характера движения паллет.

6. Получены новые результаты теоретических исследований по определению рациональных параметров роликового конвейера гравитационного стеллажа для паллет, позволяющих обеспечить безопасность движения как одной паллеты, так и группы паллет массой до 1500 кг при использовании тормозных роликов фрикционного и магнитного типов.

Практическая значимость работы заключается:

1. В разработке методик:

1.1. Экспериментального определения жесткости несущих роликов.

1.2. Расчета шага расстановки несущих роликов из условий неперевышения их грузоподъемности, а также обеспечения устойчивого и безостановочного движения паллеты по роликовому полотну.

2. В разработке практических рекомендаций по определению допустимой скорости движения паллет при использовании деревянных поддонов размерами 1200x800 и 1200x1000 мм.

3. В расчетных зависимостях времени раздельного и совместного движения паллеты при её взаимодействии с фрикционным и магнитным тормозными роликами.

4. В разработке практических рекомендаций по созданию гравитационных роликовых конвейеров стеллажей для паллет массой до 1500 кг и используемых в их конструкции устройства остановки и разделения паллет, а также фрикционных и магнитных тормозных роликов.

5. В разработке отечественных конструкций несущего ролика, тормозных роликов различных конструктивных исполнений и устройства остановки и разделения паллет, на которые получено 10 патентов на полезную модель.

Методология и методы исследования

Основными методами исследования при решении задач, поставленных в диссертационной работе, являются методы геометрического моделирования, матричного исчисления, динамики механических систем, теории удара, сопротивления материалов, теоретической механики, теории вероятностей и математической статистики, теории трения и изнашивания, а также имитационного моделирования и экспериментального исследования.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся положения научной новизны, общие выводы и результаты исследований:

1. Математическая модель взаимодействия паллеты с ненагруженным несущим роликом, позволяющая определить сопротивление передвижению паллеты по роликовому полотну гравитационного конвейера стеллажа.

2. Математические модели группового движения паллет и ударного взаимодействия групп паллет с упором устройства остановки и разделения паллет, позволяющие определить допустимую скорость движения как одной паллеты, так и группы паллет.

3. Метод расчета динамических процессов, возникающих при движении паллеты по роликовому конвейеру гравитационного стеллажа, позволяющий определить скорости движения паллеты и тормозного ролика как при их совместном, так и раздельном движении.

4. Метод выбора рациональных параметров гравитационного роликового конвейера стеллажа, отличающийся учетом режимов его работы и группового характера движения паллет.

5. Результаты теоретических исследований по определению рациональных параметров роликового конвейера гравитационного стеллажа для паллет массой до 1500 кг при использовании тормозных роликов фрикционных и магнитного типов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов подтверждается применением апробированных законов математики, механики, теории сопротивления материалов, теории механизмов и машин, теории трения и изнашивания, а также результатами экспериментальных исследований.

Реализация результатов работы

Разработанные методы и методики расчета использованы в проектно-конструкторской деятельности компаний ООО «ИТЦ «КРОС», ООО «Скаматик», ООО «Техновик». Теоретические положения и практические результаты работы используются при обучении студентов на кафедре подъемно-транспортных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на: I Всероссийской заочной научно-практической конференции «Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация», Забайкальский государственный университет. (Чита, 2016); Международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем», Севастопольский государственный университет. (Севастополь, 2017-2025); III Международной научно-практической конференции «Фундаментальные основы механики». (Новокузнецк, 2017); XI Международной научно-практической конференции «Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук». (Санкт-Петербург, 2017); XII Международной научно-технической конференции «Трибология – Машиностроению», Институт машиноведения им. А.А. Благонравова. (Москва, 2018); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (*International Conference on Industrial Engineering*), Московский политехнический университет. (Москва, 2018); XII Европейской конференции по трибологии (7-th European Conference on Tribology), Белостокский технический университет. (Белосток, 2019); Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2019)», Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. (Гомель, 2019); Всероссийской научно-практической конференции «Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. (Екатеринбург, 2019); Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2021), Севастопольский государственный

университет. (Севастополь, 2021); Международном симпозиуме по трибологии YARTRIBNORD 2021, Ярославский государственный технический университет. (Ярославль, 2021); Международном форуме «Инновационное развитие подъёмно-транспортного машиностроения «Подъёмная сила», МГТУ им. Н.Э. Баумана. (Москва, 2024-2025); XXII-XXIX Московской международной межвузовской научно-технической конференции «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы». (Москва, 2016-2025); научно-технических заседаниях кафедры подъемно-транспортных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. (Москва, 2020-2025).

Личный вклад автора

Изложенные в диссертационной работе методы и математические модели, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований получены лично соискателем в процессе научной деятельности. На все заимствованные материалы и работы, выполненные в соавторстве, имеются соответствующие ссылки.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 37 научных работ, в числе которых 2 монографии, 15 научных статей в журналах из перечня ВАК РФ, 9 научных работ в журналах, индексируемых в Scopus, 10 патентов на полезную модель. Общий объем публикаций 14,9 п.л.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 267 страницах машинописного текста, содержит 121 рисунок, 57 таблиц, список литературы из 171 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертации, приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулированы цель и задачи работы, отражены положения научной новизны, выносимые на защиту, а также приведены данные о структуре и объеме работы.

В **первой главе** приведен анализ конструкций гравитационных стеллажей для паллет (ГСП), состоящих из металлоконструкции и гравитационного роликового конвейера (ГРК) с устройствами безопасности: устройством остановки и разделения паллет (УОРП) и тормозных роликов (ТР); проведены обзор и анализ применения существующих методик расчета неприводных роликовых конвейеров применительно к ГРК стеллажей и конструкций УОРП и ТР, а также исследований тормозных устройств применительно к ГРК стеллажей.

ГСП состоит из статической металлоконструкции и ГРК стеллажа, который установлен под углом $1,7-2,8^\circ$ и состоит из загрузочной, центральных и разгрузочной секций. На центральных секциях для ограничения скорости движения паллет установлены ТР, а на разгрузочной секции – ТР и УОРП (Рис. 1). Каждый ГРК стеллажа предполагает хранение паллет одного наименования и называется каналом гравитационного стеллажа. На балке ГСП, как правило, располагается от 1 до 3-х каналов.

В настоящее время на складах паллетного хранения в РФ эксплуатируются ГСП только зарубежного производства, в основном европейских производителей: BITO-Lagertechnik GmbH (ФРГ), Interroll Holding AG (Швейцария), Nedcon Silesia Sp. z o.o. (Польша), Saar Lagertechnik GmbH (ФРГ), SSI SCHAEFER (ФРГ) и др.

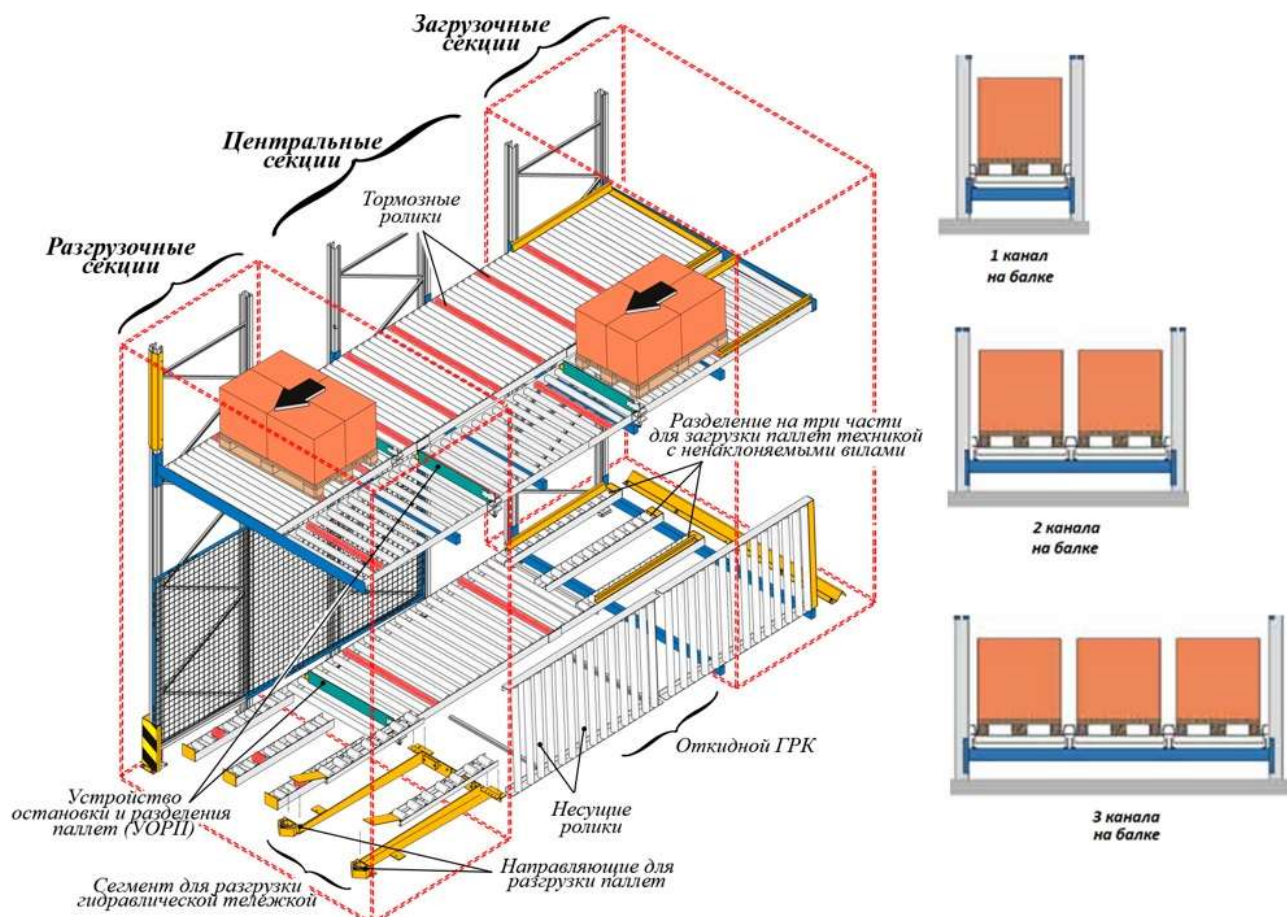


Рис. 1 – Конструкция гравитационного стеллажа для паллет

Основными причинами, сдерживающими выпуск отечественных ГСП, являются отсутствие научно обоснованных методов и методик расчета параметров ГРК стеллажа и его элементов безопасности (ТР и УОРП). Поэтому наибольший интерес представляет исследование ГРК, используемых в ГСП, а также его основных элементов безопасности – УОРП и ТР. Исследованиям ГРК посвящены работы Ивановского К.Е., Раковщика А.Н. и Цоглина А.Н., Зенкова Р.Л. и Колобова Л.Н., Темиртасова О.А., Siddhartha Ray, M. Piskulic, R. Vujanac и др. Следует отметить работу Кузнецова А.А., наиболее полно описывающую сопротивление вращению роликов с учетом перекоса колец подшипника, погрешности изготовления и др.

Высокая скорость движения грузов по ГРК является главным источником опасности не только для эксплуатации складской техники и металлоконструкции стеллажа, но также для транспортируемого груза и персонала. Поэтому необходимость ограничения скорости движения груза отмечена в правилах охраны труда при эксплуатации конвейерного транспорта, однако допустимых значений не приведено.

Анализ опубликованных работ показал, что существующие методики определения сопротивления грузов по ГРК не учитывают наличие ТР и возникающую тормозную силу при движении по нему паллеты, а также жесткость несущих роликов (НР). При этом указанные в рекомендациях мероприятия по уменьшению значений сопротивления от неровности роликового полотна на практике не выполняются, однако при этом сохраняется безостановочное движение паллеты по ГРК стеллажа. Несмотря на достаточно полное изложение методики выбора шага расстановки НР из условия устойчивости, она не учитывает жесткость НР ГРК стеллажа и возникающее сопротивление от неровности роликового

полотна.

Наибольшую сложность в теории ГРК представляет исследование совместного движения роликов и грузов. Анализ исследований движения грузов по ГРК не позволяет использовать существующие методики при расчете и прогнозировании безопасного движения паллет на ГРК стеллажа по причине не учета наличия в его конструкции элементов безопасности - ТР и УОРП.

Анализ конструкций ТР показал, что в более чем в 95% случаев в качестве ТР используются фрикционный тормозной ролик (ФР) и магнитный тормозной ролик (МР), состоящие из планетарного мультипликатора и тормозной системы фрикционного или вихретокового типа. Для разработки методов расчета ГРК стеллажа и определения его параметров необходимо учитывать особенности конструкции ТР и принцип действия его тормоза.

Срок службы ФР во многом определяется ресурсом его пары трения. Следовательно, одной из задач является выбор материалов пары трения ФР, способных увеличить его срок службы. Для этого необходимо проведение дополнительных исследований по определению режимов работы пары трения ФР.

Исследованиями фрикционных материалов применительно к тормозам подъемно-транспортных машин занимались научные школы МГТУ им. Н.Э. Баумана (Александров М.П., Носко А.Л., Ромашко А.М., Федосеев В.Н., Хурцидзе Т.В. и др.), а также Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, ВНИИПТМАШ и др. Основное влияние на фрикционно-износные характеристики фрикционной пары оказывает температурные параметры трения. Исследованиям температурного режима работы фрикционных накладок и тепловым расчетам тормозов ПТМ посвящены работы Носко А.Л., Носко А.П., Ромашко А.М. и др. Окончательные сведения о работоспособности проектируемого фрикционного узла ФР могут быть получены только по результатам лабораторных и стендовых испытаний.

Исследованиями вихретокового торможения занимались Озолин А.Ю., Скубов Д.Ю., Штукин Л.В., Ободовский Ю.В., Karakoc Kerem, Park Edward J, E. Simeu, D. Georges, K. Lee, K. Park и др. Анализ исследований в области вихретокового торможения показал, что при разработке математических моделей (ММ) и методик расчета МР вихретоковый тормоз нужно рассматривать как элемент линейного вязкого трения с коэффициентом магнитной вязкости, для определения значений которого необходимо проведение экспериментальных исследований.

По результатам проведенного обзора и анализа исследований сформулированы задачи, направленные на достижение цели работы.

Во **второй главе** разработаны: (ММ) процесса взаимодействия паллеты и ненагруженного НР с учетом его жесткости, методика экспериментального определения жесткости НР, а также методика расчета шага расстановки НР ГРК стеллажа, учитывающая несущую способность НР, его жесткость и устойчивость движения паллеты по НР.

Существующие методики расчета шага расстановки НР ГРК стеллажа основаны на определении несущей способности НР, угла перекоса колец его подшипниковых узлов и устойчивости груза при его движении по НР, при этом не учитывают жесткость НР и её влияние на движение паллеты по роликовому полотну ГРК.

Под действием силы тяжести паллеты нагруженные НР смещаются на величину вертикального перемещения Δh (Рис. 2). При взаимодействии паллеты с

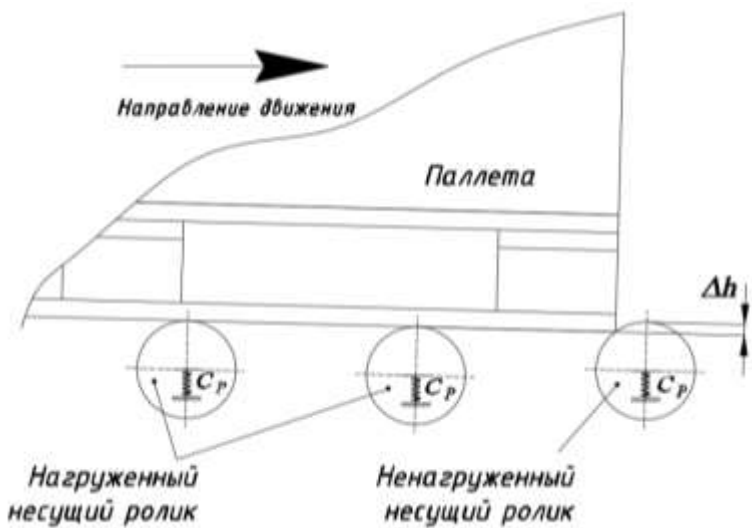


Рис. 2 – Движение паллеты по НР с жесткостью c_p

ненагруженным НР она преодолевает дополнительное сопротивление передвижению, которое зависит от жесткости c_p опор НР.

При условии равномерного шага $l_{НР}$ расстановки НР, можно считать, что величина Δh одинакова, зависит от кол-ва $n_{НР}$ НР под паллетой и массы M паллеты и определяется как:

$$\Delta h = G / (n_{НР} \cdot c_p),$$

где $G = Mg$ – сила тяжести паллеты, Н.

При взаимодействии паллеты с ненагруженным НР с

жесткостью c_p (Рис. 3) точка A их контакта перемещается в точку A' на величину x ($0 \leq x \leq t_0$), а НР смещается в вертикальной плоскости на величину y ($0 \leq y \leq \Delta h$). При этом возникает сила упругости НР $F_{упр} = c_p \cdot y$, а на паллету действует сила $W_{НР}$ сопротивления её передвижению, которая рассчитывается из уравнения равновесия НР относительно оси его поворота:

$$W_{НР} \cdot (D_{НР}/2 - \Delta h + y) = F_{упр} \cdot (t_0 - x),$$

где $D_{НР}$ – диаметр НР, м; t_0 – расстояние от оси НР до точки A контакта паллеты с НР, м.

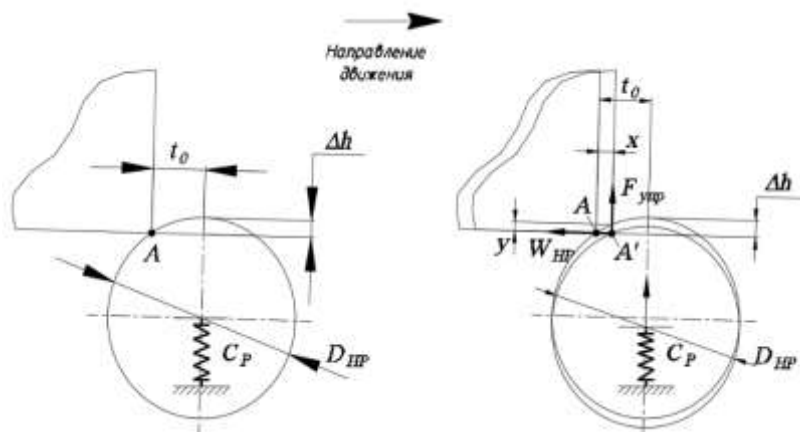


Рис. 3 – Расчетная схема взаимодействия паллеты с ненагруженным НР

Проводя дальнейшие вычисления, сила $W_{НР}$ сопротивления передвижению паллеты при её взаимодействии с ненагруженным НР определяется из выражения

$$\begin{cases} W_{НР} = c_p \left[(t_0 - x) - (D_{НР}/2 - \Delta h)(t_0 - x) / \sqrt{(D_{НР}/2 - \Delta h)^2 + 2xt_0 - x^2} \right] \\ \Delta h = G / (n_{НР} \cdot c_p) \\ t_0 = \sqrt{\Delta h \cdot (D_{НР} - \Delta h)} \end{cases}.$$

Полученное выражение показывает, что сила $W_{НР}$ сопротивления передвижению паллеты при её взаимодействии с ненагруженным НР и кол-во $n_{НР}$ НР под паллетой зависят от жесткости c_p НР, что требует разработки методики её экспериментального определения.

Экспериментальные исследования жесткости НР проводились в лаборатории

кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э. Баумана на универсальной испытательной машине фирмы Galdabini (Италия) серии Quasar 50 настольного исполнения с разработанной роликовой опорой. Общий вид испытательной машины и роликовой опоры представлены на Рис. 4. В качестве опытных образцов использовались НР со сплошной осью и на полуосях (Рис. 5).



Рис. 4 – Общий вид испытательной машины Quasar 50 и роликовой опоры в сборе
1 – основание, 2 – НР, 3 – ось/полуось, 4 – подвижная балка

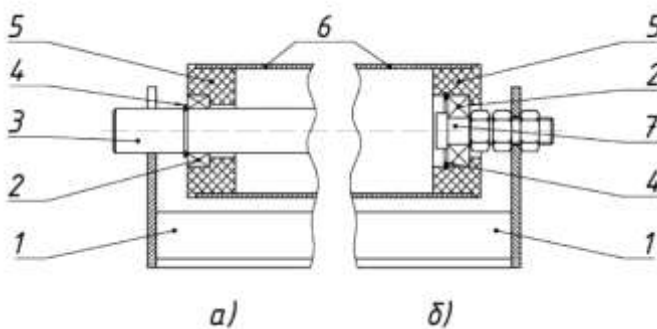


Рис. 5 – Опытный образец НР со сплошной осью (а) и на полуосях (б)

1 – основание роликовой опоры, 2 – подшипник, 3 – ось, 4 – стопорное кольцо, 5 – корпус подшипника, 6 – обечайка, 7 – полуось

Экспериментально установлено, что для НР со сплошной осью в зависимости от нагрузки на НР можно выделить два участка различной жесткости: до нагрузки



Рис. 6 – Сила сопротивления W_{HP} передвижению паллеты при её взаимодействии с ненагруженным НР диаметром $D_{HP} = 60$ мм и жесткостью $c_p = 2000$ Н/мм для $\Delta h = 1$ мм (1) и 2 мм (2)

670 Н жесткость НР составляет 1358 Н/мм; в диапазоне нагрузок от 670 Н до 1500 Н – 2230 Н/мм; для НР с полуосями жесткость НР составляет 2048 Н/мм на всем диапазоне нагрузок.

В качестве примера на Рис. 6 представлены результаты расчета силы W_{HP} сопротивления передвижению паллеты при её взаимодействии с НР диаметром $D_{HP} = 60$ мм, жесткостью $c_p = 2000$ Н/мм и $\Delta h = 1; 2$ мм. Анализ полученных результатов расчета показал, что сила W_{HP} возрастает от 0 Н (начало контакта паллеты с НР), достигает

максимума, а затем убывает до 0 Н. Значение максимума $W_{HP_{MAX}}$ силы сопротивления передвижению паллеты при её взаимодействии с ненагруженным НР определяется выражениями

$$\begin{cases} x_{MAX} = \sqrt{\Delta h \cdot (D_{HP} - \Delta h)} - \sqrt{D_{HP}^2/4 - [D_{HP}^2/4 \cdot (D_{HP}/2 - \Delta h)]^{2/3}} \\ W_{HP_{MAX}} \approx 0,38 \cdot c_p \cdot \Delta h \cdot \sqrt{\Delta h \cdot (D_{HP} - \Delta h)} / (D_{HP}/2 - 0,34 \cdot \Delta h) \end{cases}$$

Тогда максимальное сопротивление передвижению паллеты по роликовому полотну определяется с учетом трения качения паллеты по НР, сопротивления в опорах НР и сопротивления $W_{HP_{MAX}}$

$$W_{сум_{MAX}} = G \cdot w + 0,38 \cdot c_p \cdot \Delta h \cdot \sqrt{\Delta h \cdot (D_{HP} - \Delta h)} / (D_{HP}/2 - 0,34 \cdot \Delta h),$$

где $w = f_0 \cdot d_{\Pi} / D_{HP} + 2K / D_{HP}$ – коэффициент сопротивления передвижению паллеты без учета жесткости НР (f_0 – сила трения скольжения в опорах ролика; d_{Π} – диаметр отверстия внутреннего кольца подшипника, м; K – коэффициент трения качения поддона по НР, м).

Для обеспечения безостановочного движения паллеты на ГРК стеллажа по роликовому полотну необходимо выполнение условия $G \cdot \tan \alpha > W_{сум_{MAX}}$ или с учетом полученных результатов исследований:

$$G \cdot (\tan \alpha - w) > 0,38 \cdot c_p \cdot \Delta h \cdot \sqrt{\Delta h \cdot (D_{HP} - \Delta h)} / (D_{HP}/2 - 0,34 \cdot \Delta h).$$

Тогда шаг l_{HP} расстановки НР ГРК стеллажа для паллет (при условии равномерного шага расстановки $l_{HP} = l_{пал} / n_{HP}$, где $l_{пал}$ – длина паллеты, м) определяется количеством n_{HP} НР, исходя из условий: неперевышения грузоподъемности N_{HP} НР (У1); устойчивости паллеты высотой h_{Π} при её движении по НР (У2) и обеспечения безостановочного движения паллеты по НР (У3). Выражения для определения количества НР для каждого из условий приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Выражения для определения количества НР ГРК стеллажа

Условие	Выражение
У1 - Неперевышение грузоподъемности N_{HP} НР	$n_{HP} \geq \left\lceil \frac{G}{N_{HP}} \right\rceil$
У2 - Устойчивость паллеты при её движении по НР (f_{Π} – коэффициент трения поддона по НР)	$n_{HP} \geq \left\lceil 2,22 + 2,44 \frac{f_{\Pi} h_{\Pi}}{l_{пал}} \right\rceil$
У3 - Обеспечение безостановочного движения паллеты по НР ($n_{HP} \in \mathbb{N}$, полученное значение n_{HP} необходимо увеличить до ближайшего целого числа)	$(\tan \alpha - w) > \frac{0,38 \cdot \sqrt{\frac{G}{n_{HP} \cdot c_p}} \cdot \left(D_{HP} - \frac{G}{n_{HP} \cdot c_p}\right)}{n_{HP} \cdot \left(\frac{D_{HP}}{2} - 0,34 \cdot \frac{G}{n_{HP} \cdot c_p}\right)}$

Результаты сравнительного анализа расчета количества $n_{\text{НР}}$ НР ГРК стеллажей, полученные по трем условиям во всем диапазоне масс паллет и высоты паллеты, представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ количества $n_{\text{НР}}$ НР от массы M паллеты и высоты $h_{\text{П}}$ паллеты по трем условиям

Масса M паллеты	Высота $h_{\text{П}}$ паллеты	Условия	Кол-во НР $n_{\text{НР}}$
до 233 кг	до 767 мм	У2 и У3	4
	от 767 до 1750 мм	У2	4
	от 1750 до 2734 мм	У2	5
	от 2734 до 3000 мм	У2	6
от 233 до 551 кг	до 767 мм	У3	4
	от 767 до 1750 мм	У2 и У3	4
	от 1750 до 2734 мм	У2	5
	от 2734 до 3000 мм	У2	6
от 551 до 815 кг	до 1750	У3	5
	от 1750 до 2734 мм	У2 и У3	5
	от 2734 до 3000 мм	У2	6
от 815 до 1019 кг	до 1750 мм	У1 и У3	5
	от 1750 до 2734 мм	У1, У2 и У3	5
	от 2734 до 3000 мм	У2	6
от 1019 до 1074 кг	до 2734 мм	У1	6
	от 2734 до 3000 мм	У1 и У2	6
от 1074 до 1223 кг	до 2734 мм	У1 и У3	6
	от 2734 до 3000 мм	У1, У2 и У3	6
от 1223 до 1427 кг	до 3000 мм	У1	7
от 1427 до 1500 кг	до 3000 мм	У1	8

Расчетами установлена невозможность определения преобладания только одного условия при определении шага расстановки НР. На практике высота паллеты может изменяться, поэтому при расчете количества НР наиболее рационально в качестве основного использовать условие устойчивости паллеты при её движении по НР, а выполнение остальных условий проверять дополнительно расчетом. В приведенном выше примере расчета шага расстановки НР устойчивость паллеты всегда обеспечивается при $n_{\text{НР}} = 6$. Выполнение других условий проверяется в зависимости от массы паллеты, конструкции НР (грузоподъемности $N_{\text{НР}}$, диаметра $D_{\text{НР}}$ и жесткости c_p), а также уклона $\tan \alpha$ роликового полотна ГРК стеллажа и коэффициента w сопротивления передвижению паллеты без учета жесткости НР.

В третьей главе проведен анализ этапов движения паллет на ГРК стеллажа при его загрузке и разгрузке и предложен новый подход к исследованию ГРК стеллажа, основанный на учете группового движения паллет; представлена ММ ударного взаимодействия группы паллет и упора УОРП и основанная на ней методика определения допустимой скорости движения группы паллет на ГРК стеллажа в зависимости от размера группы; проведены теоретические исследования влияния материала поддона, сравнительный анализ применения стальных различных марок для упора УОРП и влияния геометрических параметров упора УОРП на допустимую скорость движения паллет по ГРК стеллажа.

Установлено, что необходимым условием работоспособности ГРК стеллажа является превышение шага $L_{\text{ТР}}$ расстановки ТР длины $l_{\text{пал}}$ паллеты (будет показано далее).

Анализ движения паллет на ГРК (при условии, что шаг $L_{\text{ТР}} > l_{\text{пал}}$) показал:

1. Движение паллеты *при загрузке* ГРК стеллажа состоит из четырех этапов: движение по НР между ТР; контакт паллеты с ТР с начальной скоростью $V_{\text{Н}}$ и последующее торможение паллеты до скорости $V_{\text{уст}}$ её установившегося движения по ТР; равномерное движение паллеты со скоростью $V_{\text{уст}}$ её установившегося движения по ТР; далее цикл повторяется до момента удара первой загруженной паллеты в концевой упор ГРК стеллажа или её наезда на лапу УОРП.

2. Движение паллет *при разгрузке* ГРК стеллажа носит групповой характер, при котором происходит: разгон группы n паллет на группе m ТР; последующее установившееся движение группы из n паллет по группе из m ТР; разделение группы паллет на одиночные паллеты, движущиеся по своему ТР. Пример группового движения для ГРК стеллажа с 5-ю паллетами при $l_{\text{пал}}=1200$ мм, $L_{\text{ТР}}=1350$ мм приведен на Рис. 7.

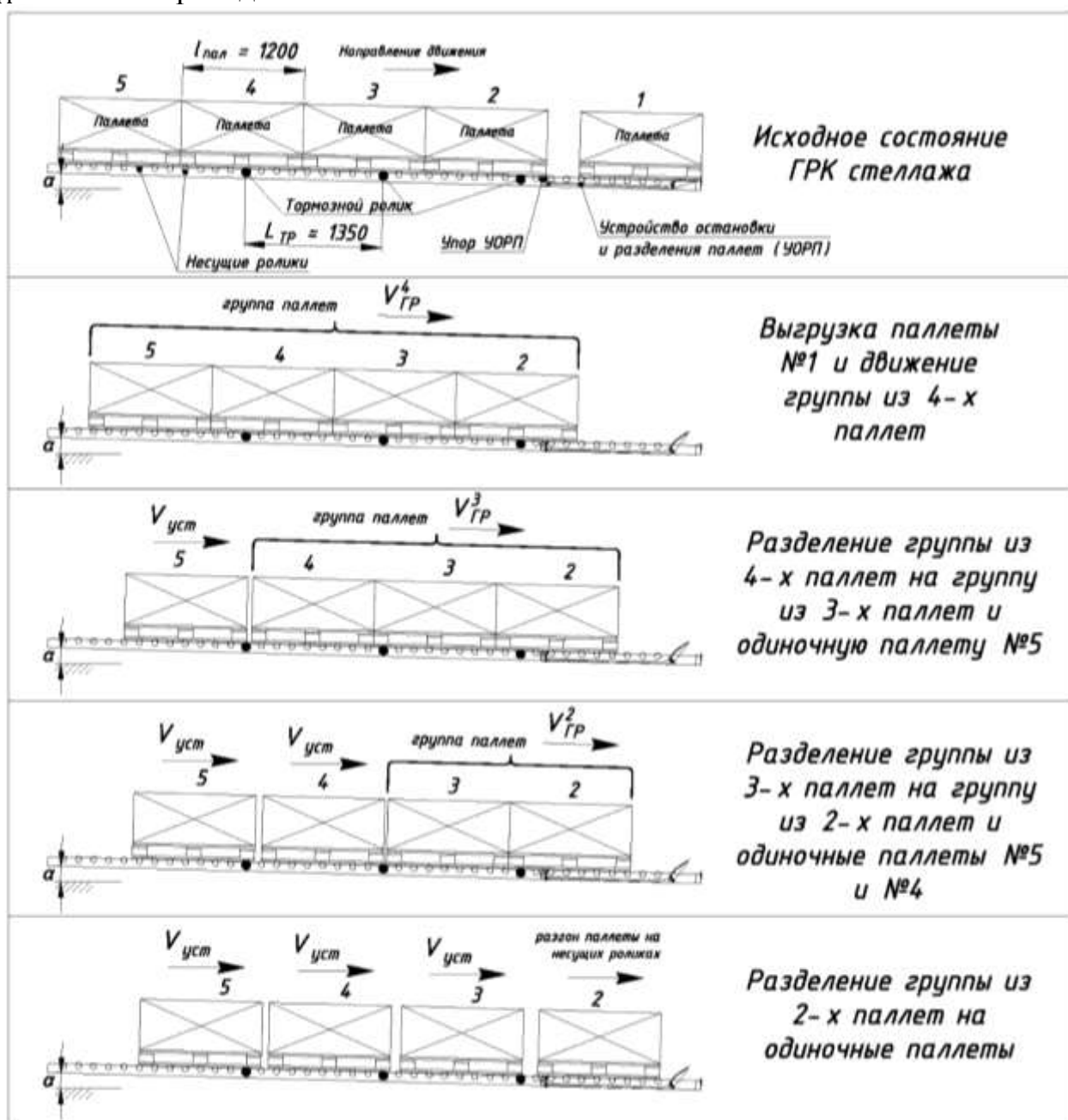


Рис. 7. Групповое движение ГРК с 5-ю паллетами при $l_{\text{пал}}=1200$ мм, $L_{\text{ТР}}=1350$ мм

Из приведенного примера видно, что при $L_{\text{ТР}} \leq l_{\text{пал}}$ не будет происходить разделения группы паллет на одиночные из-за их установившегося движения на ТР, что приведёт к удару группы паллет в упор УОРП и потере его несущей способности. Следовательно, необходимым условием работоспособности ГРК стеллажа является превышение шага $L_{\text{ТР}}$ расстановки ТР длины $l_{\text{пал}}$ паллеты.

Разработана ММ группового движения паллет по ФР и МР. Скорость установившегося движения группы n паллет по группе $m_{\text{ФР}}$ ФР и группе $m_{\text{МР}}$ МР определяется выражениями

$$V_{(m_{\text{ФР}})}^{(n)} = \sqrt{(V_{1\text{ФР}})^2 \cdot n/m_{\text{ФР}} - V_0^2 \cdot (n/m_{\text{ФР}} - 1)},$$

$$V_{(m_{\text{МР}})}^{(n)} = V_{1\text{МР}} \cdot n/m_{\text{МР}},$$

где $V_{1\text{ФР}}, V_{1\text{МР}}$ – скорость установившегося движения одной паллеты по ФР и МР соответственно (Глава 4), м/с; V_0 – скорость срабатывания тормоза ФР.

На Рис. 8 и Рис. 9 представлены зависимости скорости установившегося движения группы паллет при $m_{\text{ФР}} = n - 1$ и $m_{\text{МР}} = n - 1$.

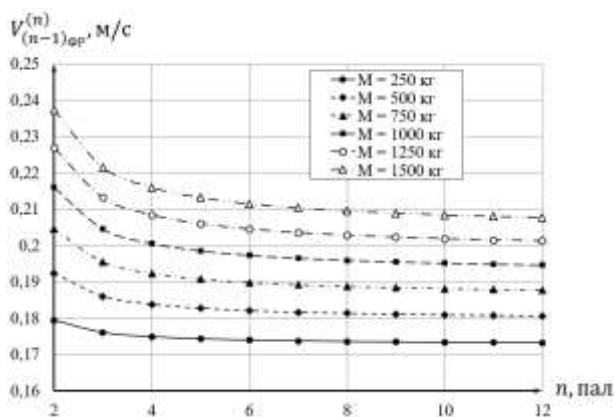


Рис. 8 – Скорость установившегося движения $V_{(n-1)\text{ФР}}^{(n)}$ группы n паллет по $(n - 1)$ ФР в зависимости от количества n паллет в группе и массы M паллеты

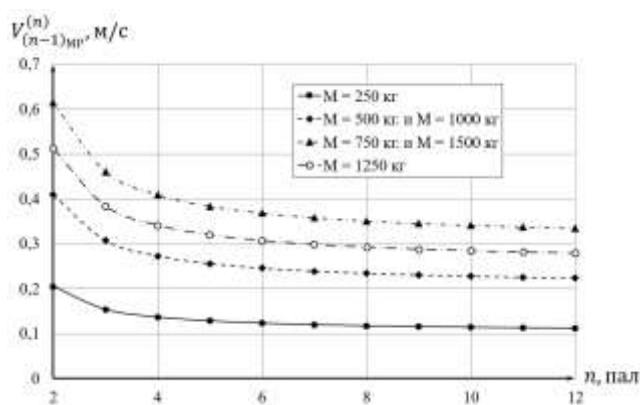


Рис. 9 – Скорость установившегося движения $V_{(n-1)\text{МР}}^{(n)}$ группы n паллет по $(n - 1)$ МР в зависимости от количества n паллет в группе и массы M паллеты

Установлено, что скорость установившегося движения группы паллет всегда превышает скорость установившегося движения одной паллеты, а скорость $V_{(n-1)\text{ФР}}^{(n)}$ установившегося движения группы n паллет по $(n - 1)$ ФР и МР определяется выражениями

$$V_{(n-1)\text{ФР}}^{(n)} = K_{(n-1)\text{ФР}}^{(n)} \cdot V_{1\text{ФР}}, \quad n > 1,$$

$$V_{(n-1)\text{МР}}^{(n)} = K_{(n-1)\text{МР}}^{(n)} \cdot V_{1\text{МР}}, \quad n > 1,$$

где $K_{(n-1)\text{ФР}}^{(n)}, K_{(n-1)\text{МР}}^{(n)}$ – коэффициенты скорости группы n паллет по $(n - 1)$ ФР и МР соответственно.

Анализ результатов расчетов показал, что коэффициенты $K_{(n-1)\text{ФР}}^{(n)}$ и $K_{(n-1)\text{МР}}^{(n)}$ принимают максимальные значения для движения группы из двух паллет по одному ФР и МР и составляют 1,16 и 2 соответственно.

Представлена методика расчета допустимой скорости движения группы паллет, основанная на допустимой скорости $[V_1]$ удара одной паллеты в упор УОРП и закона сохранения импульса.

Рассмотрим случай, при котором на ГРК стеллажа происходит движение нескольких групп паллет. При разделении каждой из исходных групп паллет формируются новые группы, движение которых в общем случае приводит либо к групповому удару в упор УОРП, либо столкновению движущейся группы с группой паллет, остановленных упором УОРП. Рассмотрим в общем виде удар группы $n_{\text{пал}}$ движущихся паллет со скоростью $V_{\text{гр}}^{(n_{\text{пал}})}$ в группу $N_{\text{пал}}$ неподвижных паллет (Рис. 10). При этом $n_{\text{пал}} > 2$, а $N_{\text{пал}} \geq 0$, $n_{\text{пал}}, N_{\text{пал}} \in \mathbb{N}$. Ситуация, при которой $N_{\text{пал}} = 0$ описывает удар группы $n_{\text{пал}}$ движущихся паллет в неподвижный упор УОРП.

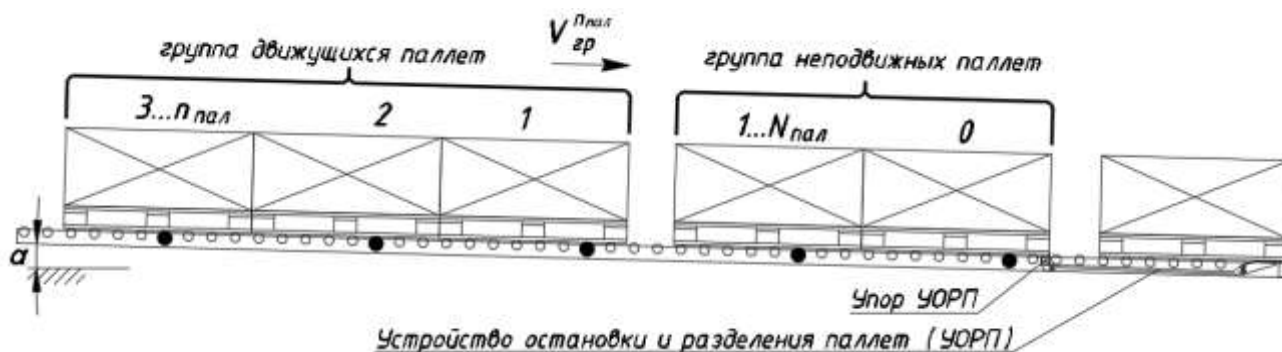


Рис. 10 – Удар группы $n_{\text{пал}}$ движущихся паллет со скоростью $V_{\text{гр}}^{(n_{\text{пал}})}$ в группу $N_{\text{пал}}$ неподвижных паллет

В процессе остановки паллеты упором УОРП имеет место нецентральный удар, в результате которого происходят деформации изгиба и кручения упора УОРП и сжатия поддона. При прохождении паллеты 1 (Рис. 11) упор УОРП при отсутствии вертикальной нагрузки на его педаль свободно вращается вокруг своей оси A , не препятствуя движению паллеты 1. При наличии вертикальной нагрузки от паллеты 1, действующей на педаль УОРП, его упор блокируется и препятствует прохождению паллеты 2, воспринимая при этом допустимую ударную нагрузку $[q]$.

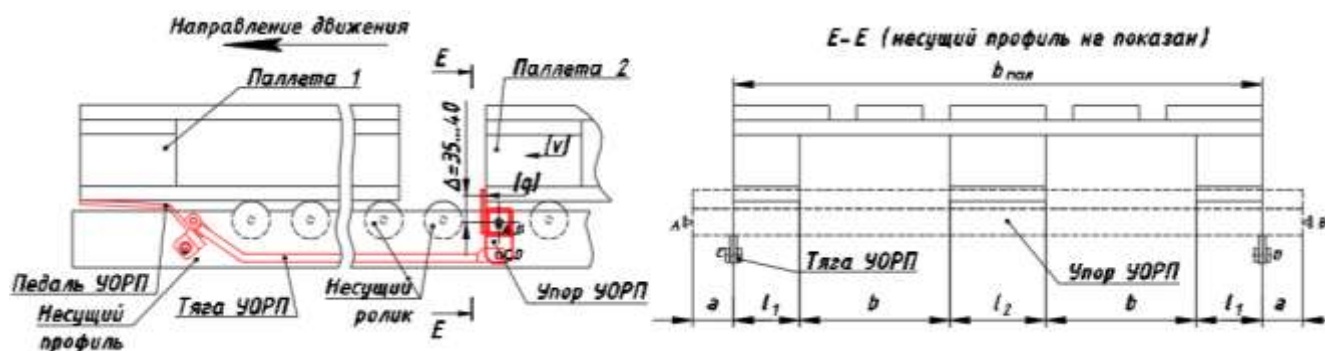


Рис. 11 – Схема упора УОРП

Для расчета ударного взаимодействия паллеты и упора УОРП с учетом принятых допущений о незначительности угла наклона роликового полотна ГРК стеллажа (не более $2-3^\circ$) получено выражение для определения допустимой скорости движения паллеты на ГРК стеллажа

$$[V_1] = [\sigma] \cdot k_{\text{п}} \sqrt{\frac{2}{M} \cdot \left(\frac{K_{\text{изг}}}{E \cdot I_X} + \frac{K_{\text{кр}}}{G \cdot I_K} \right) / \left[\left(\frac{K_{\text{Ми}}}{W_X} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{\text{МК}}}{W_K} \right)^2 \right]},$$

$$k_{\text{п}} = \sqrt{1 + K_{\text{пал}}^{\text{сж}} / \left[K_{\text{уп}}^{\text{изг}} / (E \cdot I_X) + K_{\text{уп}}^{\text{кр}} / (G \cdot I_K) \right]},$$

где $[\sigma]$ – допустимые напряжения материала упора УОРП, Па; k_{Π} – коэффициент материала поддона; M – масса паллеты, кг; E, G – модуль упругости и сдвига материала упора УОРП, Па; I_X – момент инерции сечения упора УОРП относительно оси X ; I_K – геометрический фактор жесткости сечения при кручении, м^4 ; $K_{\text{уп}}^{\text{изг}}$, $K_{\text{уп}}^{\text{кр}}$ – коэффициенты потенциальной энергии деформации упора УОРП от работы изгибающих и крутящего моментов, м^5 ; W_X, W_K – момент сопротивления изгибу и кручению сечения упора УОРП, м^3 ; $K_{\text{Ми}}$, $K_{\text{МК}}$ – коэффициенты изгибающего и крутящего моментов в опасном сечении упора УОРП, м^2 , $K_{\text{пал}}^{\text{сж}}$ – коэффициент потенциальной энергии сжатия поддона, $\text{м}^3/\text{Н}$.

Для группового удара (Рис. 10) согласно закону сохранения импульса, считая удар абсолютно неупругим, а массы паллет одинаковыми:

$$M \cdot n_{\text{пал}} \cdot [V_{\text{гр}}^{(n_{\text{пал}})}] = M \cdot (N_{\text{пал}} + n_{\text{пал}}) \cdot [V_{\text{гр}}^{(N_{\text{пал}} + n_{\text{пал}})}],$$

где $[V_{\text{гр}}^{(N_{\text{пал}} + n_{\text{пал}})}]$ – допустимая скорость движения группы $(N_{\text{пал}} + n_{\text{пал}})$.

Допустимая скорость $[V_{\text{гр}}^{(n_{\text{пал}})}]$ удара группы $n_{\text{пал}}$ движущихся паллет по группе $N_{\text{пал}}$ неподвижных паллет

$$[V_{\text{гр}}^{(n_{\text{пал}})}] = [V_1] \cdot \sqrt{(N_{\text{пал}} + n_{\text{пал}})/n_{\text{пал}}},$$

где $[V_1]$ – допустимая скорость движения одной паллеты, м/с.

Тогда максимальное значение коэффициентов скорости установившегося движения $K_{(n-1)\text{ФР}}^{(n)}$ и $K_{(n-1)\text{МР}}^{(n)}$ группы n паллет по $(n-1)$ ФР и МР соответственно

$$\begin{cases} K_{(n-1)\text{ФР}}^{(n)} \leq [V_1] \sqrt{(N_{\text{пал}} + n_{\text{пал}})/(V_{1\text{ФР}} n_{\text{пал}})} \\ K_{(n-1)\text{МР}}^{(n)} \leq [V_1] \sqrt{(N_{\text{пал}} + n_{\text{пал}})/(V_{1\text{МР}} n_{\text{пал}})} \end{cases}$$

Расчетами установлено, что для материала поддона, модуль упругости которого выше 50 ГПа, коэффициент $k_{\Pi} \cong 1$, при этом для деревянного поддона $k_{\Pi} = 1,07 \dots 1,09$.

Для конструкции упора УОРП, выполненного из квадратной трубы с приваренной к ней пластиной, проведены расчетные исследования допустимой скорости движения паллеты на ГРК стеллажа, а также сравнительный анализ применения сталей различных марок для упора УОРП и влияния его геометрических параметров. Расчетами установлено, что для получения более высоких допустимых скоростей движения паллеты на ГРК стеллажа необходимо использовать углеродистую сталь 30 или 35. Однако, ввиду ограниченной свариваемости углеродистых сталей, следует отдавать предпочтения стали 09Г2С. При этом допустимая скорость движения паллет массой 1500 кг не превышает 0,25 м/с для *EUR*-поддона и 0,26 м/с для *FIN*-поддона.

Сравнительный анализ допустимой скорости движения паллеты массой $M = 1500$ кг и металлоемкости упора УОРП показал, что: при изменении толщины стенки трубы – увеличение допустимой скорости движения паллеты составляет не более 8-14% при увеличении металлоемкости упора УОРП на 92-94%; при изменении ширины полки – допустимая скорость движения паллеты возрастает на 14-20% при увеличении металлоемкости на 26-27%.

Анализ результатов расчета скорости группового удара паллет для значений параметров разработанных ФР и МР и коэффициента скорости группы $K_{(n-1)\text{ФР}}^{(n)}$ и $K_{(n-1)\text{МР}}^{(n)}$ показал, что для группы паллет максимальной массой 1500 кг каждая,

групповой удар паллет является недопустимым. Следовательно, для обеспечения безопасности движения паллет на ГРК стеллажа необходимо наличие только одной группы при разгрузке ГРК стеллажа.

В четвертой главе проведен анализ динамических процессов, возникающих при движении паллеты на ГРК стеллажа; разработаны модели взаимодействия паллеты с ФР и МР; проведен анализ продолжительности динамических процессов и скоростей движения паллеты при её взаимодействии с ФР и МР.

При взаимодействии паллеты с неподвижным НР из-за процессов разгона НР и преодоления паллетой силы сопротивления передвижению $W_{НР}$ (Глава 2), происходит снижение её скорости движения. Учитывая, что масса НР на порядок меньше массы паллеты, разгон НР будем считать мгновенным. Оценку величины снижения скорости паллеты при её взаимодействии с НР можно провести, используя закон сохранения механической энергии

$$M V_{пн}^2 (1 - k_v^2) / 2 = -A,$$

где $V_{пн}$ – скорость начала взаимодействия паллеты с НР, м/с; k_v – коэффициент потери скорости паллеты ($k_v = V_{пк} / V_{пн}$, где $V_{пк}$ – скорость паллеты после снижения); A – работа потенциальных сил, Дж.

При взаимодействии паллеты с НР жесткостью c_p в качестве потенциальной силы выступает сила упругости, работа которой при преодолении паллетой вертикального перемещения $\Delta h = G / (n_{НР} \cdot c_p)$ определяется как $A = c_p \cdot (\Delta h)^2 / 2$. Тогда коэффициент k_v потери скорости паллеты при её взаимодействии с неподвижным НР

$$k_v = \sqrt{1 - M \cdot g^2 / (V_{пн}^2 c_p n_{НР}^2)}.$$

Анализ результатов расчета показал, что коэффициент k_v приближается к единице с увеличением скорости $V_{пн}$. В области практических значений скоростей $V_{пн}$ от 0,2 до 0,3 м/с, минимальное значение составляет 0,975, что соответствует потери скорости паллеты не более чем на 2,5%. На основании полученных результатов, потерю скорости движения паллеты при её взаимодействии с НР предлагается не учитывать, считая движение паллеты равноускоренным с ускорением, определяемым по выражению $a_1 = g \cdot (\tan \alpha - w)$.

В процессе взаимодействия паллеты с неподвижным ТР можно выделить этапы раздельного и совместного движения паллеты и ТР. Общий характер зависимости линейных скоростей движения паллеты и обечайки ТР при их взаимодействии приведен на Рис. 12.

Динамический процесс раздельного движения паллеты и ТР сопровождается скольжением паллеты по его обечайке. Из-за отсутствия равномерного фрикционного контакта между паллетой и обечайкой ТР, движение паллеты по ТР является нестабильным, что, с учетом цикличности процесса взаимодействия паллеты с ТР, приводит к застреванию паллеты на ГРК стеллажа и является недопустимым. Чтобы исключить возможность застревания паллеты на ГРК стеллажа, необходимо стремиться к снижению продолжительности раздельного движения паллеты и ТР.

Динамический процесс совместного движения паллеты и ТР описывается одним уравнением динамики системы паллета-ТР из-за отсутствия проскальзывания между ними.

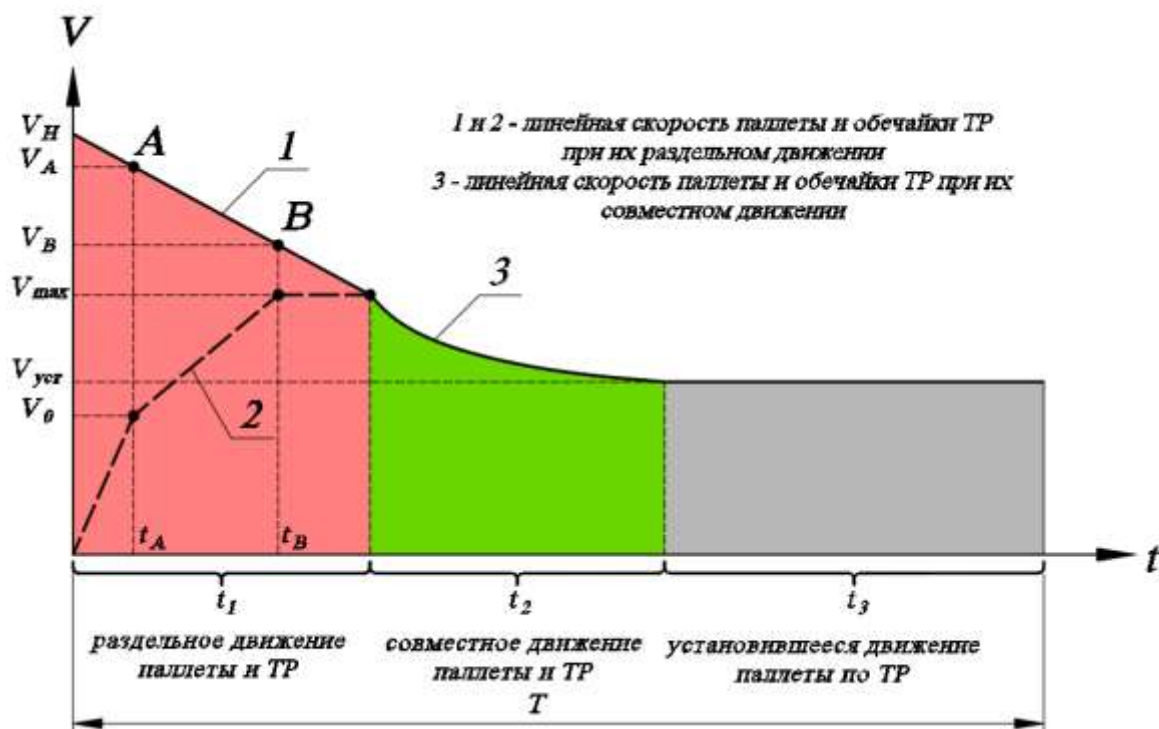


Рис. 12 – Общий характер зависимости линейных скоростей движения паллеты и обечайки ТР при их взаимодействии

V_H – скорость начала взаимодействия паллеты с неподвижным ТР; V_0 и V_A – линейная скорость обечайки ТР срабатывания тормоза ТР и соответствующая ей линейная скорость паллеты; V_{max} и V_B – максимальная линейная скорость обечайки ТР, при которой обеспечивается сцепление паллеты, и соответствующая ей линейная скорость паллеты; $V_{уст}$ – установившаяся линейная скорость обечайки ТР и паллеты; t_A и t_B – время срабатывания тормоза ТР и достижения обечайкой ТР линейной скорости V_{max} ; t_1 , t_2 , t_3 – продолжительность раздельного, совместного и установившегося движения паллеты и ТР; T – продолжительность движения паллеты по ТР.

Продолжительность раздельного движения паллеты и ТР зависит от конструкции тормоза ТР (наличие или отсутствие скорости срабатывания V_0), а также скорости V_{max} , при этом минимальная продолжительность обеспечивается при условии $t_B \leq t_1$. Общий характер зависимости линейных скоростей движения паллеты и обечайки ТР при их взаимодействии с ФР и МР приведен на Рис. 13.

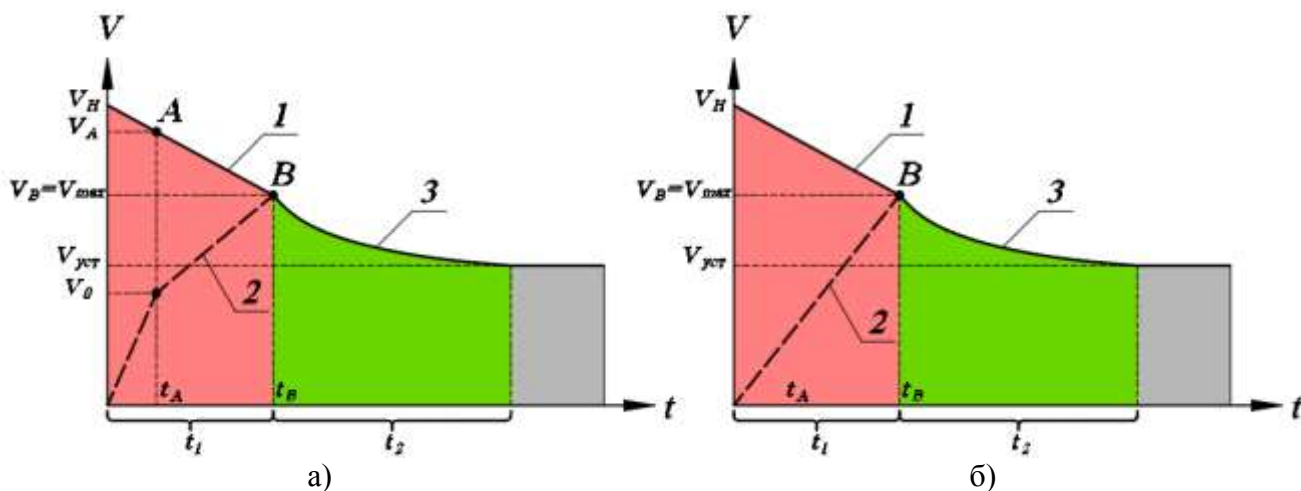


Рис. 13 – Общий характер зависимости линейных скоростей раздельного движения паллеты (1) и обечайки ТР (2) и их совместного движения (3) при взаимодействии паллеты с неподвижным ФР (а) и МР (б)

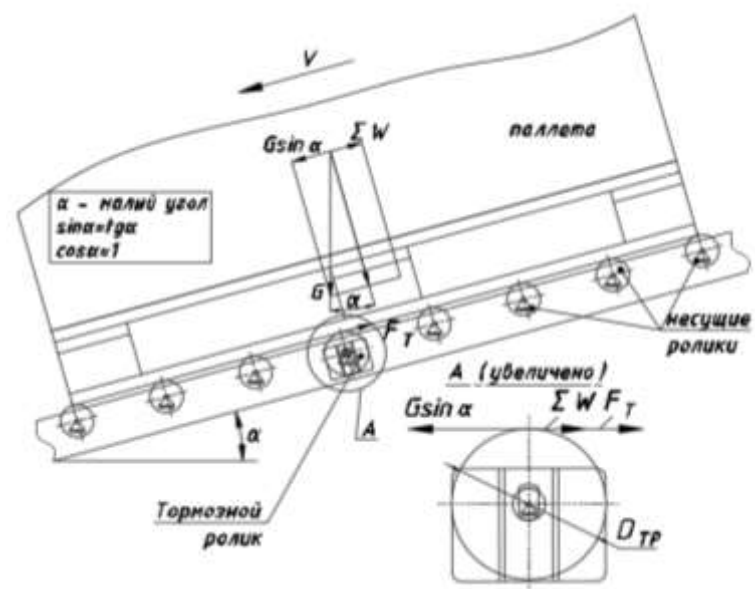


Рис. 14 – Расчетная схема ГРК стеллажа и ТР

динамики вращательного движения ФР с мультипликатором при наличии тормозной силы описывается выражением

$$J_{\text{пр}} \cdot \dot{\omega}_{\text{ФР}} = D_{\text{ФР}} \cdot F_{\text{дв}}/2 - M_{\text{T1}} - M_{\text{T2}},$$

где $J_{\text{пр}}$ – момент инерции системы, приведенный к обечайке ФР, кг·м²; $D_{\text{ФР}}$ – диаметр ФР, м; M_{T1} , M_{T2} – тормозные моменты, действующие на обечайку ФР и ступицу тормоза ФР, приведенные к его обечайке, Н·м.

Тормозные моменты M_{T1} и M_{T2} , действующие на обечайку ФР и ступицу тормоза ФР, приведенные к его обечайке:

$$M_{\text{T1}} = i_{\text{К}} \cdot N \cdot f \cdot D_{\text{ВН}}/2,$$

$$M_{\text{T2}} = i_{\text{К}} \cdot N \cdot f \cdot u_{\text{ФР}} \cdot \eta_{\text{ФР}} \cdot D_{\text{ВН}}/2,$$

где $i_{\text{К}}$ – количество тормозных колодок; N – сила нормального давления фрикционной накладки на обечайку ФР, Н; f – коэффициент трения фрикционной

накладки по обечайке ФР; $D_{\text{ВН}}$ – внутренний диаметр обечайки ФР, м; $u_{\text{ФР}}$ – передаточное отношение мультипликатора ФР; $\eta_{\text{ФР}}$ – КПД ФР.

В зависимости от характера динамического процесса движущей $F_{\text{дв}}$ силой может являться:

- сила сцепления паллеты и обечайки ФР при их раздельном движении;
- проекция силы тяжести паллеты с учетом коэффициента w сопротивления её передвижению при совместном движении с ФР.

Движущая сила, действующая на ФР:

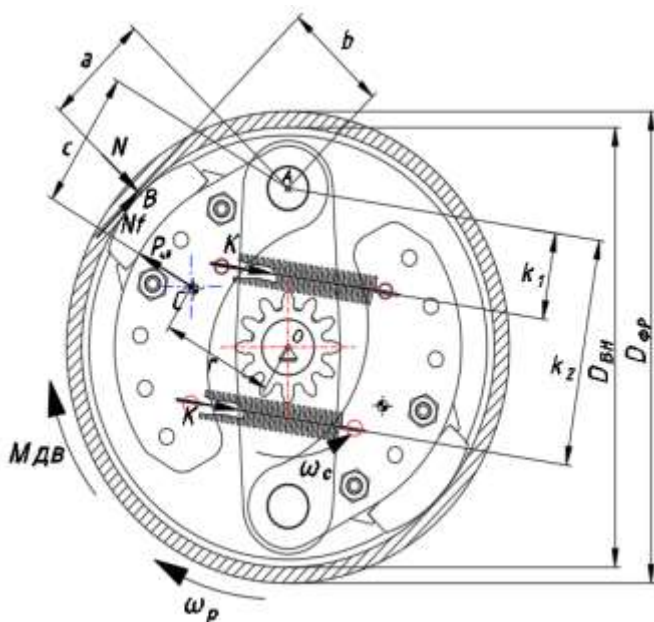


Рис. 15 – Расчетная схема центростремительного тормоза ФР

$$\begin{cases} F_{\text{дв}} = G \cdot f_{\Pi} / n_{\text{НР}} - \text{при раздельном движении паллеты и ФР} \\ F_{\text{дв}} = G \cdot (\tan \alpha - w) - \text{при совместном движении паллеты и ФР} \end{cases}$$

При этом момент инерции системы, приведенный к обечайке ФР

$$\begin{cases} J_{\text{пр}} = J_{\text{ФР}} - \text{при раздельном движении паллеты и ФР} \\ J_{\text{пр}} = J_{\text{ФР}} + J_{\text{пал}}^{\text{пр}} - \text{при совместном движении паллеты и ФР} \end{cases}$$

где f_{Π} – коэффициент трения поддона по обечайке ФР; $J_{\text{ФР}}$ – момент инерции ФР, кг·м²; $J_{\text{пал}}^{\text{пр}}$ – момент инерции паллеты, приведенный к обечайке ФР, кг·м².

Сила N нормального давления фрикционной накладке на обечайку ФР с учетом опубликованных ранее работ определяется как:

$$N = 4 \cdot u_{\text{ФР}}^2 \cdot m_{\Gamma} \cdot r \cdot c \cdot (V^2 - V_0^2) / [D_{\text{ФР}}^2 (a - f \cdot b)],$$

где r – расстояние от центра тяжести тормозной колодки до оси вращения ступицы центробежного тормоза ФР, м; a, b, c – плечи действия соответственно сил нормального давления N фрикционной накладке на обечайку ФР, трения N_f , центробежной силы $P_{\text{ЦБ}}$, м; m_{Γ} – масса тормозной колодки, кг; V_0 – скорость срабатывания центробежного тормоза ФР, м/с.

Проводя дальнейшие вычисления получены выражения для описания процесса взаимодействия паллеты с ФР:

- при *совместном* движении паллеты и ФР ($V \leq V_{\text{max}}^{\text{ФР}}$)
$$\begin{cases} V = V_{1\text{ФР}} \cdot (k_{\text{д}} \cdot e^{2A_{\text{Ф}}V_{1\text{ФР}}t} - 1) / (k_{\text{д}} \cdot e^{2A_{\text{Ф}}V_{1\text{ФР}}t} + 1) \\ V_{1\text{ФР}} = \sqrt{B_{\text{Ф}}/A_{\text{Ф}} + V_0^2} \\ k_{\text{д}} = (V_{1\text{ФР}} + V_{\text{max}}^{\text{ФР}}) / (V_{1\text{ФР}} - V_{\text{max}}^{\text{ФР}}) \\ A_{\text{Ф}} = i_{\text{К}} \cdot f \cdot m_{\Gamma} \cdot r \cdot c \cdot u_{\text{ФР}}^2 \cdot D_{\text{ВН}} \cdot (1 + u_{\text{ФР}} \cdot \eta_{\text{ФР}}) / [D_{\text{ФР}} \cdot (a - f \cdot b) \cdot J_{\text{пр}}] \\ B_{\text{Ф}} = D_{\text{ФР}}^2 \cdot G \cdot (\tan \alpha - w) / (4 \cdot J_{\text{пр}}) \\ J_{\text{пр}} = J_{\text{ФР}} + M \cdot D_{\text{ФР}}^2 / 4 \end{cases};$$

- при *раздельном* движении паллеты и ФР

при $V \leq V_0$: $V = D_{\text{ФР}}^2 \cdot G \cdot f_{\Pi} \cdot t / (4n_{\text{НР}} \cdot J_{\text{пр}})$;

при $V > V_0$:
$$\begin{cases} V = V_{\text{max}}^{\text{ФР}} \cdot (k'_{\text{д}} \cdot e^{2A'_{\text{Ф}}V_{\text{max}}^{\text{ФР}}t} - 1) / (k'_{\text{д}} \cdot e^{2A'_{\text{Ф}}V_{\text{max}}^{\text{ФР}}t} + 1) \\ V_{\text{max}}^{\text{ФР}} = \sqrt{B'_{\text{Ф}}/A'_{\text{Ф}} + V_0^2} \\ k'_{\text{д}} = (V_{\text{max}}^{\text{ФР}} + V_0) / (V_{\text{max}}^{\text{ФР}} - V_0) \\ A'_{\text{Ф}} = i_{\text{К}} \cdot f \cdot m_{\Gamma} \cdot r \cdot c \cdot u_{\text{ФР}}^2 \cdot D_{\text{ВН}} \cdot (1 + u_{\text{ФР}} \cdot \eta_{\text{ФР}}) / [D_{\text{ФР}} \cdot (a - f \cdot b) \cdot J_{\text{ФР}}] \\ B'_{\text{Ф}} = D_{\text{ФР}}^2 \cdot G \cdot f_{\Pi} / (4 \cdot J_{\text{ФР}} \cdot n_{\text{НР}}) \end{cases},$$

где $V_{1\text{ФР}}$ – скорость установившегося движения паллеты по ФР, м/с; $V_{\text{max}}^{\text{ФР}}$ – скорость сцепления паллеты и обечайки ФР, м/с.

Таким образом, разработанная модель взаимодействия паллеты с ФР позволяет определить не только скорость установившегося движения паллеты по ФР, но и скорость движения паллеты в любой момент её взаимодействия с ФР.

Для рассматриваемой конструкции ФР установлено, что продолжительность раздельного движения паллеты и ФР определяется временем разгона ФР до скорости V_0 его срабатывания и разгона ФР со скорости V_0 до скорости $V_{\text{max}}^{\text{ФР}}$ сцепления паллеты с обечайкой ФР и не превышает 0,03 с. Таким образом,

рассматриваемая конструкция ФР отвечает требованию минимизации продолжительности раздельного движения паллеты и ФР и при дальнейших расчетах позволяет его не учитывать.

Результаты расчета скорости движения паллеты при её торможении со скорости $V_{max}^{ФР}$ до скорости $V_{1ФР}$ и продолжительность совместного движения паллеты и ФР приведены на Рис. 16.

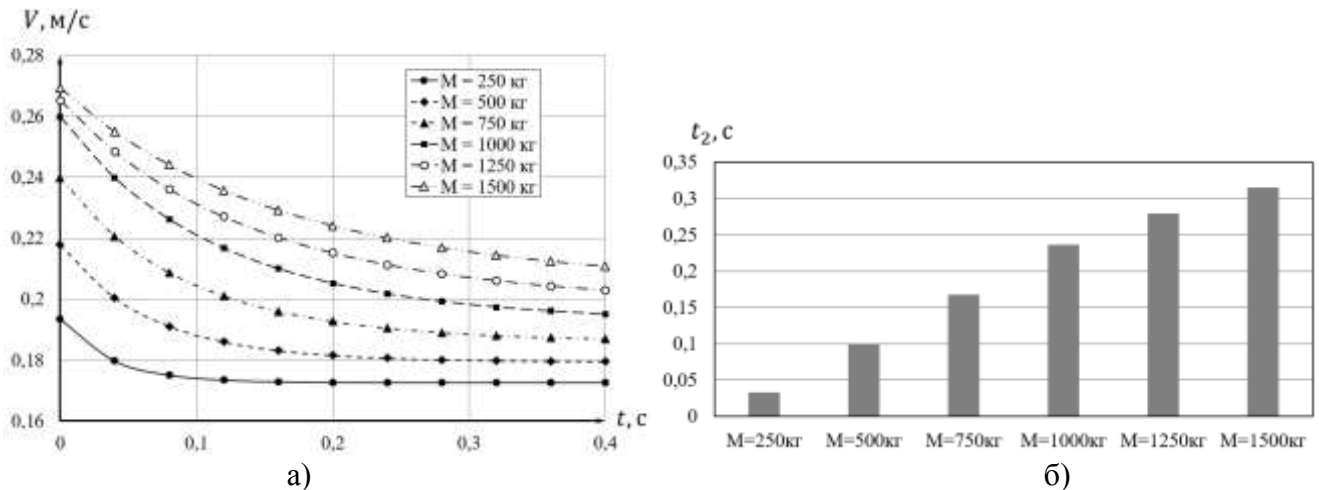


Рис. 16 – Скорость движения паллеты по ФР при её торможении со скорости $V_{max}^{ФР}$ её сцепления с обечайкой ФР до скорости $V_{1ФР}$ установившегося движения паллеты по ФР (а) и продолжительность совместного движения паллеты и ФР в зависимости от массы M паллеты (б)

Для рассматриваемой конструкции ФР установлено, что продолжительность совместного движения паллеты и ФР возрастает с увеличением массы M паллеты и для максимальной массы паллеты, равной 1500 кг, составляет 0,3...0,4 с.

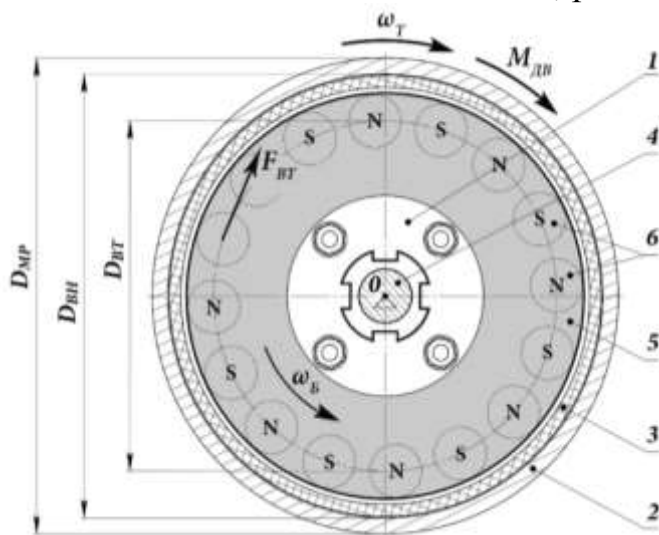


Рис. 17 – Расчетная схема вихретокового тормоза МР

- 1 – ступица вихретокового тормоза; 2 – обечайка МР; 3 – тормозная вставка МР;
- 4 – ось ступицы вихретокового тормоза;
- 5 – проводящее тело (диск); 6 – постоянные магниты

Модель взаимодействия паллеты с МР построена из расчетной схемы ГРК стеллажа (Рис. 14) и вихретокового тормоза МР (Рис. 17).

Основное уравнение динамики вращательного движения МР с мультипликатором при наличии тормозной силы описывается выражением

$$J_{пр} \dot{\omega}_{MP} = D_{MP} \cdot F_{дв} / 2 - M_{T1} - M_{T2},$$

где $J_{пр}$ – момент инерции системы, приведенный к обечайке МР, кг·м²; D_{MP} – диаметр МР, м; M_{T1} , M_{T2} – тормозные моменты, действующие на обечайку МР и ступицу тормоза МР, приведенные к его обечайке, Н·м.

Тормозные моменты M_{T1} и M_{T2} , действующие на обечайку МР и

ступицу вихретокового тормоза МР, приведенные к его обечайке:

$$M_{T1} = F_{BT} \cdot D_{BT} / 2,$$

$$M_{T2} = F_{BT} \cdot u_{MP} \cdot \eta_{MP} \cdot D_{BT}/2,$$

где F_{BT} – сила торможения вихретокового тормоза, Н; D_{BT} – диаметр установки постоянных магнитов, м; u_{MP} – передаточное отношение мультипликатора МР; η_{MP} – КПД МР.

Тормозная сила F_{BT} определяется как:

$$F_{BT}(V) = \beta_N \cdot N_M \cdot V \cdot D_{BT} \cdot (1 + u_{MP})/D_{MP},$$

где β_N – коэффициент магнитной вязкости для N пар магнитов, Н·с/м.

Полученные выражения тормозной силы F_{BT} справедливы при значениях скорости, не превышающих скорости эффективности $V_{ЭФ}$ вихретокового тормоза МР. При движении паллеты по МР со скоростью выше $V_{ЭФ}$ не происходит насыщения проводящего тела вихревыми токами, вследствие чего значение коэффициента β_N магнитной вязкости уменьшается, при этом зависимость тормозной силы F_{BT} от β_N становится нелинейной, а эффективность работы МР существенно снижается.

Проводя дальнейшие вычисления аналогично как для ФР получены выражения для описания процесса взаимодействия паллеты с МР:

- при *совместном* движении паллеты и МР ($V \leq V_{ЭФ} \leq V_{max}^{MP}$)

$$\begin{cases} V = (V_{max}^{MP} - V_{1MP}) \cdot e^{-A_M t} + V_{уст} \\ V_{1MP} = B_M/A_M \\ A_M = \beta_N \cdot N_M D_{BT}^2 \cdot (1 + u_{MP})(1 + u_{MP} \cdot \eta_{MP})/(4 \cdot J_{пр}); \\ B_M = D_{MP}^2 \cdot G \cdot (\tan \alpha - w)/(4 \cdot J_{пр}) \\ J_{пр} = J_{MP} + M \cdot D_{MP}^2/4 \end{cases}$$

- при *раздельном* движении паллеты и МР ($V \leq V_{ЭФ}$)

$$\begin{cases} V = V_{max}^{MP}(1 - e^{-A'_M t}) \\ V_{max}^{MP} = B'_M/A'_M \\ A'_M = \beta_N \cdot N_M \cdot D_{BT}^2 \cdot (1 + u_{MP})(1 + u_{MP} \cdot \eta_{MP})/(4 \cdot J_{MP}) \\ B'_M = D_{MP}^2 \cdot G \cdot f_{II}/(4 \cdot J_{MP} \cdot n_{HP}) \\ V_{ЭФ} = 2 \cdot D_{MP}/[\mu \cdot \sigma_d \cdot d_d \cdot D_{BT} \cdot (1 + u_{MP})] \end{cases}$$

где V_{1MP} – скорость установившегося движения паллеты по МР, м/с; V_{max}^{MP} – скорость сцепления паллеты и обечайки МР, м/с; $V_{ЭФ}$ – скорость эффективности вихретокового тормоза МР, м/с; d_d – толщина проводящего тела, м; μ – магнитная проницаемость материала проводящего тела, Гн/м; σ_d – удельная проводимость материала проводящего тела, См/м.

Таким образом, разработанная модель взаимодействия паллеты с МР позволяет определить не только скорость установившегося движения паллеты по МР, но и скорость движения паллеты в любой момент её взаимодействия с МР.

Для рассматриваемой конструкции МР установлено, что продолжительность раздельного движения паллеты и МР определяется временем разгона МР до скорости эффективности $V_{ЭФ}$ его вихретокового тормоза, уменьшается при увеличении массы M паллеты и составляет 0,1...0,3 с для массы паллеты от 250 до 400 кг, при этом для массы паллет свыше 400 кг составляет менее 0,1 с. Таким образом, рассматриваемая конструкция МР отвечает требованию минимизации продолжительности раздельного движения паллеты и МР для массы паллеты

свыше 400 кг и при дальнейших расчетах позволяет его не учитывать.

Результаты расчёта скорости движения паллеты при её торможении со скорости $V_{эф}$ эффективности вихрекового тормоза МР до скорости V_{1MP} её установившегося движения по МР приведены на Рис. 18.

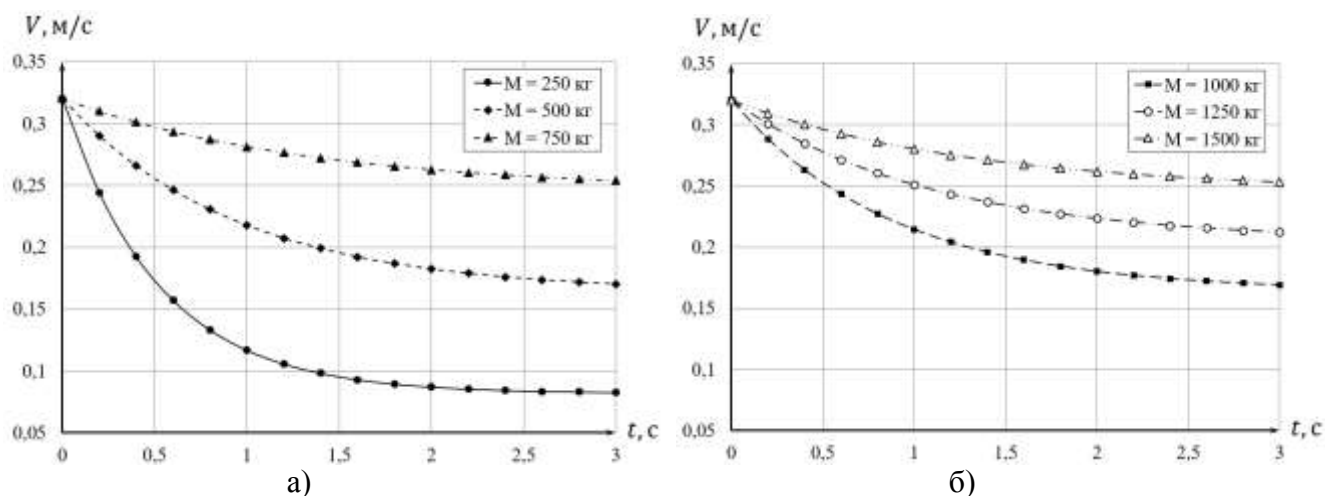


Рис. 18 – Скорость движения паллеты по МР при её торможении со скорости $V_{эф}$ эффективности вихрекового тормоза МР до скорости V_{1MP} установившегося движения паллеты массой до 750 кг, $N_M=4$ (а) и свыше 750 кг, $N_M=8$ (б)

Расчетами установлено, что продолжительность совместного движения паллеты и МР зависит от кол-ва N_M пар магнитов и массы M паллеты, и для разработанной конструкции МР составляет 2,1...2,8 с.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента трения ФР и измерения температуры на поверхности его контакта с обечайкой; коэффициента магнитной вязкости МР; описание используемых испытательных стендов и экспериментальных образцов; проведена верификация математических моделей взаимодействия паллеты с ФР и МР путем сравнения результатов их расчетных и экспериментальных исследований установившегося движения паллеты.

Для экспериментального исследования фрикционно-износных характеристик пары трения опытного отечественного образца ФР был использован трибومتر NANOVEA T50 (США), который позволяет проводить испытания фрикционных пар по схеме Pin-on-Disk в диапазоне нагрузок от 1 до 40 Н при скоростях вращения до 2000 об/мин, максимальный радиус трения 40 мм. Анализ результатов экспериментальных исследований фрикционных полимерных материалов (ФПМ) показал: вальцованные ФПМ отечественного производства типов ЭМ-1 и ЭМ-2 могут быть рекомендованы для использования в парах трения отечественных конструкций ФР ГРК стеллажей для паллет; коэффициент трения для ФПМ типа ЭМ-1 имеет средние значения, которые находятся в диапазоне 0,44...0,48, значения коэффициента трения для ФПМ типа ЭМ-2 на 15...20% ниже и находятся в диапазоне 0,38...0,41; по фрикционно-износным характеристикам ФПМ типа ЭМ-1 имеет преимущества над материалом типа ЭМ-2 в режимах эксплуатации ФР рассматриваемой конструкции.

Измерение температуры фрикционной накладки проводилось с использованием автономного измерительного блока при помощи термопары К-типа с диаметром спая 0,2 мм, который размещался во фрикционной накладке и выводился на поверхность трения. По результатам экспериментальных

исследований установлено, что при работе ФР на максимальных режимах эксплуатации ГРК стеллажа температура его фрикционной накладки находится в пределах 40-45°C и не превышает предельных значений для применяемых ФПМ.

Определение коэффициента магнитной вязкости проводилось на трибометре NANOVEA T50 с применением узла вихретокового торможения при частоте вращения проводящего тела от 120 до 1200 об/мин и воздушном зазоре 1...4 мм (с шагом 1 мм) между проводящим телом (диском) и постоянным магнитом/парой постоянных магнитов.

Верификация математических моделей взаимодействия паллеты с ФР и МР проводилась с использованием отечественных образцов ФР и МР и стенда (Рис. 19) путем сравнительного анализа теоретических и экспериментальных исследования установившейся скорости движения паллеты.

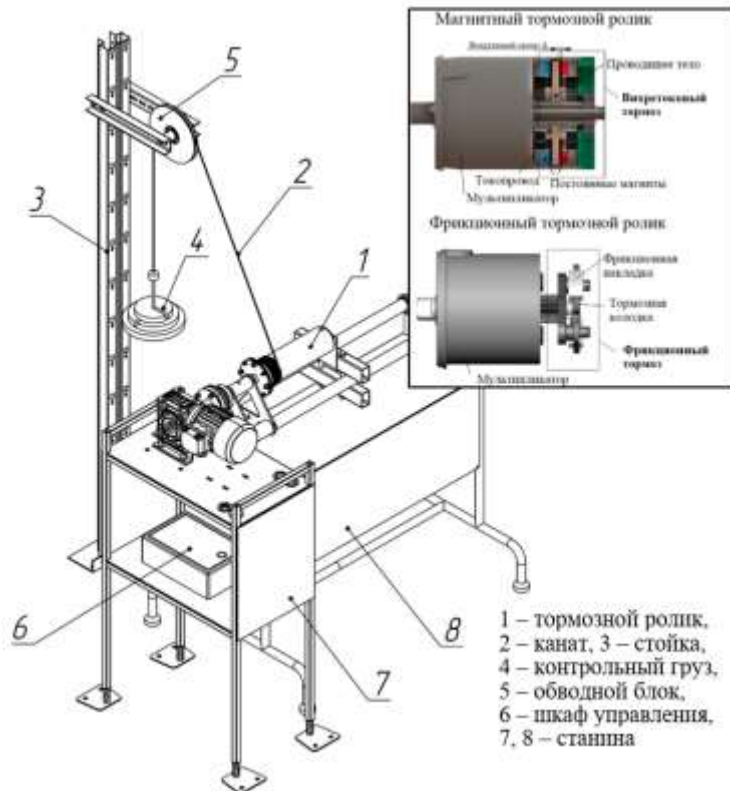


Рис. 19 – Общий вид стенда для экспериментальных исследований ТР различных типов в режимах эксплуатации ГРК стеллажей для паллет

Исследования ФР проводились для 4-х положений фрикционной накладки, соответствующим углам установки $\beta = 46; 66; 86; 106^\circ$ при массах контрольного груза m от 5 до 30 кг, что соответствует массе M паллеты от 250 до 1500 кг.

Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований ФР показал, что максимальная погрешность его расчета не превышает 15,8%. Среднее значение погрешности во всем диапазоне масс паллет составляет не более 8,2%.

Коэффициент запаса при выборе материала фрикционной накладки ФР определяется коэффициентом динамичности ФР, полученным по результатам виртуального эксперимента на

разработанной имитационной модели ФР (максимальная погрешность имитационной модели ФР составила 6,8%). Результаты проведенных виртуальных экспериментов показали, что относительная нестабильность фрикционного контакта не превышает 1,9%, а коэффициент динамичности ФР принимает значения 6...7 для массы паллеты 250 кг и 1,8...2,2 для массы паллеты 1500 кг.

Экспериментальные исследования МР проводились для одностороннего МР с количеством постоянных магнитов $n_M = 8$ и $n_M = 16$, и двустороннего МР с количеством пар постоянных магнитов $N_M = 4$ и $N_M = 8$. Согласно результатам эксперимента, коэффициент магнитной вязкости для одностороннего МР составляет $\beta_n = 0,113 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$, для двустороннего МР – $\beta_N = 0,583 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$.

Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований МР показал, что максимальная погрешность его расчета не превышает 13,3% при среднем значении не более 5,7%. При этом с увеличением

скорости установившегося движения паллеты по МР погрешность математической модели возрастает. Это обусловлено принятыми допущениями, а также превышением скорости $V_{эф}$ эффективности вихретокового тормоза.

В **шестой главе** разработан метод выбора рациональных параметров ГРК стеллажа и его элементов безопасности (ТР и УОРП), основанный на системном подходе применения разработанных математических моделей группового движения и допустимой скорости движения паллет на ГРК стеллажа; разработана ММ процесса разгрузки ГРК стеллажа и расчета шага расстановки ФР и МР; проведены теоретические исследования по определению рациональных параметров ГРК стеллажа с использованием ФР и МР для массы паллеты до 1500 кг и их сравнительный анализ.

Метод выбора рациональных параметров ГРК стеллажа основан на определении состояний ГРК стеллажа и расположения на нем паллет при загрузке и разгрузке. Координаты и скорость движения паллет на ГРК стеллажа с применением УОРП и ТР при его *загрузке* осуществляется по формулам, описанным в предыдущих главах. Наибольшую сложность представляет описание группового движения паллет при их *разгрузке* из ГРК стеллажа. В этом случае метод выбора рациональных параметров ГРК стеллажа должен предусматривать определение расположения ТР и групп паллет, позволять сделать вывод о разделении групп паллет на одиночные паллеты и их разомкнутом движении, а также не превышения скоростей сцепления паллеты с ТР и допустимых скоростей движения паллет. Для построения ММ процесса разгрузки паллет из ГРК стеллажа с использованием ТР и УОРП рассмотрим ГРК стеллаж с вместимостью $n_{ГРК}$ (Рис. 20).

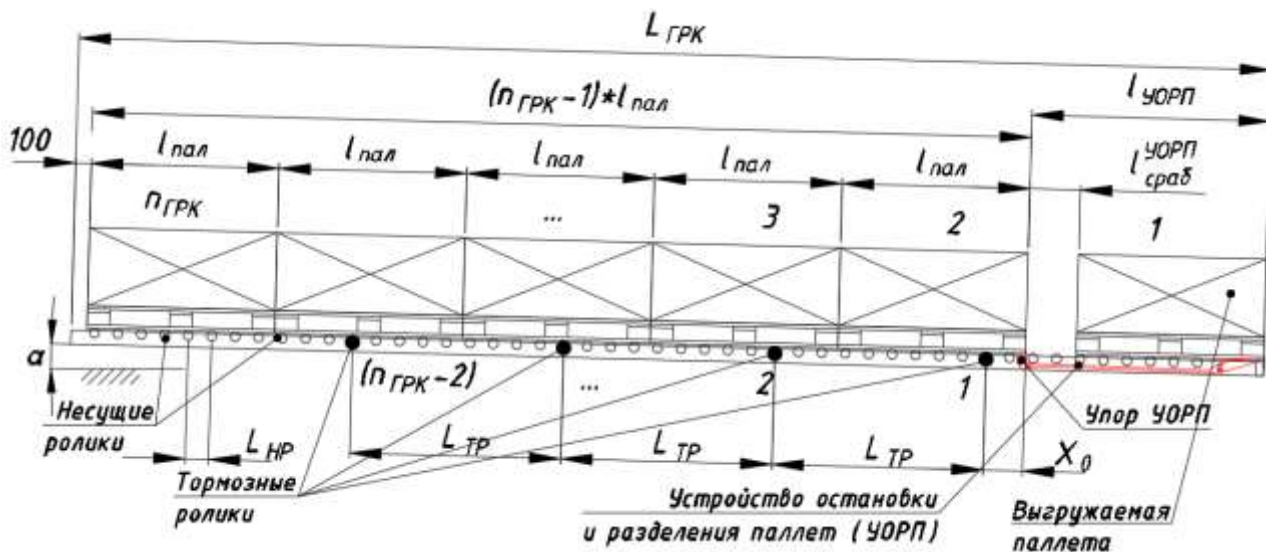


Рис. 20 – Схема ГРК стеллажа с устройствами безопасности

При разгрузке паллеты из ГРК стеллажа движение остальных $(n_{ГРК} - 1)$ паллет будет иметь групповой характер движения. Для формирования одной группы паллет на ГРК стеллажа должно быть не менее $(n_{ГРК} - 2)$ ТР. При этом первый ТР устанавливается на расстоянии X_0 от упора УОРОП.

Условие формирования одной группы паллет на ГРК стеллажа:

$$(n_{ГРК} - 2) \cdot l_{пал} - X_0 - (n_{ГРК} - 3) \cdot L_{ТР} \geq 0.$$

Обозначим $L_{ТР} = K_{ТР} \cdot l_{пал}$, где $K_{ТР}$ – коэффициент шага расстановки ТР. При одной группе паллет $K_{ТР} \leq [(n_{ГРК} - 2) \cdot l_{пал} - X_0] / [(n_{ГРК} - 3) l_{пал}]$.

Параметры группового движения будут зависеть от оставшегося количества $n_{\text{пал}}$ паллет при разгрузке первой выгружаемой паллеты ($n_{\text{пал}} \in [2, (n_{\text{ГРК}} - 1)]$). На каждом этапе $s = 1 \dots n_{\text{пал}}$ разгрузки ГРК стеллажа происходит разделение на группы из $(n_{\text{пал}} - r)$ паллет и разомкнутого движения r паллет, $r = 0 \dots (n_{\text{пал}} - 1)$, а продолжительность t_s каждого этапа разгрузки ГРК стеллажа определяется, исходя из равномерного движения $(n_{\text{пал}} - r)$ группы на длине l_s пути её движения.

Длина l_s пути движения группы $(n_{\text{пал}} - r)$ паллет на каждом этапе определяется матрицей L_s , скорость $V_{(n_{\text{пал}}-r-1)}^{(n_{\text{пал}}-r)}$ равномерного движения группы $(n_{\text{пал}} - r)$ паллет определяется матрицей V_s

$$L_s = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_{n_{\text{пал}}-1} \\ l_{n_{\text{пал}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (n_{\text{пал}} - 1) \cdot l_{\text{пал}} - X_0 - (n_{\text{пал}} - 2) \cdot L_{\text{ТР}} \\ l_{\text{пал}} - L_{\text{ТР}} \\ \vdots \\ l_{\text{пал}} - L_{\text{ТР}} \\ X_0 \end{pmatrix} \quad V_s = \begin{pmatrix} V_{(n_{\text{пал}}-1)}^{(n_{\text{пал}})} \\ V_{(n_{\text{пал}}-2)}^{(n_{\text{пал}}-1)} \\ \vdots \\ V_{(1)}^{(2)} \\ V_1 \end{pmatrix}.$$

Продолжительность каждого этапа t_s разгрузки ГРК стеллажа рассчитывается с учетом равномерного характера группового движения и определяется матрицей T_s

$$T_s = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{n_{\text{пал}}-1} \\ t_{n_{\text{пал}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [(n_{\text{пал}} - 1) \cdot l_{\text{пал}} - X_0 - (n_{\text{пал}} - 2) \cdot L_{\text{ТР}}] / V_{(n_{\text{пал}}-1)}^{(n_{\text{пал}})} \\ (l_{\text{пал}} - L_{\text{ТР}}) / (V_{(n_{\text{пал}}-2)}^{(n_{\text{пал}}-1)}) \\ \vdots \\ (l_{\text{пал}} - L_{\text{ТР}}) / (V_{(1)}^{(2)}) \\ X_0 / (K_{(n_{\text{пал}})} V_1) \end{pmatrix},$$

где $K_{(n_{\text{пал}})}$ – поправочный коэффициент скорости движения одиночной паллеты при её торможении на этапе $s = n_{\text{пал}}$ разгрузки ГРК стеллажа.

Поправочный коэффициент $K_{(n_{\text{пал}})}$ выбирается из равенства длины пути, пройденного паллетой за время её движения на последнем этапе разгрузки ГРК стеллажа с учетом торможения паллеты и без него (показано далее).

Производительность Π процесса разгрузки ГРК стеллажа определяется с учетом продолжительности его этапов (суммой всех элементов матрицы T_s) по формуле $\Pi = 3600 / \sum_{s=1}^{n_{\text{пал}}} t_s$, пал/час.

Положение паллет при их разгрузке из ГРК стеллажа определяется матрицей X_{sn} состояний ГРК стеллажа

$$X_{sn} = T_{sn} \cdot V_{sn},$$

где V_{sn} – матрица скоростей, м/с; T_{sn} – матрица времени, с.

Матрица T_{sn} времени представляет собой нижнюю треугольную матрицу и определяется как:

$$T_{sn} = \begin{pmatrix} t_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ t_1 & t_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & t_2 & \ddots & 0 & 0 \\ t_1 & \vdots & \cdots & t_{n_{\text{пал}}-1} & 0 \\ t_1 & t_2 & \cdots & t_{n_{\text{пал}}-1} & t_{n_{\text{пал}}} \end{pmatrix}.$$

Общий вид матрицы V_{sn} скоростей:

$$V_{sn} = \begin{pmatrix} V_{(n_{\text{пал}}-1)}^{(n_{\text{пал}})} & V_{(n_{\text{пал}}-1)}^{(n_{\text{пал}})} & \cdots & V_{(n_{\text{пал}}-1)}^{(n_{\text{пал}})} & V_{(n_{\text{пал}}-1)}^{(n_{\text{пал}})} \\ V_{(n_{\text{пал}}-2)}^{(n_{\text{пал}}-1)} & V_{(n_{\text{пал}}-2)}^{(n_{\text{пал}}-1)} & \cdots & V_{(n_{\text{пал}}-2)}^{(n_{\text{пал}}-1)} & K_2 \cdot V_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ V_{(1)}^{(2)} & V_{(1)}^{(2)} & \cdots & V_1 & V_1 \\ V_{(1)}^{(2)} + 0,5gt_{n_{\text{пал}}}(\tan \alpha - w) & K_{(n_{\text{пал}})} \cdot V_1 & \cdots & V_1 & V_1 \end{pmatrix}.$$

После построения матриц скоростей и времени, определяется квадратная матрица состояний ГРК стеллажа, которая описывает общий путь, пройденный каждой паллетой при её движении на ГРК стеллажа при его разгрузке, и имеет вид:

$$X_{sn} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{12} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{s1} & x_{s2} & \cdots & x_{sn} \end{pmatrix},$$

где x_{ab} – перемещение b -ой паллеты на этапе a движения, $a = 1 \dots s$, $b = 1 \dots n_{\text{пал}}$, м.

Расстояние X_0 между упором УОРП и первым ТР определяется по критерию минимизации путем варьирования значений поправочного коэффициента $K_{(n_{\text{пал}})}$ на последнем этапе разгрузки ГРК стеллажа и допустимой скорости $[V_1]$ одной паллеты из следующих условий: обеспечения зазора между первой и второй паллетами, необходимого для срабатывания УОРП $\Delta L \geq l_{\text{сраб}}^{\text{УОРП}}$ (разница площадей под графиками скоростей движения первой и второй паллеты); неперевышения допустимой скорости $[V_1]$ одной паллеты при её ударе в упор УОРП; обеспечения равенства путей движения второй паллеты на последнем этапе разгрузки ГРК стеллажа с учетом торможения паллеты $S_{\text{ТР}} = X_0$ и без него $S_{\text{равн}} = K_{(n_{\text{пал}})} \cdot V_1 \cdot t_{n_{\text{пал}}}$ с точностью 1...2 мм (Рис. 21).

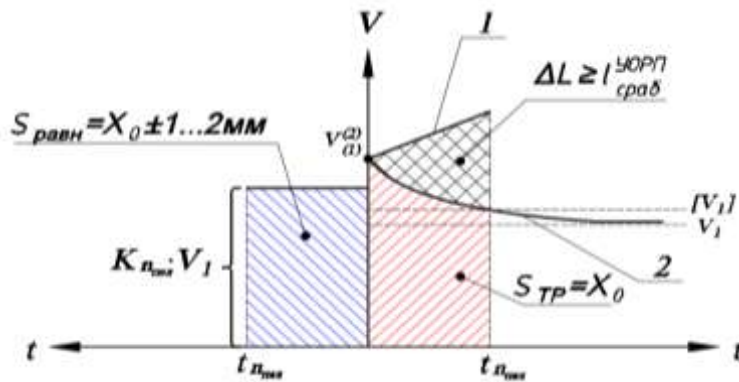


Рис. 21 – Схема к определению расстояния X_0 между упором УОРП и первым ТР
1 – скорость движения первой паллеты, 2 – скорость движения второй паллеты с учетом её торможения

Математическая модель процесса разгрузки ГРК стеллажа с применением ФР. Определение поправочных коэффициентов K_s при разгрузке канала ГРК стеллажа с применением ФР производится по выражению

$$S_{\text{ФР}} = \frac{1}{A_{\text{Ф}}} \ln \left| \left(k_d \cdot e^{2A_{\text{Ф}} l_s / K_s} + 1 \right) / (k_d + 1) \right| - l_s / K_s \leq l_s \pm 0,001,$$

где $k_d = \left(1 + K_{(n_{\text{пал}}-r-1)\text{ФР}}^{(n_{\text{пал}}-r)} \right) / \left(1 - K_{(n_{\text{пал}}-r-1)\text{ФР}}^{(n_{\text{пал}}-r)} \right)$.

Для ГРК стеллажа с использованием ФР на основании решения задачи оптимизации определяется минимальное значение расстояния X_0 путем варьирования значений поправочного коэффициента $K_{(n_{\text{пал}})}$ и допустимой скорости $[V_1]$ одной паллеты при следующих ограничениях:

$$\begin{cases} g(\tan \alpha - w)X_0^2/[2V_{1\Phi P}^2(K_{(n_{\text{пал}})})^2] + K_{(1)\Phi P}^{(2)}X_0/K_{(n_{\text{пал}})} - X_0 - l_{\text{сраб}}^{\text{УОРП}} \geq 0 \\ \frac{1}{A_{\Phi}} \cdot \ln|(k_d \cdot e^{2A_{\Phi}X_0/K_{(n_{\text{пал}})}} + 1)/(k_d + 1)| - X_0/K_{(n_{\text{пал}})} \leq X_0 \pm 0,001 \cdot \\ V_{1\Phi P} \cdot (k_d \cdot e^{2A_{\Phi}X_0/K_{(n_{\text{пал}})}} - 1)/(k_d \cdot e^{2A_{\Phi}X_0/K_{(n_{\text{пал}})}} + 1) \leq [V_1] \end{cases}$$

Анализ полученной математической модели процесса разгрузки ГРК стеллажа с использованием ФР показал, что износ фрикционных накладок ФР, установленных по длине ГРК стеллажа, происходит неравномерно и зависит от расположения ФР на ГРК стеллажа. Так, максимальная скорость установившегося движения группы паллет достигается на последнем этапе разгрузки ГРК стеллажа, поэтому расчет параметров ФР и выбор материала его фрикционной накладки необходимо производить по максимальной скорости установившегося движения группы $V_{(1)\Phi P}^{(2)}$. Так как использовать различную конструкцию ФР в зависимости от его расположения на ГРК стеллажа нерационально, то при проектировании ФР срок его службы рекомендовано рассчитывать, исходя из максимальной скорости V_{max} сцепления паллеты с ФР.

Математическая модель процесса разгрузки ГРК стеллажа с использованием МР. Определение поправочных коэффициентов K_s при разгрузке канала ГРК стеллажа с использованием МР производится по выражению

$$S_{\text{MP}} = V_{1\text{MP}} \cdot (K_{(n_{\text{пал}}-r-1)\text{MP}}^{(n_{\text{пал}}-r)} - 1) \cdot (1 - e^{-A_M l_s / K_s V_{1\text{MP}}}) / A_M + l_s / K_s \leq l_s \pm 0,001.$$

Для ГРК стеллажа с использованием МР на основании решения задачи оптимизации определяется минимальное значение расстояния X_0 путем варьирования значений поправочного коэффициента $K_{(n_{\text{пал}})}$ и допустимой скорости $[V_1]$ одной паллеты при следующих ограничениях:

$$\begin{cases} g(\tan \alpha - w)X_0^2/[2V_{1\text{MP}}^2(K_{(n_{\text{пал}})})^2] + K_{(1)\text{MP}}^{(2)}X_0/K_{(n_{\text{пал}})} - X_0 - l_{\text{сраб}}^{\text{УОРП}} \geq 0 \\ V_{1\text{MP}}(K_{(1)\text{MP}}^{(2)} - 1) \left(1 - e^{-A_M X_0 / K_{(n_{\text{пал}})} V_{1\text{MP}}}\right) / A_M - X_0 / K_{(n_{\text{пал}})} \leq X_0 \pm 0,001. \\ V_{1\text{MP}}(K_{(1)\text{MP}}^{(2)} - 1) \cdot e^{-A_M l_s / K_s V_{1\text{MP}}} + V_{1\text{MP}} \leq [V_1] \end{cases}$$

Анализ полученной математической модели процесса разгрузки ГРК стеллажа с использованием МР показал, что максимальная скорость установившегося движения группы паллет достигается на последнем этапе разгрузки ГРК стеллажа, поэтому расчет параметров МР рекомендовано производить по максимальной скорости установившегося движения группы $V_{(1)\text{MP}}^{(2)}$, при этом необходимо учитывать, что скорость установившегося движения группы не должна превышать эффективной скорости вихретокового тормоза МР, т.е. $V_{(1)\text{MP}}^{(2)} \leq V_{\text{ЭФ}}$.

Разработана методика определения шага расстановки ФР и МР, который в общем виде определяется выражениями:

$$\begin{cases} L_{\text{ФР}} = \min((V_{\text{max}}^2 - V_{1\text{ФР}}^2)/[2g(\tan \alpha - w)] + l_{\text{пал}}; [(n_{\text{ГРК}} - 2) \cdot l_{\text{пал}} - X_0]/(n_{\text{ГРК}} - 3)) \\ L_{\text{МР}} = \min((V_{\text{ЭФ}}^2 - V_{1\text{МР}}^2)/[2g(\tan \alpha - w)] + l_{\text{пал}}; [(n_{\text{ГРК}} - 2) \cdot l_{\text{пал}} - X_0]/(n_{\text{ГРК}} - 3)) \end{cases}$$

Анализ результатов расчетов шага расстановки ФР и МР показал, что: значение шага расстановки ФР при вместимости ГРК стеллажа менее 17...18 паллет массой более 750 кг определяется процессом загрузки паллеты на ГРК стеллажа и скоростью V_{max} сцепления паллеты и ФР, а для вместимости ГРК стеллажа более 17...18 паллет с массой паллеты менее 750 кг – этапом разгрузки

ГРК стеллажа и его вместимостью $n_{ГРК}$; значение шага расстановки МР при вместимости ГРК стеллажа *менее* 5 паллет определяется процессом загрузки паллеты на ГРК стеллажа и скоростью $V_{эф}$ эффективности вихретокового тормоза МР, а при вместимости ГРК *более* 5 паллет – этапом разгрузки ГРК стеллажа и вместимостью $n_{ГРК}$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана методика расчета шага расстановки НР с учетом их жесткости. Основой методики являются ММ процесса взаимодействия паллеты с ненагруженным НР и результаты экспериментальных исследований жесткости НР. Особенностью методики расчета шага расстановки НР является учет 3-х условий: неперевышения грузоподъемности НР; устойчивости паллеты при её движении по НР; обеспечения безостановочного движения паллеты по НР.

2. Разработана методика расчета скорости движения группы паллет по ТР и допустимой скорости их ударного взаимодействия с упором УОРП. Основой методики является ММ группового движения паллет и их ударного взаимодействия. Особенностью методики является учет нагрузок, действующих на упор УОРП и позволяющих определить допустимый размер и количество групп паллет, а также допустимую скорость как одной паллеты, так и группы паллет из условия работоспособности упора УОРП с учетом конструктивных особенностей поддона и упора УОРП, а также материалов их изготовления. Получены выражения и проведены расчеты установившейся скорости движения группы паллет на ГРК стеллажа с использованием ФР и МР. Установлено, что скорость движения группы паллет определяется коэффициентом скорости установившегося движения группы, который для ГРК стеллажа с использованием ФР не превышает 1,16, а для ГРК стеллажа с использованием МР – 2. Установлено, что для обеспечения безопасного движения паллет на ГРК стеллажа из условия работоспособности упора УОРП для массы паллеты до 1500 кг необходимо наличие не более одной группы паллет на ГРК.

3. Разработан метод расчета движения паллеты на ГРК стеллажа, позволяющий определить скорости движения паллеты и обечайки ТР при их раздельном или совместном движении. Основу метода составляют модели взаимодействия паллеты с ФР и МР. Особенность метода заключается в возможности определения продолжительности совместного и раздельного движения паллеты при взаимодействии с ТР различных конструктивных исполнений. Установлено, что для обеспечения безопасного движения паллеты по ТР необходимо уменьшение продолжительности раздельного движения при их взаимодействии, а также неперевышение скоростей сцепления паллеты с обечайкой ТР или скорости эффективности вихретокового тормоза. Проведен анализ продолжительности раздельного движения паллеты и рассматриваемых ФР и МР: при использовании ФР она составляет 0,012...0,014 с для масс паллет от 250 до 1500 кг и определяется разгоном ФР до скорости его сцепления с паллетой; при использовании МР – 0,1...0,3 с для масс паллеты от 250 до 400 кг и менее 0,1 с для масс паллет от 400 до 1500 кг и определяется разгоном МР до скорости эффективности его вихретокового тормоза. Проведен анализ продолжительности совместного движения паллеты и рассматриваемых ФР и МР: при использовании ФР для максимальной массы паллеты $M=1500$ кг она составляет 0,3...0,4 с и возрастает с увеличением массы паллеты; при использовании МР – 2,1...2,8 с и зависит от кол-ва пар магнитов и массы паллеты.

4. Для обоснования возможности использования разработанных ММ и основанных на них методов и методик расчета были проведены теоретические и экспериментальные исследования скорости установившегося движения паллеты по ФР и МР в процессе их взаимодействия. Результаты экспериментальных исследований показали: при использовании ФР максимальная погрешность расчета скорости установившегося движения не превышает 15,8% при среднем значении не более 8,2%; при использовании МР – максимальная погрешность расчета не превышает 13,3% при среднем значении не более 5,7%.

5. Разработана имитационная модель ФР, позволяющая на основании виртуальных экспериментов определить коэффициент запаса при выборе материала фрикционной накладки ФР. Максимальная погрешность имитационной модели определялась путем сравнительного анализа с результатами стендовых испытаний и составила 6,8%. Результаты виртуальных экспериментов показали, что для рассматриваемой конструкции ФР коэффициент запаса принимает значения 6...7 для массы паллеты 250 кг и 1,8...2,2 для массы паллеты 1500 кг.

6. Разработан метод выбора рациональных параметров ГРК стеллажей с элементами безопасности. Основу метода составляют: ММ процесса разгрузки ГРК стеллажа с использованием ФР и МР и методика расчета шага расстановки ТР. Особенностью метода является: учет группового характера движения паллет на ГРК стеллажа, обеспечивающий разделение групп на одиночные паллеты; решение задачи оптимизации по определению минимального расстояния от упора УОРП до первого ТР. Разработана методика расчета шага расстановки ТР на ГРК стеллажей. Установлено, что: для процесса загрузки шаг расстановки ФР определяется условием непревышения скорости сцепления паллеты и ФР, а шаг расстановки МР – непревышением скорости эффективности вихретокового тормоза МР при разгоне паллеты во время её движения между ТР; для процесса разгрузки ГРК стеллажа шаг расстановки ТР (ФР и МР) определяется значением расстояния от упора УОРП до первого ТР и условием нахождения на ГРК стеллажа не более одной группы паллет; шаг расстановки ТР выбирается минимальным из полученных значений для процессов загрузки и разгрузки паллет. Проведен сравнительный анализ группового движения паллет с использованием ФР и МР на примере ГРК стеллажа вместимостью $n_{ГРК} = 8$ и для паллет массой $M = 1500$ кг, который показал, что производительность процесса разгрузки паллет из ГРК стеллажа при использовании МР выше на 20-22% чем при использовании ФР, несмотря на меньшую скорость установившегося движения одной паллеты по МР. Установлено, что производительность процесса разгрузки ГРК стеллажа определяется не скоростью установившегося движения одной паллеты по ТР, а параметрами группового движения паллет и шагом расстановки ТР.

7. Разработанные научные методы позволяют решить проблему обеспечения безопасности движения паллет на ГРК стеллажей за счет использования роликового полотна с рациональными параметрами и применения ТР и УОРП. Полученные результаты теоретических исследований по определению рациональных параметров ГРК стеллажа для паллет массой до 1500 кг при использовании рассматриваемых конструкций ФР и МР показали, что при работе ГРК обеспечивается снижение скорости движения паллет, разомкнутый характер их движения, а также непревышение допустимой скорости ударного взаимодействия паллеты и упора УОРП, что обеспечивает его работоспособность.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Пат. 165148 Российская Федерация, МПК В65G39/09. Ролик конвейера / Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А., Козлов К.Г.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Инженерно-технический центр «КРОС» – № 2016108128/11; заявл. 09.03.2016; опубл. 10.10.2016. Бюл. №28-2016
2. Пат. 170875 Российская Федерация, МПК В65G 13/075. Ролик тормозной для роликовых гравитационных конвейеров / Носко А.Л., Сафронов Е.В.; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана – № 2017105276/11; заявл. 17.02.2017; опубл. 12.05.2017. Бюл. 14-2017
3. Пат. 171994 Российская Федерация, МПК В65G 1/08, В65G 47/88. Устройство для остановки и разделения паллет / Носко А.Л., Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А.; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана - № 2017110891, заявл. 31.03.2017; 23.06.2017. Бюл. № 18-2017
4. Пат. 171513 Российская Федерация, МПК G01M 13/00. Устройство для имитации нагрузки в стенде для испытаний тормозных роликов центробежного типа гравитационных конвейеров и стеллажей / Носко А.Л., Сафронов Е.В.; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана - № 2016146752, заявл. 29.11.2016; опубл. 02.06.2017. Бюл. № 16-2017
5. Пат. 174165 Российская Федерация, МПК В65G 13/075. Ролик тормозной регулируемый для роликовых гравитационных конвейеров / Носко А.Л., Сафронов Е.В.; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана - № 2017123717, заявл. 05.07.2017; опубл. 05.10.2017. Бюл. № 28–2017
6. Сафронов Е.В., Носко А.Л. Разработка испытательного оборудования для исследования работоспособности тормозных роликов гравитационных конвейеров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. №4-2. 2017. С. 151-159 (0,4 п.л./0,3 п.л.)
7. Носко А.Л., Сафронов Е.В. Методика расчета тормозного ролика центробежного типа применительно к гравитационным роликовым конвейерам для паллет // Механизация строительства. 2017. Том 78, № 6. С. 26-31 (0,45 п.л./0,3 п.л.)
8. Nosko A.L., Safronov E.V., Soloviev V.A. Study of friction and wear characteristics of the friction pair of centrifugal brake rollers // Journal of friction and wear. V. 39, № 2. 2018. P.145-151 (0,54 п.л./0,22 п.л.)
9. Шарифуллин И.А., Сафронов Е.В., Носко А.Л. Обзор и анализ конструкций устройств остановки и разделения паллет роликовых гравитационных конвейеров // Journal of advanced research in technical science. 2018. № 8. С. 18–29 (0,44 п.л./0,15 п.л.)
10. Сафронов Е.В., Носко А.Л. Выбор передаточного отношения мультипликатора фрикционного тормозного ролика // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 5. 2018. С.81-87 (0,44 п.л./0,3 п.л.)
11. Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А., Носко А.Л. Устройства безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров паллетного типа: Монография. М: Университетская книга, 2018. 72 с. (4,5 п.л./2,8 п.л.)
12. Safronov E., Nosko A. A method to determine allowable speed for a unit load in a pallet flow rack // Acta mechanica et automatica. 2019. Vol. 13, №. 2. P. 80-85 (0,38 п.л./0,19 п.л.)

13. Nosko A.L., Safronov E.V., Kirillov D.V. Selection of materials of friction lining centrifugal brake rollers // Journal of friction and wear. 2019. Vol. 40. №. 3. P. 218-222 (0,32 п.л./0,11 п.л.)

14. Nosko A.L., Safronov E.V. Test bench for braking rollers of gravitational pallet conveyers and racks // Russian engineering research. 2019. Vol. 39. № 5. P. 374-376. (0,2 п.л./0,1 п.л.)

15. Safronov E., Nosko A. Measurement technique for temperature of friction lining of brake roller for pallet flow rack. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 4th international conference on industrial engineering. ICIE 2018. Lecture notes in mechanical engineering. 2019 (0,44 п.л./0,3 п.л.)

16. Шарифуллин И.А., Носко А.Л., Сафронов Е.В. Математическая модель процесса движения паллеты по тормозному ролику магнитного типа // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2020. Т. 17. № 3. С. 364-373 (0,95 п.л./0,27 п.л.)

17. Пат. 198420 Российская Федерация, МПК В65G 13/075. Ролик тормозной магнитный для роликовых гравитационных конвейеров / Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А., Шарифуллин И.А.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Инженерно-технический центр «КРОС» - № 2020106638; заявл. 12.02.2020; опубл. 06.07.2020. Бюл. № 02-2020

18. Сафронов Е.В., Носко А.Л. Экспериментальная оценка нагрузочной способности роликов гравитационных конвейеров для палет // Известия МГТУ МАМИ. 2020. № 3. С. 59-64 (0,375 п.л./0,25 п.л.)

19. Сафронов Е.В., Носко А.Л., Балашова А.И. Исследование влияния длины накладки на скорость движения паллеты по центробежному фрикционному ролику // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. № 4. С. 497-505 (0,56 п.л./0,34 п.л.)

20. Tribotechnical and ecological evaluation of friction pairs of brake devices in lifting and transport machines / E. Safronov [et al.] // Journal of friction and wear. 2020. Т. 41. № 4. С. 347-353 (0,44 п.л./0,11 п.л.)

21. Safronov E.V., Nosko A.L. Influence of the brake lining position on the efficiency of the centrifugal friction roller // IOP conference series: materials science and engineering. international conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment 2019, ICMTME 2019. 2020. P. 022086 (0,42 п.л./0,3 п.л.)

22. Шарифуллин И.А., Носко А.Л., Сафронов Е.В. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных исследований скорости движения паллеты по тормозному ролику магнитного типа // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 2. С. 148-159 (1,18 п.л./0,28 п.л.)

23. Исследование работы тормозных магнитных роликов гравитационных роликовых конвейеров / Сафронов Е.В. [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. №4. 2021. С. 134-143 (0,52 п.л./0,15 п.л.)

24. Сафронов Е.В., Носко А.Л., Гуськова А.С. Методика расчета несущей рамы гравитационного роликового стеллажа для коробов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 3. С. 251-258 (0,5 п.л./0,3 п.л.)

25. Sharifullin I., Nosko A., Safronov E. Mathematical model of the process of pallet movement along the magnetic type centrifugal brake roller // MATEC web of conferences. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. 2021. V. 346. P. 1-9 (0,89 п.л./0,22 п.л.)

26. Sharifullin I., Nosko A., Safronov E. Pallet motion on a magnetic brake roller // *Acta mechanica et automatica*. 2022. Vol. 16. №. 1. P. 34-39 (0,38 п.л./0,13 п.л.)
27. Методика оценки концентрации мелкодисперсных частиц PM10 при работе центробежных фрикционных роликов / Сафронов Е.В. [и др.] // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. №1. С. 61-69 (0,56 п.л./0,3 п.л.)
28. Пат. 212450 Российская Федерация, МПК В65G 13/075. Ролик тормозной реверсивный / Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Инженерно-технический центр «КРОС» - № 2022112931, заявл. 13.05.2022; опубл. 21.07.2022, Бюл. № 21-2022
29. Пат. 217592 Российская Федерация, МПК G01M 13/00. Стенд для испытания тормозных роликов гравитационных конвейеров и стеллажей / Носко А.Л., Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А., Гуськова А.С.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Инженерно-технический центр «КРОС» - № 2023101812, заявл. 27.01.2023; опубл. 06.04.2023, Бюл. № 10-2023
30. Пат. 229886 Российская Федерация, МПК В65G. Узел крепления ролика к раме неприводных и гравитационных роликовых конвейеров для штучных грузов / Носко А.Л., Сафронов Е.В., Серов И.Н., Шарифуллин И.А., Гуськова А.С., Носко Е.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Интеллектуально-технологический сервис подъемных сооружений» - № 2024116520, заявл. 17.06.2024; опубл. 31.10.2024. Бюл. № 31.10.2024
31. Тормозные ролики для паллетных гравитационных стеллажей. Конструкция. Теория. Методы расчета. Эффективность применения: монография / Е.В. Сафронов, А.Л. Носко, И.А. Шарифуллин; под ред. А.Л. Носко. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 115 с. (9,425 п.л./5,5 п.л.)
32. Определение параметров ролика динамического торможения гравитационного стеллажа / Сафронов Е.В. [и др.] // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2025. № 1. С. 39-49 (0,7 п.л./0,2 п.л.)
33. Сафронов Е.В. Математическая модель расчета скорости группового движения паллет по гравитационному роликовому конвейеру стеллажа // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. №4. 2025. С. 62-71. (0,62 п.л.)
34. Пат. 236560 Российская Федерация, МПК В65G. Гравитационный роликовый конвейер стеллажа / Носко А.Л., Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Интеллектуально-технологический сервис подъемных сооружений» - № 2025101711, заявл. 28.01.2025; опубл. 13.08.2025. Бюл. № 23-2025
35. Гуськова А.С., Сафронов Е.В., Носко А.Л. Математическая модель процесса движения паллеты по ролику динамического торможения // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2025. №4 (155). С. 60-71 (1,0 п.л./0,4 п.л.)
36. Алексеев В.И., Носко А.Л., Сафронов Е.В. Методика расчёта балок гравитационного стеллажа для паллет // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2025. №12. С. 393-401 (0,57 п.л./0,17 п.л.)
37. Сафронов Е. В. Динамическая модель фрикционного тормозного ролика гравитационного роликового конвейера стеллажа для паллет // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2025. № 4. С. 460-469 (0,62 п.л.)