

На правах рукописи



Алешков Денис Сергеевич

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ

Специальность 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Омск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (г. Омск)».

Научный консультант:

КОРЧАГИН Павел Александрович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», проректор по научной работе и цифровой трансформации (г. Омск).

Официальные оппоненты:

ЖЕЛУКЕВИЧ Рышард Борисович

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» профессор кафедры «Авиационные горюче-смазочные материалы» (г. Красноярск).

МЕРДАНОВ Шахбуба Магомедкеримович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», заведующий кафедрой «Транспортные и технологические системы» (г. Тюмень).

СЛАДКОВА Любовь Александровна

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» (г. Москва).

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова».

Защита состоится 20 декабря 2023 г. в 11-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета ВАК РФ 99.2.109.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения «Омский государственный технический университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 2.318. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: iateterina@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «(СибАДИ)» и на сайте университета по адресу: <http://sibadi.org/about/units/institut-magistratury-i-aspirantury/studies/dissertations/66968/>; в библиотеке ФГАОУ ВО «ОмГТУ» и на сайте университета по адресу: https://www.omgtu.ru/scientific_activities/dissertatsionnye_sovety/obyavleniya_o_zashchite_dissertatsiy_i_dokumenty_k_nim/aleshkov-d-s/

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 1.108. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: iateterina@mail.ru.

Автореферат разослан «22» сентября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, канд. техн. наук



Тетерина
Ирина Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Одной из приоритетных задач определенных в национальном проекте «Безопасные и качественные автомобильные дороги», является обеспечение связности и транспортной доступности территорий. В то же время две трети территории Российской Федерации покрыты снегом, период стояния которого составляет 8 и более месяцев. Интенсивные снегопады являются неотъемлемой частью холодного периода года в Российской Федерации. Идет процесс освоения Арктических территорий, что определяет потребность в принципиально новых с точки зрения конструктивных и технологических характеристик машинах, осуществляющих проведение снегоочистных работ.

Развитие роторных снегоочистителей (далее – РСО) идет по пути увеличения их силовых и скоростных характеристик. Для увеличения производительности снегоочистителей производители традиционно увеличивают ширину захвата, повышают скорость вращения рабочего органа, скорость движения базовой машины. Все это зачастую приводит к увеличению энергии, затрачиваемой на уборку условной единицы снежной массы, т.е. снижению энергоэффективности снегоуборочной машины. Данное положение входит в противоречие со стратегией научно-технологического развития нашей страны, одним из направлений которой является повышение эффективности содержания объектов инфраструктуры и снижение затрат энергии на выработку единицы продукции. Существующие методы расчета не позволяют моделировать процесс работы снегоочистителя как единый от момента захвата снежного массива фрезерным рабочим органом до момента формирования требуемой конфигурации снежного вала.

Для разрешения данного противоречия наряду с дальнейшим совершенствованием рабочих органов снегоочистителей необходим поиск таких средств и методов, которые позволили бы повысить энергоэффективность роторных снегоочистителей.

Актуальность диссертационной работы состоит в научном обобщении и дальнейшем развитии научных основ и инженерных решений в области проектирования РСО.

Целью исследования является повышение энергоэффективности РСО.

Объектом исследования являются процессы, происходящие в РСО, при взаимодействии элементов их рабочих органов со снежной средой при проведении снегоочистных работ.

Предметом исследования являются закономерности, связывающие параметры РСО, транспортируемой снежной массы с критерием эффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать совокупность математических моделей исследуемой системы «питатель - снежная масса - метательный аппарат - окружающая среда», в состав которых необходимо включить подмодели основных систем РСО и уравнения связей, позволяющие учесть различные варианты конструктивного исполнения РСО. Такая совокупность должна обеспечивать оценку энергоэффективности РСО при проведении снегоочистительных работ в различных условиях его эксплуатации на основе которой можно оценить конструктивные и кинематические характеристики РСО с целью создания конкурентноспособных конструкции, а так же его подсистем, позволяющих снизить потери снежной массы и сократить время проведения снегоочистительных работ;

- на основе совокупности математических моделей разработать алгоритмы и методику проектирования рабочего оборудования РСО, которые в дальнейшем могут быть реализованы в составе пакета программных продуктов для проведения расчета конструктивных вариантов или модификации конструкции РСО;

- установить особенности применения совокупности математических моделей для исследования рабочих процессов конкретных конструкций РСО для различных условий его эксплуатации. Выполнить моделирование процессов работы рабочего оборудования РСО для различных конструктивных вариантов и различных конструктивных и кинематических характеристиках (радиус ротора, ширина захвата питателя, угол захода ленты фрезы питателя, угловая скорость вращения фрезы питателя, поступательная скорость РСО);

- разработать и научно обосновать технические решения по совершенствованию конструкции рабочего оборудования РСО, повышению их энергоэффективности;

- выполнить экспериментальные исследования рабочего оборудования РСО и подтвердить корректность математических моделей, работоспособность предложенных технических решений.

Научная новизна работы заключается в дальнейшем развитии теории моделирования, проектирования направленных на создание новых и совершенствование существующих роторных снегоочистителей на основе разработанной совокупности математических моделей системы «питатель - снежная масса - метательный аппарат - окружающая среда», позволяющей системно и эффективно решать важную научно-техническую проблему повышения энергоэффективности роторных снегоочистителей различных типов и интенсификации процесса проведения снегоочистительных работ. Научная новизна получена за счет того, что:

- сформулирована концепция проектирования РСО как результата объединения элементов, образующих множества питателей, метательных аппаратов (далее МА) и базовых машин, в котором определены отношения эквивалентности и порядка на основе параметрической систематизации и представления результата в виде упорядоченного графа;

- разработана с единых методологических позиций совокупность

математических моделей РСО, отличающаяся учетом взаимного влияния подсистем в процессе транспортирования снежной массы, включая математические модели: транспортирования снежной массы как совокупности снежных частиц конечного размера для различных положений питателя; формирования снежного вала при отбросе снежной массы МА; решения вариационных задач на примере ротора МА;

- получили дальнейшее развитие научные основы проектирования перспективных конструкторских решений повышения энергоэффективности работы РСО, позволяющие обеспечить интенсификацию проведения снегоочистных работ за счет рационального выбора геометрических размеров МА; питателя, его угловой скорости вращения и поступательной скорости снегоочистителя; новой конструкции вертикального питателя РСО;

- получены и теоретически обобщены результаты натурных экспериментальных исследований работы подсистем РСО, позволившие подтвердить адекватность разработанных моделей, а так же установить условия эффективного использования полученных технических решений конструкции рабочего органа питателя РСО.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- изложены основные положения теории проектирования РСО, на основе которой обоснованы математические модели РСО, как сложной динамической системы, включающей в себя подсистемы: снежный массив, фреза питателя РСО, фрезерный питатель, МА, позволяющие моделировать поведение снежного массива от момента захвата фрезой питателя РСО до момента формирования требуемой конфигурации снежного вала;

- установлены: зависимости поступательных скоростей РСО от радиуса фрезы питателя, для фрезерно-роторных снегоочистителей малой и средней мощности зависимости влияния числа заходов фрезы на величину потребляемой мощности питателем, зависимости влияния характерного размера частиц транспортируемой снежной массы на величину угловой скорости вращения фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя; установлены границы угловой скорости вращения фрезы при которых можно не учитывать действие аэродинамических сил в питателе РСО;

- впервые исследован механизм образования снежных валов в процессе проведения снегоочистных работ РСО, установлены характер изменения толщины снежного вала и зависимость ее изменения от ширины очищаемой территории, ширины захвата, дальности отброса снежной массы и ширины разброса снежной массы;

- определены рациональные значения основных параметров рабочего органа РСО, обеспечивающие повышение его энергоэффективности, получена оптимальная конфигурация лопасти ротора МА РСО, обеспечивающая максимум скорости снежной частицы при сходе ее с лопасти;

- разработана методика проектирования рабочего оборудования РСО, позволяющая определять основные конструктивные и технологические параметры двухступенчатых РСО;

- предложены энергоэффективное техническое решение конструкции рабочего органа питателя РСО с вертикальной осью вращения, техническое решение внутренней стенки питателя с изменяемой геометрией, а так же методика проектирования рабочего оборудования РСО.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в том, что:

- на основе разработанной совокупности математических моделей создана и апробирована методика проектирования, охватывающая широкий круг инженерных задач, связанных с проектированием и эксплуатацией РСО различного конструктивного исполнения;

- разработан, теоретически обоснован и защищен патентами РФ ряд технических решений, направленных на совершенствование конструкций питателя РСО, включая конструкцию фрезы питателя, задней стенки питателя, вертикального питателя;

- разработан и защищен путем государственной регистрации вычислительная программа, реализующая алгоритм определения параметров снежного вала, образующегося при работе РСО.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10014, <https://rscf.ru/project/23-29-10014/>.

Достоверность и обоснованность полученных результатов основывается на применении известных положений фундаментальных наук, корректностью принятых допущений, достаточным объемом экспериментальных исследований, выполненных на современном оборудовании, прошедшем метрологическую поверку, адекватностью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Внедрение результатов. Результаты работы приняты к внедрению на ООО «ИТМ «Спецмашина» (г. Курган), на разработки получен положительный отзыв от ООО «ИТМ «Спецмашина». Также результаты работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

Основная идея работы заключается в том, что повысить энергоэффективность рабочего процесса РСО можно за счет изменения, устранения или введения дополнительных подсистем, оптимизации их параметров.

Автор защищает:

- совокупность математических моделей РСО, как сложной динамической системы, позволяющих моделировать поведение снежного массива от момента захвата фрезой питателя РСО до момента формирования требуемой конфигурации снежного вала;

- совокупность аналитических и эмпирических функциональных зависимостей, отражающих выявленные закономерности, связывающие

основные факторы, определяющие энергоэффективность РСО;

- результаты экспериментальных исследований рабочих органов РСО;
- методику проектирования рабочего оборудования РСО.
- новые конструкции рабочих органов энергоэффективных РСО.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на международных научно-практических конференциях: Международной научно-технической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора К.А. Артемьева. «Дорожно-транспортный комплекс как основа рационального природопользования» (СибАДИ. – Омск, 2005); Международной научно-практической конференции «Инновации и исследования в транспортном комплексе» (Курган, 23-24 мая 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки» (СибАДИ. – Омск, 2014); Международной молодежной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 25-26 сентября 2014 г.); IV-й Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (Омск :СибАДИ, 2019); VI-й Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (Омск :СибАДИ, 2021), VII-й Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (Омск :СибАДИ, 2022) а так же на научных семинарах факультета «Нефтегазовая и строительная техника» СибАДИ (2021, 2022г.г).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 29 печатных работы, из них 12 статей в ведущих рецензируемых журналах и научных изданиях, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, 5 глав, основных результатов и выводов по работе, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 347 страниц, включая 22 таблицы, 286 рисунков, список литературы из 186 наименований, 26 страниц приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность научной проблемы исследования, определяется цель и задачи исследований, дается представление о методах исследований, о научной новизне работы, достоверности и практической значимости результатов исследований, излагается краткое содержание диссертации и полученных результатов, приводятся положения, выносимые на защиту, сведения об апробации

работы и публикациях.

В первой главе проведен патентный анализ целью, которого является подтверждение существующей классификации, базирующейся на эксплуатируемых в настоящее время конструкциях РСО. Патентный анализ показал широкую вариативность конструктивных исполнений рабочего оборудования, которое не в полной мере получило отражения в существующей классификации. Учитывая тот факт, что классификация, как инструмент научного познания, обладает рядом недостатков, которые не позволяют в полной мере учесть существующее многообразие РСО, была проведена параметрическая систематизация, базирующаяся на существующих теоретических и эмпирических закономерностях проектирования РСО, рабочее оборудование которых, в свою очередь, выступает в качестве отношений эквивалентности и отношений порядка, упорядочивающих все многообразие возможных конструктивных решений на множестве РСО. Переход к представлению РСО, как множества, позволил провести их разбиение с использованием кластерного анализа. Визуализация данного упорядочивания представлена в виде графа (рисунок 1), и позволила провести уточнение ряда критериев. Анализ графа показал, что РСО имеют несколько самостоятельных направлений развития, однако при этом, представляют собой объединение и/или исключение отдельных подмножеств, являющихся общими для каждого из этих самостоятельных направлений, что определяет важную научную проблему идентификации наличия совокупности математических моделей, описывающих работу рабочего оборудования РСО, а в случае отсутствия, необходимости их разработки. Это также позволяет создавать принципиально новые конструкции РСО.

Анализ выявленных тенденций показал, что интенсификация процесса проведения снегоочистных работ за счет увеличения скоростей рабочего оборудования сопровождается качественными изменениями, которые заключаются в повышении структурной сложности и/или изменении формы рабочего оборудования.

Таким образом, традиционное увеличение пропускной способности, повышения скоростей вращения рабочего органа, поступательной скорости движения базовой машины, как правило, вызывает увеличение энергии, затрачиваемой на уборку условной единицы снежной массы, т.е. снижению энергоэффективности РСО, а существующие методы расчета не позволяют моделировать процесс работы снегоочистителя как единый от момента захвата снежного массива фрезерным рабочим органом до момента формирования требуемой конфигурации снежного вала. В совокупности образуется противоречие между существующими методиками проектирования РСО и стратегией научно-технологического развития нашей страны, одним из направлений которой является повышение эффективности содержания объектов инфраструктуры и снижение затрат энергии на выработку единицы продукции.

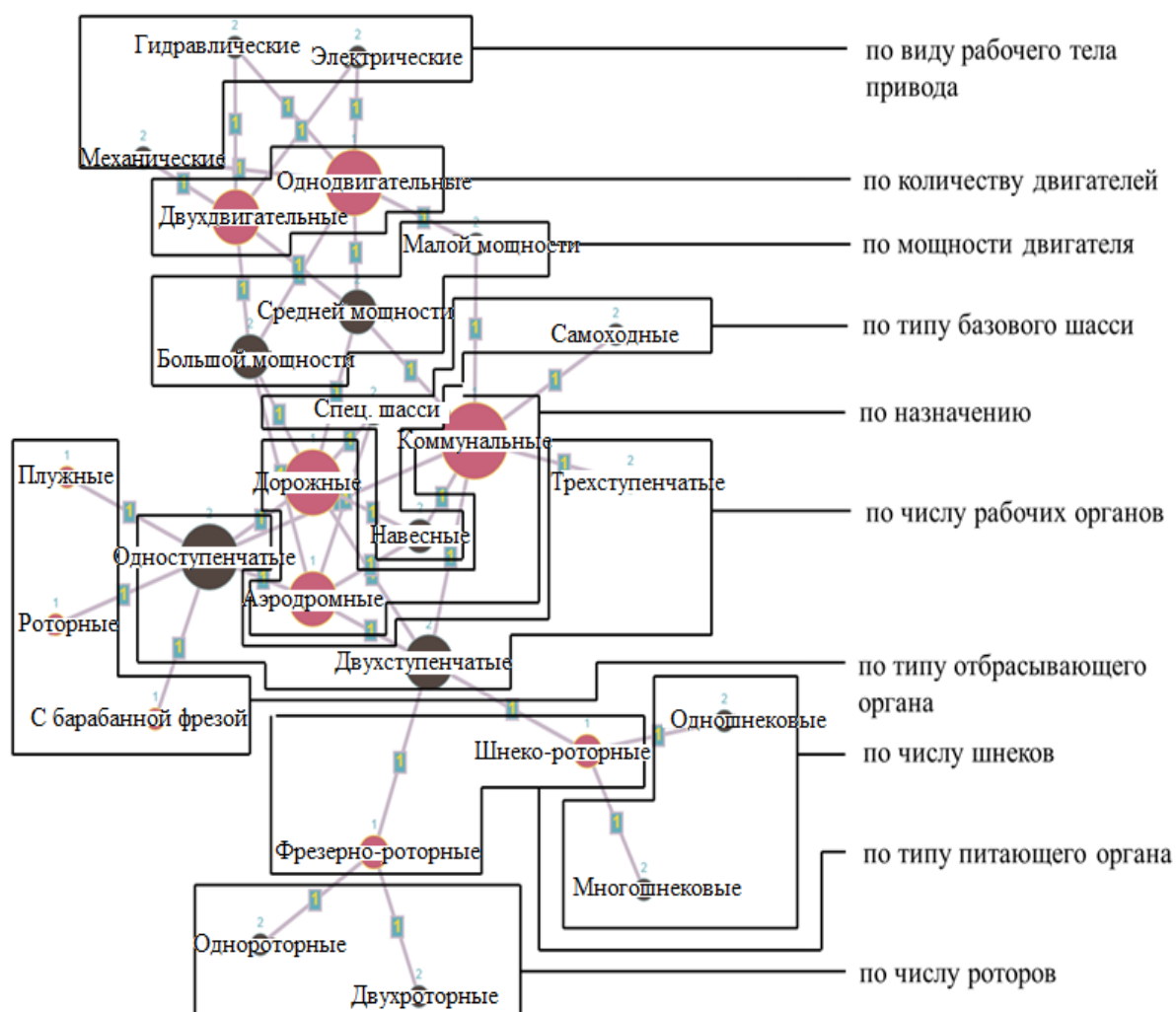


Рисунок 1 – Классификационные признаки и классификация РСО

На основании проведенного анализа были определены следующие направления решения данной проблемы:

- идентификация и создание обобщенной математической модели взаимодействия элементов рабочих органов РСО с транспортируемой снежной средой при проведении снегоочистных работ;
- проведения теоретических исследований влияния конструктивных и технологических параметров, а так же характеристик снежной среды на эффективность работы рабочего оборудования РСО;
- разработка новой энергоэффективной конструкции рабочего оборудования РСО.

Вторая глава посвящена разработке, на основе системного подхода, совокупности математических моделей работы рабочего оборудования РСО, позволяющих осуществлять математическое моделирование от момента захвата снежного массива рабочим органом РСО до момента формирования требуемой конфигурации снежного вала.

Для выявления закономерностей в процессах, реализуемых рабочим органом РСО, были введены системы координат, в которых осуществлялось математическое моделирование взаимодействия рабочих органов (рисунок 2) со снежной средой.

Кинематический анализ существующих конструкций РСО, описанных в работах Шалмана Д.А., Иванова А.Н., Баловнева В.И., Мерданова Ш.М. и др. показал, что в основе движения рабочих органов РСО лежат траектория винтовой линии и циклоиды (рисунок 3).

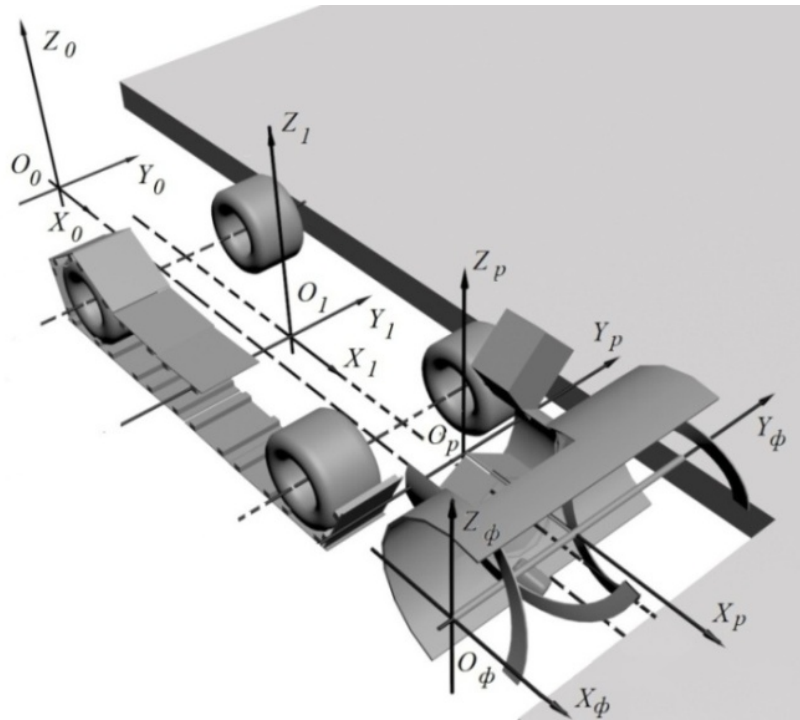
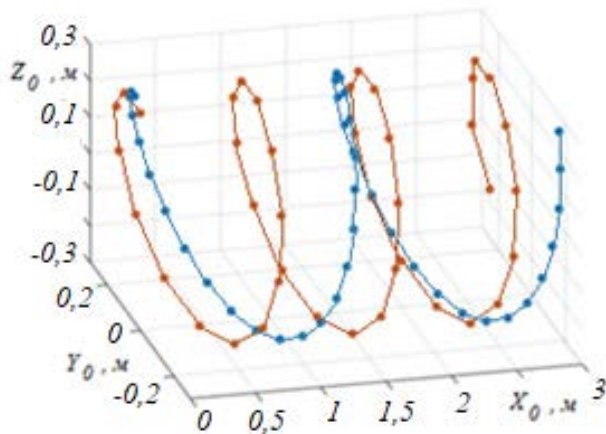
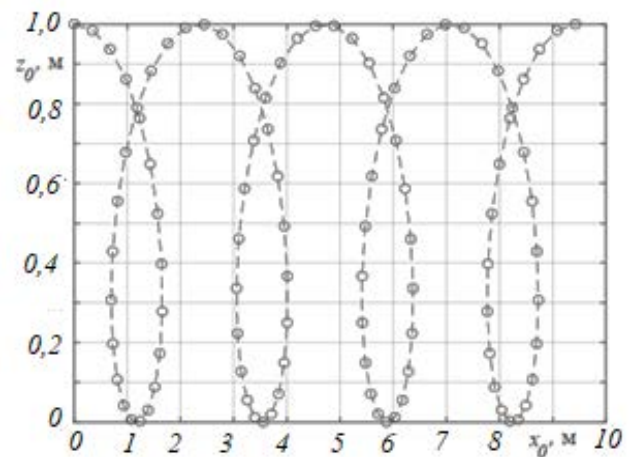


Рисунок 2 – Системы координат, в которых осуществляется описание взаимодействия рабочих органов РСО со снежной средой



а)



б)

Рисунок 3 – Траектории движения рабочих органов: а) винтовая траектория движения i -й точки лопасти ротора снегоочистителя при $V_{пер}=3$ м/с, при $\omega_{\psi}=12$ рад/с (синий) и $\omega_{\psi}=21$ рад/с (красный); б) циклоидная траектория движения i -й точки ленты фрезы

Данный факт позволил обобщить уравнения траекторий движения произвольных точек рабочих органов и получить общую систему уравнений, описывающую траекторию движения произвольной точки рабочего органа РСО (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t) = V \cdot t + R \cdot (\sin \varphi(t) + \sin \gamma(t)); \\ y_0(t) = R \cdot (\sin \psi(t) + \cos \gamma(t)); \\ z_0(t) = R \cdot (\cos \varphi(t) + \sin \psi(t)); \\ \varphi(t) = \omega_\varphi \cdot t; \\ \psi(t) = \omega_\psi \cdot t; \\ \gamma(t) = \omega_\gamma \cdot t. \end{array} \right. \quad (1)$$

Математические модели рабочих органов РСО, разработанные предшественниками, обладают двумя существенными недостатками: во первых, их результаты носят изолированный характер и не имеют однозначной связи между собой; во вторых основные допущения принимаемые при составлении расчетных схем, которые существенно идеализируют реально протекающие процессы при проведении снегоочистных работ РСО.

На основе существующих моделей представления снега, как материальной частицы, описанной в работах Д.А. Шалмана, А.Н. Иванова, В.И. Баловнева, или отдельного крупнокускового образования, как пример сплошной среды, что так же получило отражение в работах А.Н. Иванова, В.А. Мишина и В.И. Баловнева, делается вывод об отсутствии представления его как совокупности частиц конечного размера, взаимодействующих друг с другом.

Анализ существующих результатов исследований поведения снега под воздействием внешней нагрузки и его физических и механических характеристик, показал их достаточность для разработки математической модели взаимодействия элементов рабочего оборудования со снежной массой, как совокупности частиц конечного размера, взаимодействующих между собой. За основу дальнейшего учета математической модели такого взаимодействия была взята теория контактного взаимодействия Герца.

На рисунке 4 представлена расчетная схема определения положений контактирующих частиц, углов вектора силы контактного взаимодействия в системе координат $O_\phi X_\phi Y_\phi Z_\phi$, связанной с рабочим оборудованием РСО, для определения проекций силы контактного взаимодействия частиц, при горизонтальном положении оси вращения фрезы. В процессе транспортирования снежных частиц на них действуют: $N_{\phi i}$, - сила нормальной реакции поверхности фрезы, где $\alpha_{\phi i}$, $\beta_{\phi i}$, $\gamma_{\phi i}$, углы между $N_{\phi i}$ и осями координат OX_ϕ , OY_ϕ , OZ_ϕ , соответственно; $N_{\psi i}$ - сила нормальной реакции опорной поверхности, направление действия которой определяется углами α_i , β_i , γ_i , соответственно; $F_{\text{тр} \phi i}$ - сила трения частицы об опорную поверхность, φ_i , ψ_i , ζ_i - углы между направлением касательной к траектории

движения и осями координат OX_ϕ , OY_ϕ , OZ_ϕ , соответственно; сила трения частицы о поверхность ленты фрезы, $F_{тр\phi i}$, направление действия которой определяется углами, $\varphi_{\phi i}$, $\psi_{\phi i}$, $\zeta_{\phi i}$; \vec{G}_i - сила тяжести и F_{ij} - сила контактного взаимодействия снежных частиц между собой; $\alpha_{c ij}$, $\beta_{c ij}$, $\gamma_{c ij}$ - углы между линией действия силы контактного взаимодействия и осями координат OX_ϕ , OY_ϕ , OZ_ϕ .

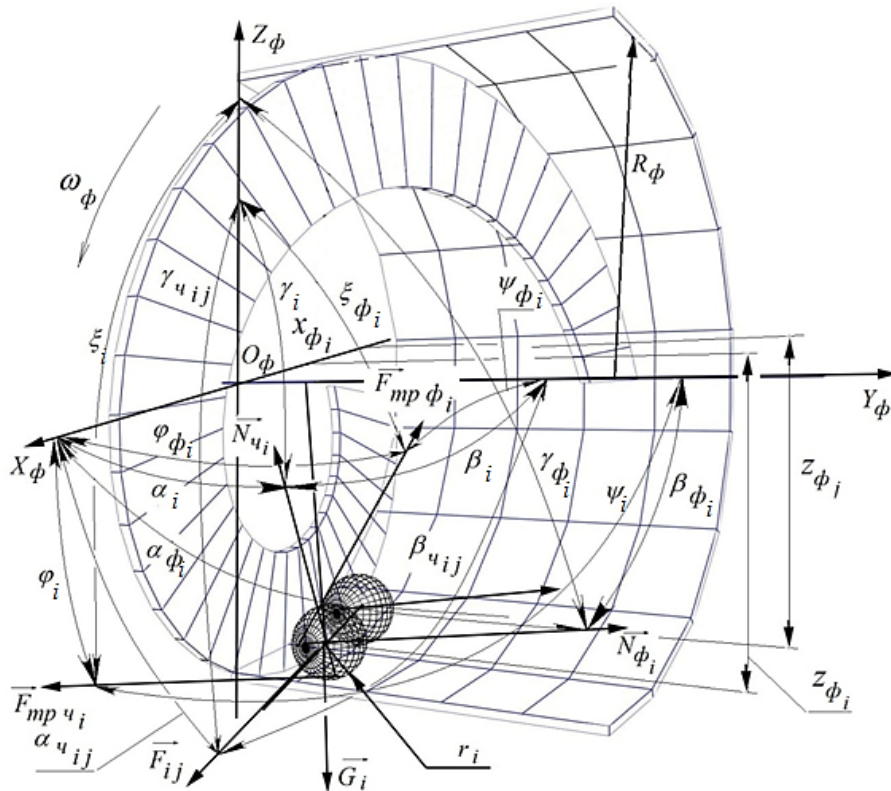


Рисунок 4 – Пространственная расчетная схема положения i снежной частицы и действующих на нее сил, при взаимодействии с лентой горизонтальной фрезы

При формировании математической модели были приняты следующие допущения: фреза вращается с постоянной угловой скоростью, ω_ϕ ; снегоочиститель движется поступательно с постоянной скоростью, $V_{пер}$; связи голономные, идеальные; снежная частица имеет выпуклую поверхность без заострений и ребер; вращением снежной частицы пренебрегаем; снежная частица скользит по поверхности отвала питателя и поверхности ленты фрезы; удар отсутствует; действием аэродинамических сил пренебрегаем; транспортируемая снежная масса представляет собой совокупность снежных частиц, высота которой соответствует диаметру этих частиц; частицы транспортируемой снежной массы взаимодействуют друг с другом; дробление и коагуляция частиц отсутствует; все вычисления проводились при заданной половине ширины захвата питателя РСО, B .

На основе уравнений Лагранжа первого рода получены уравнения движения группы снежных частиц в пространстве рабочего органа РСО (2), и уравнения его нормальных реакций (3).

$$\begin{aligned}
\ddot{x}_{\phi i} &= \frac{N_{\phi i}}{m_i} A_x + \frac{N_{\psi i}}{m_i} B_x + \omega_{\phi}^2 x_{\phi i} + 2\omega_{\phi} \cdot \dot{z}_{\phi i} - \frac{F_{i,j}^x}{m_i}, \\
\ddot{y}_{\phi i} &= \frac{N_{\phi i}}{m_i} A_y + \frac{N_{\psi i}}{m_i} B_y - \frac{F_{i,j}^y}{m_i}, \\
\ddot{z}_{\phi i} &= \frac{N_{\phi i}}{m_i} A_z + \frac{N_{\psi i}}{m_i} B_z - g + \omega_{\phi}^2 z_{\phi i} + 2\omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} - \frac{F_{i,j}^z}{m_i}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Уравнения нормальных реакций отнесенных к массе i -й частицы для фрезы и отвала питателя РСО имеют вид:

$$\frac{N_{\phi i}}{m_i} = \frac{v_x^2 + v_z^2}{z_{\phi i} \cdot M_1} S_1 + g \frac{\frac{S_1}{M_1} - \frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}}}{\frac{F_1 S_1}{M_1} - S_2} - \omega_{\phi}^2 \left(\frac{x_{\phi i}^2}{z_{\phi i}} + z_{\phi i} \right) \frac{S_1}{M_1} + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \left(\frac{z_{\phi i}}{R_{\phi}} - \frac{x_{\phi i} \cdot S_1}{z_{\phi i} \cdot M_1} \right) - \tag{3}$$

$$-\frac{F_{i,j}^z}{m_i} \left(\frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}} - \frac{S_1}{M_1} \right) - \frac{F_{i,j}^y}{\operatorname{tg}(\theta) \cdot m_i}$$

$$\frac{N_{\psi i}}{m_i} = -\frac{1}{S_1} \left(-\frac{g \cdot x_{\phi i}}{R_{\phi}} + \frac{N_{\psi i}}{m_i} \cdot S_2 - \frac{F_{i,j}^x \cdot z_{\phi i} / R_{\phi} - F_{i,j}^z \cdot x_{\phi i} / R_{\phi} - F_{i,j}^y / \operatorname{tg}(\theta)}{m_i} \right). \tag{4}$$

где:

$$\begin{aligned}
S_1 &= \frac{z_{\phi i} \cdot A_x \operatorname{tg}(\theta)}{R_{\phi}} - \frac{x_{\phi i} \cdot A_z \operatorname{tg}(\theta)}{R_{\phi}} + A_y, \\
S_2 &= -\frac{z_{\phi i}^2 + x_{\phi i}^2}{R_{\phi}^2} (\sin(\theta) - f_{\phi} \cos(\theta)) + \frac{(\cos(\theta) - f_{\phi} \sin(\theta))}{\operatorname{tg}(\theta)}, \\
M_1 &= -\frac{x_{\phi i} \cdot A_x}{z_{\phi i}} + A_z, \quad A_x = -\frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}} - f_{\phi} \frac{\dot{x}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}, \\
A_y &= f_{\phi} \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}, \quad A_z = \frac{z_{\phi i}}{R_{\phi}} + f_{\phi} \frac{\dot{z}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}, \\
B_x &= \frac{z_{\phi i}}{R_{\phi}} \left(\frac{\operatorname{tg}(\theta)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\theta)}} + f_{\phi} \cdot \cos(\theta) \right), \\
B_y &= -\frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\theta)}} - f_{\phi} \cdot \sin(\theta), \quad B_z = -\frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}} \left(\frac{\operatorname{tg}(\theta)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\theta)}} - f_{\phi} \cdot \cos(\theta) \right).
\end{aligned}$$

Полученные уравнения позволяют в значительной степени формализовать составление уравнений взаимодействия роторного снегоочистителя со снежной средой при различно ориентированной в пространстве осью вращения фрезы. Так для фрезы питателя с вертикальной осью вращения, представленной на рисунке 5, уравнения примут вид:

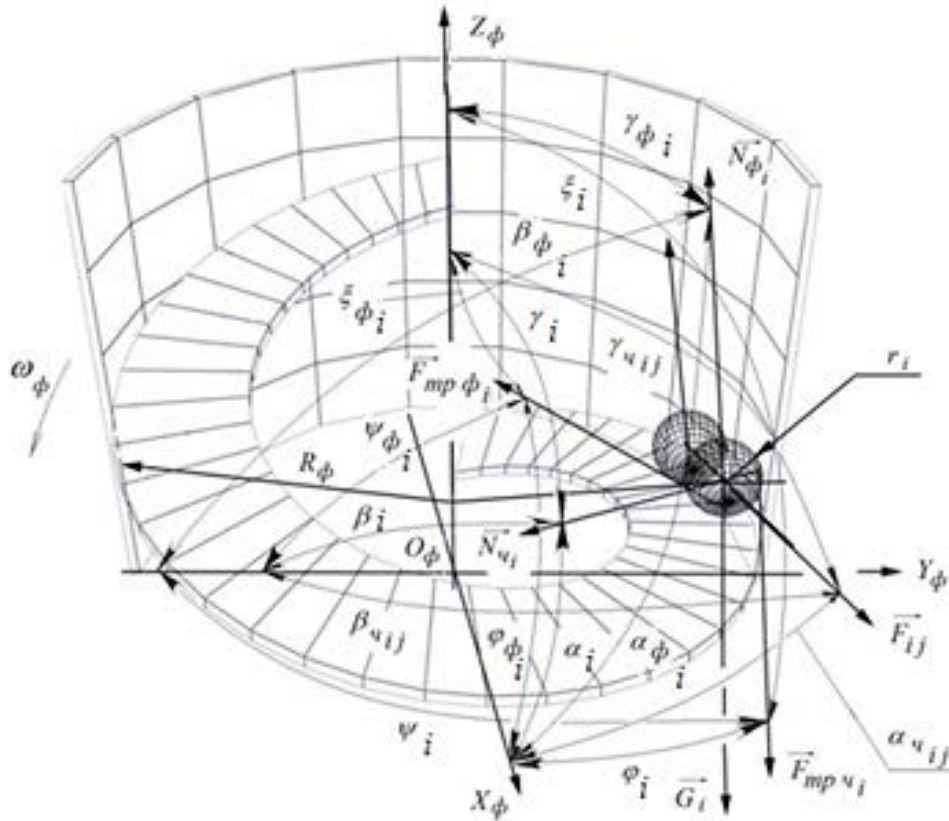


Рисунок 5 – Пространственная расчетная схема положения i -й снежной частицы и действующих сил на нее, при ее взаимодействии с лентой вертикальной фрезы (обозначения соответствуют обозначениям на рисунке 4)

$$\begin{aligned}\ddot{x}_{\phi i} &= \frac{N_{\phi i}}{m_i} A_x + \frac{N_{\psi i}}{m_i} B_x + \omega_{\phi}^2 x_{\phi i} + 2\omega_{\phi} \cdot \dot{y}_{\phi i} - \frac{F_{i,j}^x}{m_i}, \\ \ddot{y}_{\phi i} &= \frac{N_{\phi i}}{m_i} A_y + \frac{N_{\psi i}}{m_i} B_y + \omega_{\phi}^2 y_{\phi i} + 2\omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} - \frac{F_{i,j}^y}{m_i}, \\ \ddot{z}_{\phi i} &= \frac{N_{\phi i}}{m_i} A_z + \frac{N_{\psi i}}{m_i} B_z - g - \frac{F_{i,j}^z}{m_i}.\end{aligned}\quad (5)$$

$$\frac{N_{\phi i}}{m_i} = \frac{g}{M_2} + \frac{tg\theta}{M_2 \cdot R_{\phi}} \left(2 \cdot \omega_{\phi} \cdot (\dot{x}_{\phi i} x_{\phi i} - \dot{y}_{\phi i} y_{\phi i}) - \frac{F_{i,j}^y}{m_i} x_{\phi i} + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} z_{\phi i} \right) - \frac{N_{\psi i}}{m_i} \frac{N_2}{M_2} - \frac{F_{i,j}^z}{m_i \cdot M_2}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned}\frac{N_{\psi i}}{m_i} \left(N_1 - N_2 \frac{M_1}{M_2} \right) &= \frac{F_{i,j}^y}{m_i} \left(y_{\phi i} + x_{\phi i} \frac{tg(\theta) M_1}{R_{\phi} M_2} \right) + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \left(x_{\phi i} - z_{\phi i} \frac{tg(\theta) M_1}{R_{\phi} M_2} \right) + \\ &+ \frac{F_{i,j}^z}{m_i} \frac{M_1}{M_2} - g \frac{M_1}{M_2} - 2 \cdot \omega_{\phi} \left((\dot{x}_{\phi i} x_{\phi i} - \dot{y}_{\phi i} y_{\phi i}) \frac{tg(\theta) M_1}{R_{\phi} M_2} + (\dot{x}_{\phi i} y_{\phi i} - \dot{y}_{\phi i} x_{\phi i}) \right) - \\ &- \omega_{\phi}^2 R_{\phi}^2 - \dot{x}_{\phi i} - \dot{y}_{\phi i}\end{aligned}\quad (7)$$

где:

$$A_x = y_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} (1 + f_{\phi} \cdot ctg(\theta)), \quad A_y = x_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} (1 + f_{\phi} \cdot ctg(\theta)),$$

$$A_z = R \frac{\omega}{\phi} \operatorname{ctg}(\theta) (-\operatorname{ctg}(\theta) + f_{\phi}),$$

$$B_x = 2x_{ci} + 2f_{\phi} \frac{\dot{x}_{ci}}{\sqrt{\dot{x}_{ci}^2 + \dot{y}_{ci}^2 + \dot{z}_{ci}^2}}, \quad B_y = 2y_{ci} + 2f_{\phi} \frac{\dot{y}_{ci}}{\sqrt{\dot{x}_{ci}^2 + \dot{y}_{ci}^2 + \dot{z}_{ci}^2}},$$

$$B_z = 2f_{\phi} \frac{\dot{z}_{ci}}{\sqrt{\dot{x}_{ci}^2 + \dot{y}_{ci}^2 + \dot{z}_{ci}^2}}, \quad M_1 = x_{ci} \cdot A_x + y_{ci} \cdot A_y, \quad N_1 = x_{ci} \cdot B_x + y_{ci} \cdot B_y,$$

$$M_2 = A_x + \frac{\operatorname{tg}(\theta)}{R \phi} (y_{ci} \cdot A_x - x_{ci} \cdot A_y), \quad N_2 = B_x + \frac{\operatorname{tg}(\theta)}{R \phi} (y_{ci} \cdot B_x - x_{ci} \cdot B_y).$$

Для решения уравнений движения и определения нормальных реакций были сформулированы начальные и граничные условия. Влияние снежного массива учитывалось в виде подвижного граничного условия:

$$x_{ci} = V \cdot \Delta t.$$

Данное условие применимо для i - й частицы в течение всего периода времени T_n :

$$T_n = \Delta t = \frac{2 \cdot r_{ci}}{\omega_{\phi} \cdot (R_{\phi} - r_{ci}) \cdot \operatorname{tg} \theta}. \quad (8)$$

Одним из важнейших результатов использования данных уравнений (2 - 4), помимо их унификации и повышения адекватности математической модели, является то, что их решения представляют собой начальные условия для математических моделей последующих подсистем РСО. Это дает возможность использования других инструментов научного исследования, например вариационного исчисления, что было продемонстрировано в работе на примере ротора МА, при решении задачи на обеспечение экстремума функционала максимальной скорости снежной частицы в момент ее схода с лопасти ротора.

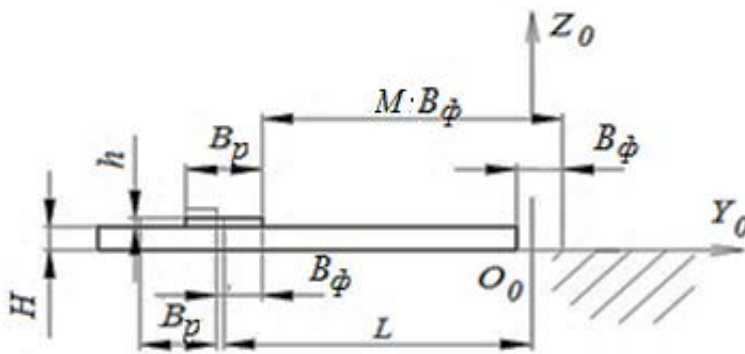


Рисунок 6 - Расчетная схема отброса снежной массы в поперечной плоскости, где B_{ϕ} – ширина захвата рабочего органа РСО; B_p – ширина разброса снежной массы; h – толщина снежного покрова; L – дальность отброса снежной массы; M – общее количество проходов

При снегоочистке городских дорог и селитебных территорий на первый план выходит задача о формировании снежного вала на требуемом расстоянии и необходимой конфигурации. В данной работе впервые был рассмотрен механизм формирования снежного вала в продольном и поперечном направлениях относительно очищаемой полосы.

В предыдущих исследованиях, связанных с работой РСО, акцент

делался на определение максимальной дальности отброса снежной массы и дальность расположения центра тяжести снежного вала при отбросе снежной массы. Такая постановка задачи правомерна при очистке загородных автомобильных дорог.

Для решения данной задачи была составлена расчетная схема формирования снежного вала, представленная на рисунке 6.

Рост толщины снежного вала, H_0 , описывается рекуррентными соотношениями и для первого снежного вала имеет вид:

- при $0 < k \leq M$:

$$(k-1) \cdot B < y < L, H_0 = k \cdot h \cdot \frac{B_\phi}{B_p} + h, \quad (9)$$

где k – текущее количество проходов до места образования снежного вала.

Таким образом, полученные математические модели поведения снежной среды во взаимодействии с элементами рабочего органа позволяют проводить исследования процесса взаимодействия роторных снегоочистителей со снежной средой от момента захвата фрезой питателя до момента формирования снежного вала требуемой конфигурации.

В третьей главе представлены результаты теоретических исследований РСО. Получены выражения показателей энергоэффективности рабочих органов РСО с учетом взаимодействия снежных частиц в транспортируемой снежной массе. Для оценки энергоэффективности фрезы питателя использовалось уравнение расчета необходимой мощности на транспортирование снежной массы:

$$N_{\text{цл}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_{\text{ч}}} \left(R_\phi - r_{\text{ч}i} \right) \left[N_{\phi i} (\cos \theta + f_\phi \sin \theta) + N_{\text{ч}i} f_{\text{ч}} \frac{V_{y_i}}{\sqrt{V_{x_i}^2 + V_{y_i}^2 + V_{z_i}^2}} \right] \omega, \quad (10)$$

В качестве второго показателя была принята величина производительности, которая, может быть определена выражением:

$$\Pi_{\text{п}} = \frac{4}{3} \pi \rho \frac{\sum_{i=0}^{n_s} r_{\text{ч}}^3 - \sum_{i=0}^{n_{\text{ПТР}}} r_{\text{ч}}^3}{t_{\text{п}}} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot r_{\text{ч}}^3 \frac{n_s - n_{\text{ПТР}}}{t_{\text{п}}}. \quad (11)$$

В дальнейшем все оценки полученных результатов теоретических исследований базировались на определении выражений (10), (11) и отношении затрачиваемой мощности на теоретическую производительность РСО, характеризующего собой удельную энергоэффективность, NP , Вт·с/кг. Чем меньше значение данного показателя, тем выше удельная энергоэффективность рабочего органа РСО.

Общее количество конструктивных и технологических параметров, описывающих, с необходимой точностью РСО, в разработанной математической модели составило 17. Варьируемыми параметрами являлись: угловая скорость вращения фрезы, ω_ϕ , характерный размер транспортируемой частицы, $r_{\text{ч}}$, число заходов ленты фрезы, n_3 , угол захода

ленты фрезы, θ . Характерный размер транспортируемых частиц варьировался в диапазоне $r_q = 0,01 \dots 0,03$ м, с шагом 0,005 м, угол захода принимал значения $\theta = 10 \dots 50^\circ$, с шагом 10° , угловая скорость вращения фрезы $\omega_\phi = 6 \dots 12$ рад/с, с шагом 2 рад/с. Исследования проводились для трех, четырех и пятизаходных фрез.

Сравнение осредненных значений по пространству и средних суммарных значений по времени сил нормальных реакций, как для опорной, так и для боковой поверхностей, показало что:

$$N_{чс} \approx N_{чи}^{max}, N_{фс} \approx N_{фи}^{max}. \quad (12)$$

При увеличении размера транспортируемых частиц, происходит увеличение значений сил нормальных реакций, действующих как на опорную поверхность, так и на боковую поверхность. На рисунке 7, в качестве примера, показаны зависимости максимальных значений сил нормальных реакций боковой, $N_{фmax}$, и опорной, $N_{чmax}$, поверхностей для $\theta = 20^\circ$ и $\omega_\phi = 8$ рад/с.

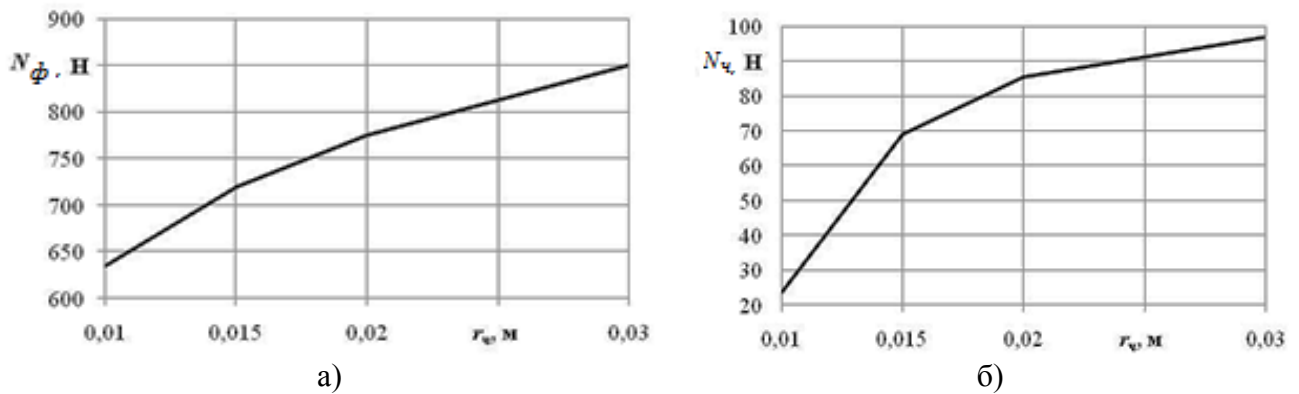


Рисунок 7 – Зависимость максимального значения силы нормальной реакции от характерного размера транспортируемых частиц, r_q , где:

- а) для боковой поверхности рабочего элемента, $N_{фmax}$,
- б) для опорной поверхности рабочего элемента, $N_{чmax}$

В ходе исследований было получено выражение суммарных средних значений затрат мощности горизонтальной фрезы, N_{cp} , в зависимости от характерного размера частиц и числа заходов фрезы:

$$N_{cp} = 122,1 + 39,51 \cdot r_q + 41,98 \cdot n_3 - 15,03 \cdot r_q^2 + 16,24 \cdot r_q \cdot n_3 - 8,68 \cdot n_3^2 - 8,27 \cdot r_q^2 \cdot n_3 - 2,4 \cdot r_q \cdot n_3^2 + 5,72 \cdot n_3^3. \quad (13)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2 = 0,9993$.

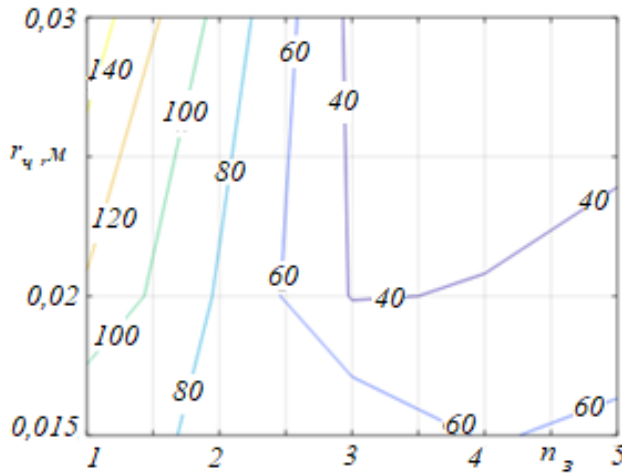
Установлено, что выборки суммарных значений потребляемой мощности по группам транспортируемых частиц, используемых для осреднения потребляемой мощности на стационарном режиме, достаточно хорошо описываются нормальным законом распределения.

Среднее значение производительности, Π_{cp} , в зависимости от характерного размера частиц и числа заходов фрезы, было аппроксимировано следующей функцией:

$$\Pi_{cp} = 2,307 - 1,875 \cdot r_q + 0,889 \cdot n_3 + 0,682 \cdot r_q^2 - 1,09 \cdot r_q \cdot n_3 - 0,504 \cdot n_3^2 + 0,632 \cdot r_q^2 \cdot n_3 + 0,298 - r_q \cdot n_3^2 - 0,048 \cdot n_3^3. \quad (14)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,997$.

На рисунке 8 представлена картограмма удельной энергоэффективности, NP , от размера частиц и числа заходов фрезы, из которой следует, что наиболее эффективно работает фреза питателя на круп-



ных частицах, при этом наблюдается область наиболее эффективного числа заходов фрезы. Так при характерном размере частиц, транспортируемой снежной массы, $r_ч = 0,03$ м, число заходов, $n_з$, обеспечивающих максимум удельной энергоэффективности, составляет от 3 до 5.

Рисунок 8 – Картограмма, NP , в зависимости от размера частиц, $r_ч$, транспортируемой снежной массы и числа заходов фрезы, $n_з$

Зависимость суммарных средних значений затрат мощности, $N_{с\text{ ср}}$, от угла захода ленты фрезы, θ , и числа заходов, $n_з$, описана следующим выражением:

$$N_{с\text{ ср}} = -15,36 + 250,7 \cdot n_з - 21,62 \cdot \theta - 22,84 \cdot n_з^2 - 14,22 \cdot n_з \cdot \theta + 1,85 \cdot \theta^2 + 1,34 \cdot n_з^3 + 1,05 \cdot \theta \cdot n_з^2 + 0,281 \cdot n_з \cdot \theta^2 - 0,048 \cdot \theta^3 - 0,053 \cdot n_з^3 \cdot \theta - 0,006 \cdot n_з^2 \cdot \theta^2 - 0,002 \cdot n_з \cdot \theta^3 + 0,0004 \cdot \theta^4 \quad (15)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,999$.

Зависимость суммарных средних значений затрат мощности, $N_{с\text{ ср}}$, от угла захода ленты фрезы, θ и характерного размера частиц, $r_ч$, описана выражением:

$$N_{с\text{ ср}} = -91,36 + 1,65 \cdot 10^4 \cdot r_ч + 4,198 \cdot \theta - 1,14 \cdot 10^5 \cdot r_ч^2 - 608,9 \cdot r_ч \cdot \theta + 0,0055 \cdot \theta^2 + 37,91 \cdot \theta \cdot r_ч^2 + 5,33 \cdot r_ч \cdot \theta^2 - 0,001 \cdot \theta^3 \quad (16)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,934$.

Зависимость суммарных средних значений производительности, $\Pi_{с\text{ ср}}$, от угла захода ленты фрезы, θ , и числа заходов, $n_з$, аппроксимирована выражением:

$$\Pi_{с\text{ ср}} = 390,5 + 218,5 \cdot n_з - 58,94 \cdot \theta - 73,41 \cdot n_з^2 - 6,45 \cdot n_з \cdot \theta + 3,37 \cdot \theta^2 + 7,3 \cdot n_з^3 + 1,93 \cdot \theta \cdot n_з^2 + 0,017 \cdot n_з \cdot \theta^2 - 0,076 \cdot \theta^3 - 0,171 \cdot n_з^3 \cdot \theta - 0,006 \cdot n_з^2 \cdot \theta - 0,004 \cdot n_з^2 \cdot \theta^2 + 0,00015 \cdot n_з \cdot \theta^3 - 0,0006 \cdot \theta^4 \quad (17)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,998$.

Зависимость суммарных средних значений производительности, $\Pi_{с\text{ ср}}$, в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и числа заходов, $n_з$, аппроксимирована выражением:

$$\begin{aligned}
 P_{cp} = & 0,4535 + 0,4451 \cdot r_q + 0,066 \cdot \theta + 0,113 \cdot r_q^2 - 0,011 \cdot r_q \cdot \theta - 0,73 \cdot \theta^2 + \\
 & + 0,0425 \cdot \theta \cdot r_q^2 - 0,0472 \cdot r_q \cdot \theta^2 - 0,0798 \cdot \theta^3 \quad . \quad (18)
 \end{aligned}$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,958$.

Картограммы зависимости удельной энергоэффективности от угла захода, θ , числа заходов боковой поверхности, n_z , и характерного размера транспортируемых частиц, r_q , изображены на рисунках 9 и 10, соответственно.

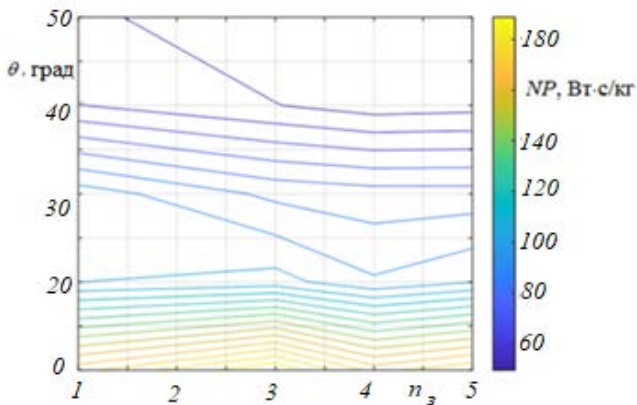


Рисунок 9 – Картограмма удельной энергоэффективности, NP , от числа заходов, n_z , фрезы и угла захода ленты фрезы, θ , транспортируемой снежной массы с характерными размерами частиц, $r_q = 0,03$ м

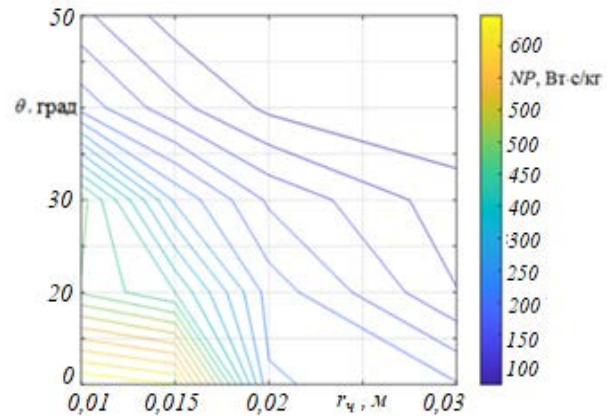


Рисунок 10 – Картограмма удельной энергоэффективности, NP , от угла захода ленты фрезы, θ , и характерного размера частиц транспортируемой снежной массы, r_q , при числе заходов фрезы, $n_z=3$, $\omega_\phi=8$ рад/с

Из рисунков 9, 10 следует, что наиболее эффективными параметрами, обеспечивающие минимум удельных энергозатрат являются угол захода в диапазоне $40^\circ \leq \theta < 50^\circ$, число заходов ленты фрезы $n_z = 3$, при угловой скорости вращения $\omega_\phi=8$ рад/с и транспортировании снежной массы с характерным размером снежных частиц $0,02 \leq r_q < 0,03$ м. При углах захода менее 20° транспортирование снежной массы с характерным размером частиц, является нерациональным, в связи со значительным уменьшением удельной энергоэффективности, NP .

Зависимость средних значений мощностей транспортируемой снежной массы, N_{cp} , в зависимости от угловой скорости вращения фрезы, ω_ϕ , и угла захода ленты фрезы, θ , за один загрузочный цикл для транспортируемой снежной массы с характерными размерами частиц $r_q=0,01, 0,02, 0,03$ м, представлено на рисунке 11. На рисунке 12 показаны зависимости для производительности элементов рабочего оборудования РСО.

Получена зависимость изменения суммарной мощности, затрачиваемой на транспортирование снежной массы от числа заходов фрезы питателя, n_z , с углом захода, $\theta=10^\circ$, которая имеет вид:

$$N_{cp} = 88,221n_z + 85,66. \quad (19)$$

В ходе проведенных теоретических исследований была решена задача по моделированию оптимальной конфигурации лопасти ротора МА РСО из условия обеспечения максимума скорости снежной частицы при сходе ее с

лопасти ротора (рисунок 13).

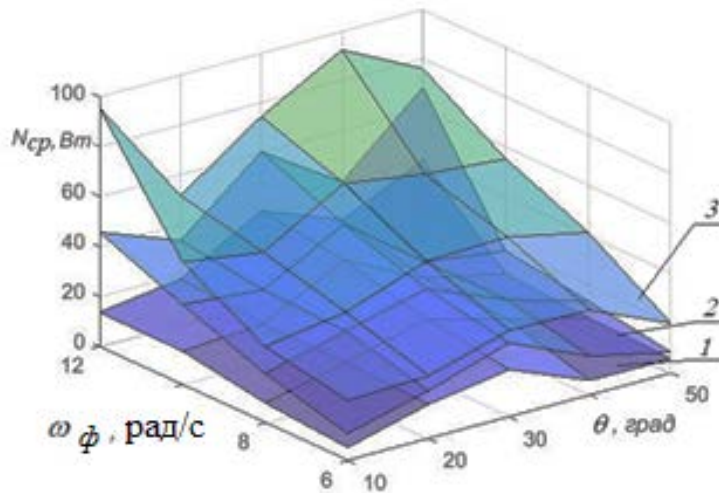


Рисунок 11 – Зависимость средних значений мощностей, N_{cp} , транспортируемой снежной массы, N_{cp} , в зависимости от угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , и угла захода ленты фрезы, θ , за один загрузочный цикл для однозаходной фрезы при максимальной емкости питателя, где 1- $r_i=0,01$ м; 2 - $r_i=0,02$ м; 3 - $r_i=0,03$ м

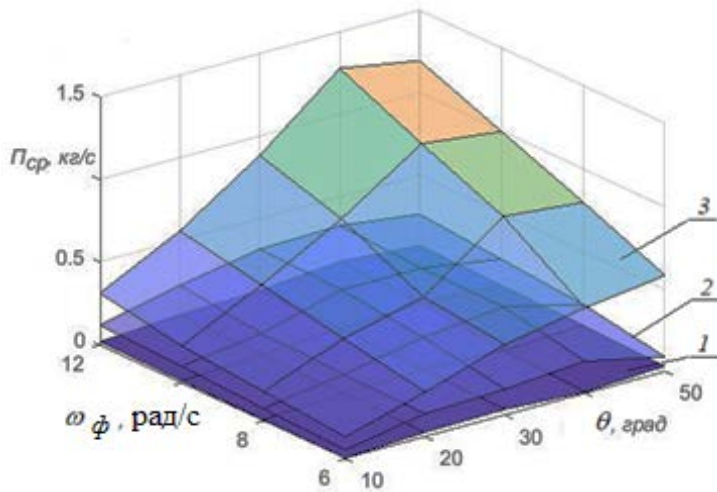


Рисунок 12 – Зависимость производительности фрезы питателя, P_{cp} , от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , где 1- $r_i=0,03$ м; 2 - $r_i=0,02$ м; 3 - $r_i=0,03$ м

Была определена зависимость углов наклона участков лопасти ротора, η , град, от угла поворота, φ_p , град, в системе координат $Y_p O_p Z_p$, аппроксимированная выражением:

$$\eta = -89,98 - 0,1844 \cdot \cos(0,017 \cdot \varphi_p) - 0,0844 \cdot \sin(0,017 \cdot \varphi_p), \quad (20)$$

где $\varphi_p \geq 0$.

Таким образом, повысить удельную энергоэффективность РСО возможно за счет создания лопасти оптимальной конфигурации. Следует отметить, что данную конфигурацию лопасти весьма затруднительно получить путем простых механических операций, однако она может быть реализована за счет применения аддитивных технологий.

Следующей задачей решенной в ходе исследований было изучение закономерностей формирования снежного вала от конструктивных и технологических параметров элементов рабочих органов РСО.

В результате исследований установлено, что изменение толщины снежного вала, h , носит нелинейный характер. Зависимость толщины снежного вала, h , от ширины очищаемой территории, B_o , при различной ширине захвата питателя роторного снегоочистителя, B_{ϕ} , ширине разброса

снежной массы, $B_p=0,5$ м, и дальности отброса, $L=10$ м, представлена на рисунке 14, и описана выражением:

$$h = 0,1943 + 1,24 \cdot B_\phi - 0,1987 \cdot B_0 - 1,39 \cdot B_\phi^2 + 0,1594 \cdot B_\phi \cdot B_0 + 0,0076 \cdot B_0^2. \quad (21)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,949$.

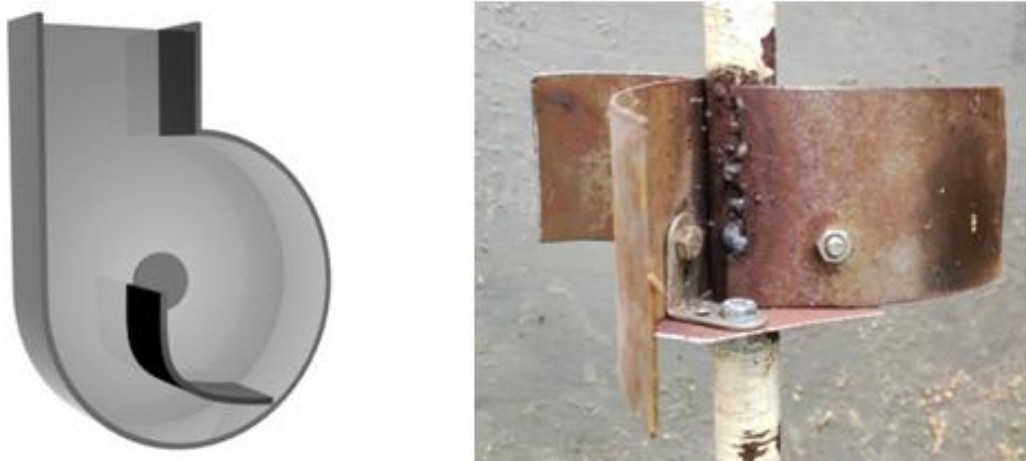


Рисунок 13 - Профиль лопасти, обеспечивающей максимум скорости снежной частицы и ее прототип

В качестве примера на рисунке 15 представлены результаты расчета изменения толщины снежного вала, h , при работе РСО, в зависимости от ширины разброса, B_p , количества проходов, k .

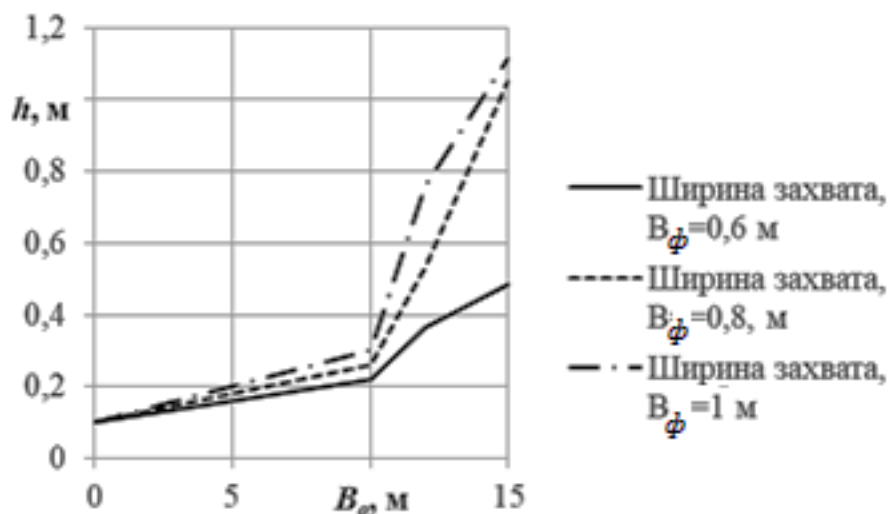


Рисунок 14 – Изменение толщины снежного вала, h , в зависимости от ширины очищаемой территории, B_0

Представленные выражения и алгоритм формирования снежного вала могут быть использованы для любого вида РСО, и позволяют решать задачу формирования снежного вала требуемой конфигурации.

В результате проведенных исследований, было установлено, что влияние числа заходов на затраты средних суммарных затрат мощности носит линейный характер.

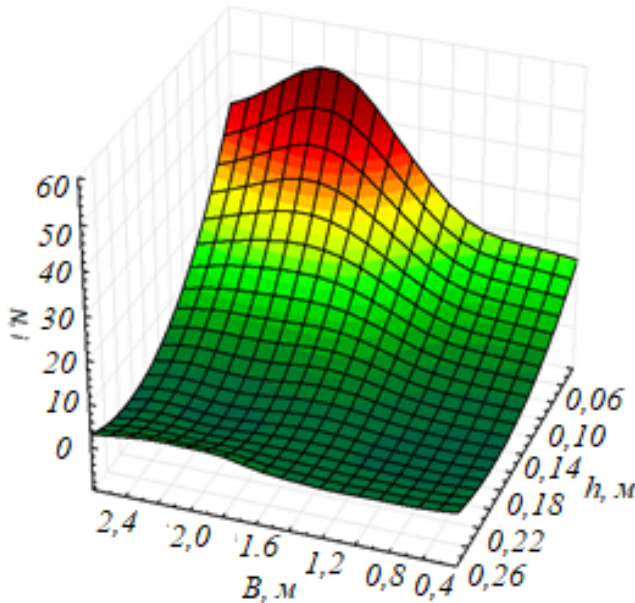


Рисунок 15 - Изменение толщины снежного вала при работе РСО с шириной захвата питателя, $B_{\phi}=0,6$ м, и диаметром фрезы $d_{\phi} = 0,5$ м, при ширине разброса $B_p=1,5$ м, начальной толщине снежного покрова, $h= 0,1$ м

На каждый дополнительный заход фрезы приходится около 90 Вт. При увеличении угла захода, дополнительные затраты мощности с увеличением числа заходов уменьшаются, так при $\theta = 20^{\circ}$ они составляют 20 Вт на каждый заход. Увеличение угловой скорости вращения до 10 рад/с приводит к увеличению мощности до 300 Вт. Увеличение характерного размера частиц транспортируемой снежной массы приводит к росту производительности.

Для характерного размера частиц, транспортируемой снежной массы, $g_{ch} = 0,03$ м, число заходов, n_3 , обеспечивающих максимум энергоэффективности, составляет от 3 до 5.

Среднее значение высоты максимального подъема транспортируемой снежной массы наблюдается при характерных размерах снежных частиц в диапазоне от 0,012 до 0,02 м. При характерных размерах транспортируемых снежных частиц, $r_{ch} < 0,02$ м, максимум удельной энергоэффективности получен при значениях угла захода ленты фрезы от $\theta = 35$ до 50° и при значениях угловой скорости вращения, ω_{ϕ} , фрезы питателя в диапазоне от 8 до 10 рад/с. Увеличение размера транспортируемых частиц $r_{ch} \geq 0,02$ м приводит к необходимости уменьшения угловой скорости вращения фрезы до 8 рад/с.

В четвертой главе представлено описание проведенного комплекса экспериментальных исследований. В ходе которых решались следующие задачи:

- оценка правомерности принятых при составлении математической модели, как сложной динамической системы, допущений;
- уточнение основных характеристик фрезы РСО, входящих в математическую модель сложной динамической системы;
- экспериментальная оценка характера формирования снежного вала при работе РСО;
- подтверждение адекватности математической модели.

Схема экспериментальной установки оценки влияния аэродинамических сил на работу питателя РСО показана на рисунке 16.

Экспериментально установлен характер формирования воздушных потоков в питателе РСО, на основе которого были уточнены характеристики воздушного потока, формируемые фрезой питателя РСО с конструктивными

и технологическими параметрами, входящими в математическую модель, характерными для РСО малой мощности. А так же исследование влияния профиля внутренней стенки питателя на эти характеристики.

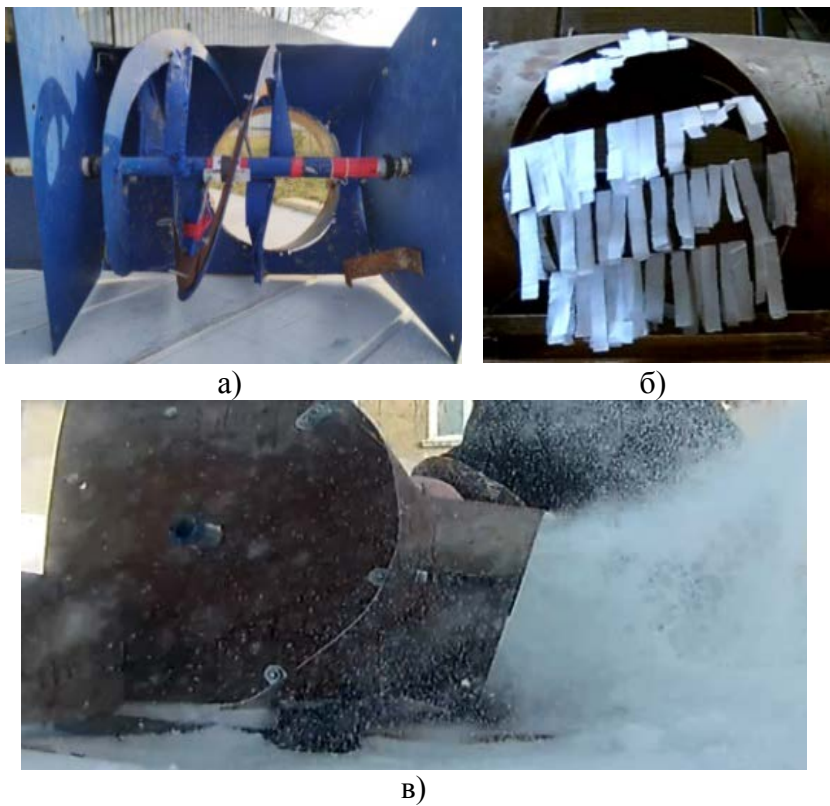


Рисунок 16 – Общий вид стенда по измерению величины вектора скорости воздушного потока в загрузочном окне питателя РСО:
 а) вид спереди;
 б) визуализация воздушных потоков в загрузочном окне питателя при проведении экспериментальных исследований;
 в) снежный поток в свободном пространстве в области загрузочного окна в процессе работы питателя

Величины нормальных к плоскости загрузочного окна проекции вектора скорости воздушного потока, v_{ex} , в различных точках загрузочного окна для существующих конструкций задней стенки питателя и с измененным профилем представлены на рисунке 17.

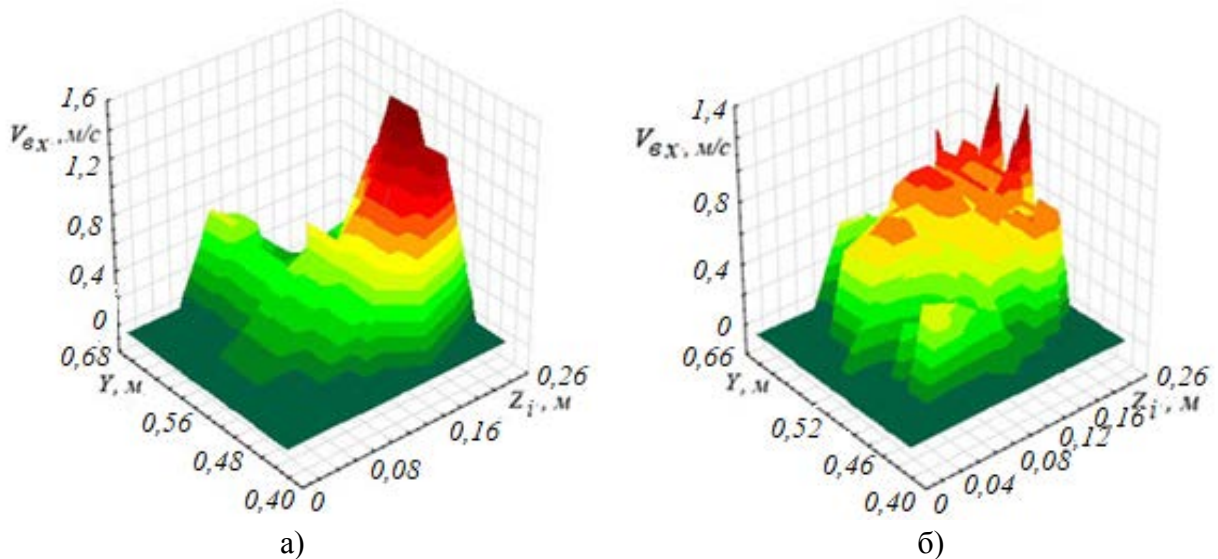


Рисунок 17 – Величины нормальных к плоскости загрузочного окна проекции вектора скорости воздушного потока, v_{ex} , в различных точках загрузочного окна, где:
 а) для питателя, изображенного на рисунке 16,а;
 б) для питателя с внутренней стенкой, имеющей форму части цилиндра (рисунок 19,б)
 В результате математического моделирования на ЭВМ движения

воздушных потоков в питателе с задней стенкой характерной для существующих конструкций РСО малой мощности и с измененным профилем, были получены значения нормальных к плоскости загрузочного окна проекции вектора скорости воздушного потока, v_{ex} . На рисунке 18, представлены расчетные значения нормальных к плоскости загрузочного окна проекции вектора скорости воздушного потока, v_{ex} .

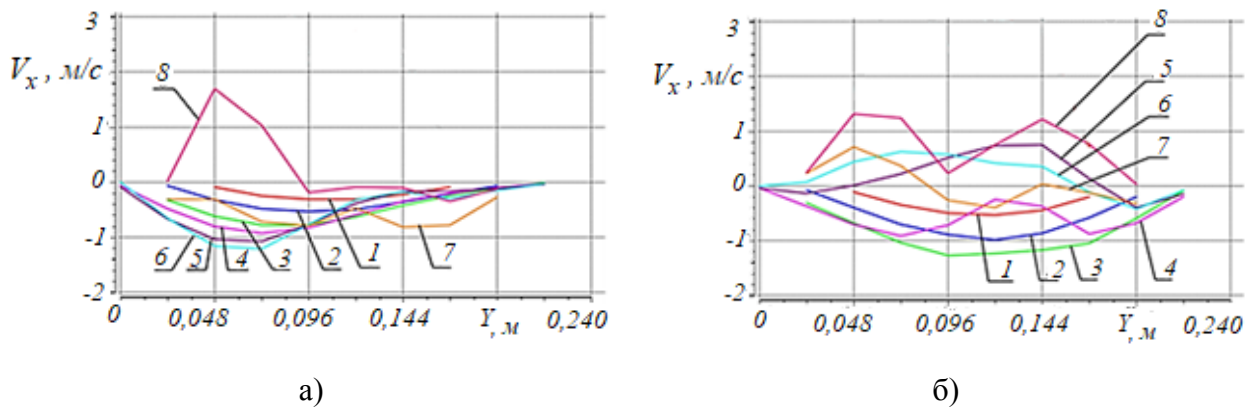
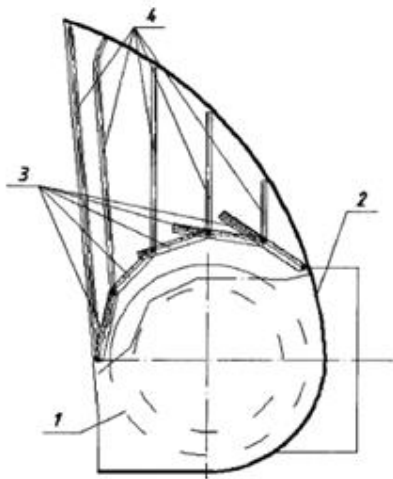


Рисунок 18 - Величины нормальной проекции вектора скорости воздушного потока в плоскости загрузочного окна питателя, где а) при угловой скорости вращения фрезы 9 рад/спо результатам вычислений, где: 1 - 0,05 м; 2 - 0,07 м; 3 - 0,10 м; 4 - 0,12 м; 5 - 0,16 м; 6 - 0,18 м; 7 - 0,20 м; 8 - 0,22 м.; б) при угловой скорости вращения фрезы 30 рад/спо результатам вычислений, где: 1 - 0,05 м; 2 - 0,07 м; 3 - 0,10 м; 4 - 0,12 м; 5 - 0,16 м; 6 - 0,18 м; 7 - 0,20 м; 8 - 0,22 м.

Анализ результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований показал, что расхождение результатов не превышает 11%, так для точек с координатами $y_1=0,209$ м, $z_1=0,132$ м и $y_2=0,115$ м, $z_2=0,132$ м расчетные значения проекции вектора скорости составили 0,4167, 0,5386 м/с, а измеренные 0,47, 0,54 м/с, соответственно, что позволяет сделать вывод об адекватности математической модели сложной динамической системы. Экспериментально установлена граница угловой скорости вращения рабочего органа, $\omega_{\phi} = 20$ рад/с, при которой уже необходимо учитывать действие аэродинамических сил. Увеличение угловой скорости вращения фрезы приводит к уменьшению площади сечения загрузочного окна, в которой наблюдаются обратные течения воздушного потока в питатель РСО.

На основании экспериментально установленного факта, наличия обратных течений воздушного потока и наличия потерь снежной массы при работе фрезы было предложено конструктивное изменение стенки питателя РСО (рисунок 19), обеспечивающее выравнивание по скорости и увеличению средней скорости потока в области загрузочного окна.

Решение задачи по получению закономерности образования снежных валов, образующихся в результате работы РСО позволит выработать наиболее эффективные способы минимизации негативного влияния снежных валов на транспортную инфраструктуру, промышленные зоны и селитебную территорию. Это обусловило проведение второго этапа экспериментальных исследований, основной целью которого является определение основных характеристик образующихся валов при работе РСО.



а)



б)

Рисунок 19 - Внутренняя стенка питателя, выполненная из шарнирно сочлененных подвижных сегментов: а) принципиальная схема, где 1 - фреза питателя, 2 - неподвижный отвал с боковыми стенками, 3 - подвижные шарнирно-сочлененные сегменты внутренней стенки питателя; 4 - направляющие в боковых стенках отвала, по которым перемещаются торцы сегментов внутренней стенки; б) общий вид питателя с изменяемой внутренней стенкой

Для решения данной задачи была создана экспериментальная установка для исследования процесса формирования снежных валов при работе РСО. Общий вид и основные геометрические размеры ротора МА показаны на рисунках 20 и 21.

Обработка результатов исследований (рисунок 22) была проведена с использованием разработанной программы обработки изображений, фрагмент рабочего окна которой представлен на рисунке 23.

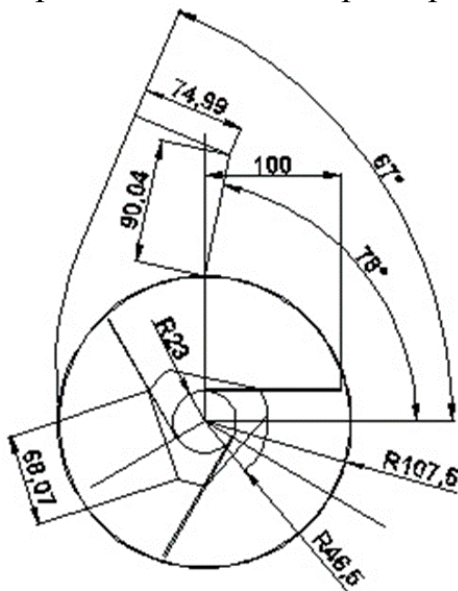


Рисунок 20 – Геометрические параметры ротора МА и его общий вид (размеры указаны в мм)

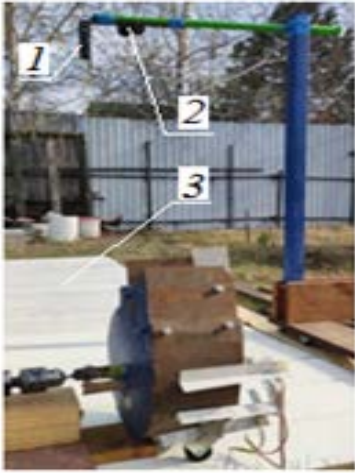


Рисунок 21 – Общий вид установки по проведению экспериментальных исследований образования снежных валов при работе МА РС0: 1- лазерный дальномер; 2- видеочамера; 3- сборное основание



Рисунок 22– Фрагмент экспериментальных исследований работы ротора МА и распределения отброшенной массы:
а) МА в процессе работы;
б) фрагмент формирования снежного вала

В результате проведенных экспериментальных исследований был установлен характер распределения количества частиц, а так же распределение суммарных масс отбрасываемого материала по ширине пятна разброса. Наиболее предпочтительным вариантом описания плотности распределения количества частиц по ширине снежного вала, N_{ni} , явилась функция гамма-распределения (рисунок 24).

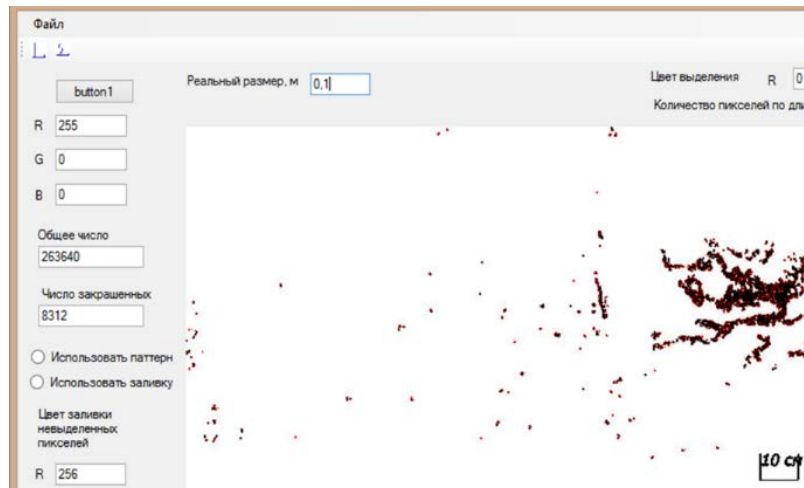


Рисунок 23 – Фрагмент рабочего окна программы по количественной обработке пятна разброса

Распределение суммарных масс по участкам сбора, M_i , так же удовлетворительно, описывается гамма-распределением (рисунок 25).

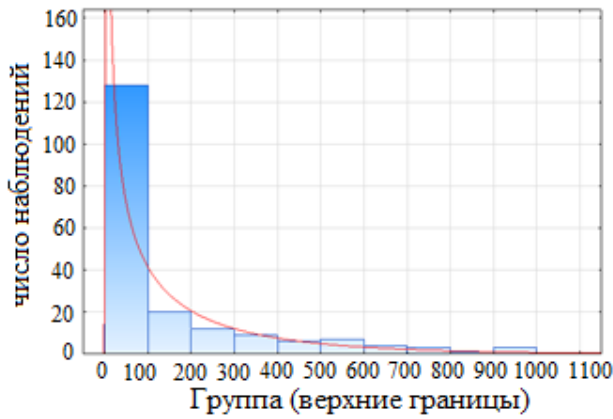


Рисунок 24 – Гистограмма распределения количества частиц на отдельных участках основания, N_{ni}

В ходе проведенных исследований получена зависимость количества частиц, N_{ni} , от расстояния, L_i :

$$N_{ni} = \frac{e^{-L_i/0,25}}{0,0033 \cdot 0,25^{2,52}} L_i^{-0,75}. \quad (22)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,883$.

Экспериментальная зависимость суммарных масс, M_i , от расстояния, L_i , описана следующим выражением:

$$M_i = \frac{e^{-L_i/0,69}}{0,078 \cdot 0,69^{1,52}} L_i^{-0,31}. \quad (23)$$

Значение коэффициента детерминации составило $R^2 = 0,747$.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили правомерность допущений, принятых при составлении математической модели сложной динамической системы. Максимальное расхождение измеренных и расчетных значений составляет 11%. Экспериментально установлено, что при значениях угловой скорости вращения фрезы питателя менее 20 рад/с можно не учитывать влияние воздушного потока в области загрузочного окна. По результатам экспериментальных исследований были получены эмпирические зависимости, дополняющие математическое описание процесса проведения снегоочистных работ РСО. Наиболее предпочтительным вариантом описания процесса формирования снежных валов является гамма-распределение.

В пятой главе представлено описание перспективной конструкции рабочего органа РСО. Анализ результатов проведенных теоретических исследований показал, что наименьшие затраты мощности наблюдаются при внедрении фрезы в снежный массив при углах захода, $\theta < 20^\circ$. В связи с этим была выдвинута гипотеза о том, что наиболее эффективны при разработке снежной массы больших значений плотности и модуля Юнга, являются дисковые фрезы, получающиеся при углах захода, $\theta \approx 0^\circ$. При увеличении угла захода, возрастает энергоэффективность процесса транспортирования

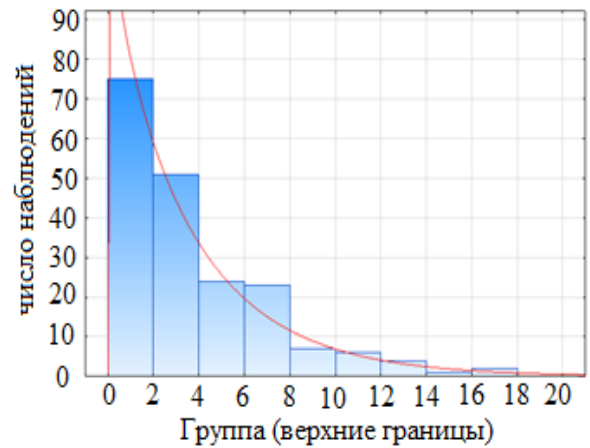


Рисунок 25 – Гистограмма распределения суммарных масс частиц на отдельных участках основания, M_i

снежной массы, возрастает. Таким образом, целесообразно использовать фрезы с углами захода близкими к 90^0 . Аналитические исследования экстремального поведения основных соотношений, описывающих конструктивный образ питателя РСО, при углах захода ленты фрезы близких к 0 и 90^0 , дали представление о возможном виде рабочих элементов. Окончательное конструктивное решение перспективного РСО было сформулировано, при условии обеспечения поперечного движения вырезанной снежной массы. Общий вид конструкции рабочего органа перспективного энергоэффективного РСО представлен на рисунке 26.

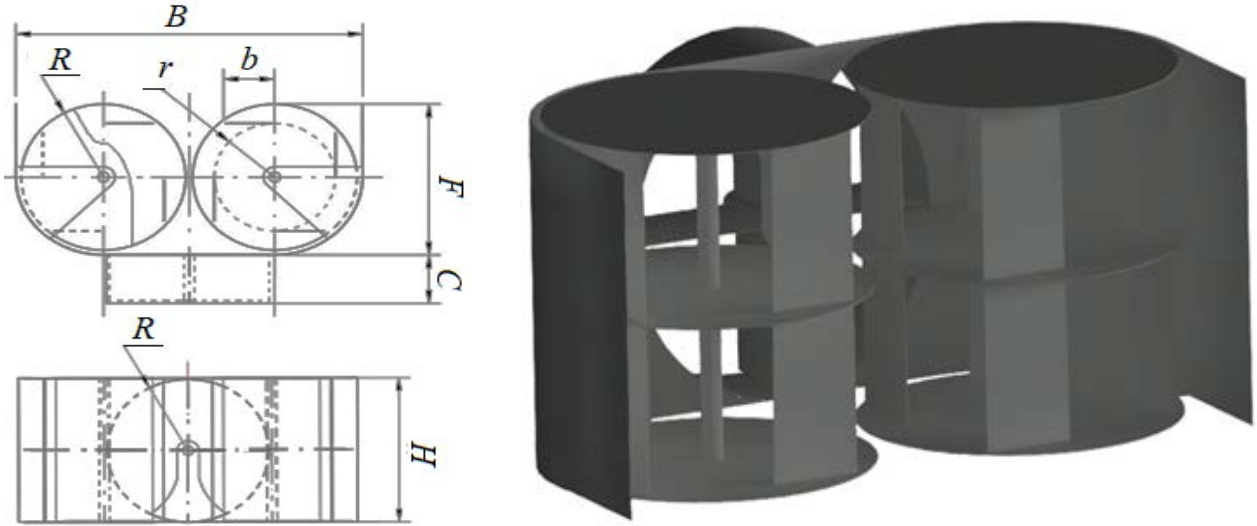


Рисунок 26 – Вид сверху, вид спереди и общий вид перспективной энергоэффективной конструкции рабочего органа РСО

Одним из достоинств описанной конструкции является то, что в нее может быть заложен принцип модульности. Данный принцип заключается в том, что высоту и ширину убираемого снежного массива можно регулировать за счет дополнительной установки/демонтажа вертикального фрезерного оборудования.

Расчетная схема конструкции рабочего органа перспективного РСО, представлена на рисунке 27. При математическом описании перспективного рабочего органа были приняты допущения и характер действующих сил аналогичные фрезе с вертикальной осью вращения.

Уравнения работы перспективного рабочего органа РСО действия имеют вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{\phi i} &= -\omega_{\phi}^2 x_{\phi i} - 2\omega_{\phi} \cdot \dot{y}_{\phi i} + \frac{N_{\phi i}}{m_{\phi i}} \left(\frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} + f_{\phi} \frac{A_1}{\sqrt{A_2^2 + A_1^2}} \right) + \frac{N_{\phi i}}{m_i} f_{\phi} \frac{\dot{x}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2}} + \frac{F_{ij}^x}{m_i}; \\ \ddot{y}_{\phi i} &= \omega_{\phi}^2 y_{\phi i} + 2\omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} + \frac{N_{\phi i}}{m_{\phi i}} \left(\frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} + f_{\phi} \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \right) + \frac{N_{\phi i}}{m_i} f_{\phi} \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2}} + \frac{F_{ij}^y}{m_i}; \\ \ddot{z}_{\phi i} &= \frac{N_{\phi i}}{m_i} + \frac{F_{ij}^z}{m_i} - \frac{G_i}{m_i}, \end{aligned} \quad (24)$$

где

$$A_1 = R_\phi \cos(\omega_\phi t + \xi_0) - r_\phi \cos(\omega_\phi t), \quad A_2 = R_\phi \sin(\omega_\phi t + \xi_0) - r_\phi \sin(\omega_\phi t).$$

Уравнение нормальной реакции вертикальной режущей полосы перспективного рабочего органа:

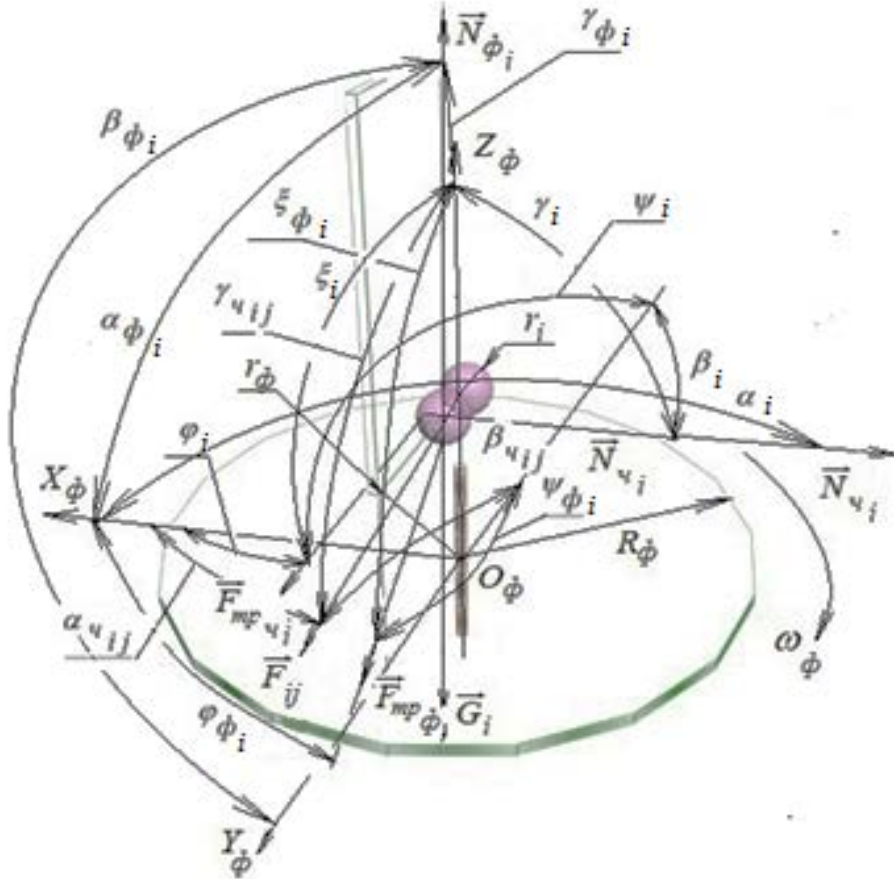


Рисунок 27– Пространственная расчетная схема взаимодействия снежной частицы с перспективным рабочим органом

$$\begin{aligned} \frac{N_{\phi i}}{m_i} = & \frac{\omega_\phi^2}{C} \left(\frac{A_1}{A_2} y_{\phi i} + x_{\phi i} \right) + 2 \frac{\omega_\phi}{C} \cdot \left(\frac{A_1}{A_2} \dot{x}_{\phi i} + \dot{y}_{\phi i} \right) + g \cdot \frac{f_\phi}{C} \left(D_2 \frac{A_1}{A_2} - D_1 \right) - \\ & - \frac{F_{ij}^z}{m_i} \frac{f_\phi}{C} \left(D_2 \frac{A_1}{A_2} - D_1 \right) + \frac{F_{ij}^y}{m_i} \frac{A_1}{C \cdot A_2} - \frac{F_{ij}^x}{m_{\phi i}} \frac{1}{C} - \left[\frac{\dot{x}_{\phi i}}{A_1} - \frac{\dot{y}_{\phi i}}{A_2} + \omega_\phi x_{\phi i} \frac{A_2}{A_1^2} + \omega_\phi y_{\phi i} \frac{A_1}{A_2^2} + r_\phi \omega_\phi M_1 \right]^2 \times \\ & \times \frac{A_1}{\frac{x_{\phi i}}{A_1} - \frac{y_{\phi i}}{A_2} + r_\phi M_2} \frac{1}{C} - \omega_\phi^2 r_{\phi i} \frac{M_4}{C} \frac{A_1}{\frac{x_{\phi i}}{A_1} - \frac{y_{\phi i}}{A_2} + r_\phi M_2} - \left[\frac{2\omega_\phi \dot{x}_{\phi i} A_2}{A_1^2} + \frac{2\omega_\phi \dot{y}_{\phi i} A_1}{A_2^2} + \right. \\ & \left. + \omega_\phi^2 x_{\phi i} M_5 + \omega_\phi^2 y_{\phi i} M_6 + r_\phi \omega_\phi^2 M_3 \right] \frac{A_1}{C} \end{aligned} \quad (25)$$

где

$$M_1 = \frac{A_2 \cos(\omega_\phi t)}{A_1^2} - \frac{A_1 \sin(\omega_\phi t)}{A_2^2} + \frac{\cos(\omega_\phi t)}{A_2} + \frac{\sin(\omega_\phi t)}{A_1}, \quad M_2 = \frac{\sin(\omega_\phi t)}{A_2} - \frac{\cos(\omega_\phi t)}{A_1},$$

$$M_3 = \frac{\cos(\omega_\phi t)A_1^2 - A_2 \sin(\omega_\phi t)A_1 + 2A_2^2 \cos(\omega_\phi t)}{A_1^3} - \frac{-A_2^2 \sin(\omega_\phi t) + A_1 \cos(\omega_\phi t)A_2 - 2A_1^2 \sin(\omega_\phi t)}{A_2^3},$$

$$- \frac{\sin(\omega_\phi t)A_2 + A_1 \cos(\omega_\phi t)}{A_2^2} + \frac{\cos(\omega_\phi t)A_1 + A_2 \sin(\omega_\phi t)}{A_1^2}$$

$$M_4 = \frac{A_1^2 + 3A_2^2}{A_1^4} - \frac{A_2^2 + 3A_1^2}{A_2^4}, \quad M_5 = \frac{A_1^2 + 2A_2^2}{A_1^3}, \quad M_6 = \frac{A_2^2 + 2A_1^2}{A_2^3},$$

Уравнение силы нормальной реакции горизонтального режущего диска определяется из выражения:

$$\frac{N_{qi}}{m_i} = g - \frac{F_{ij}^z}{m_i}. \quad (26)$$

Для подтверждения работоспособности и оценки эффективности предложенной конструкции был изготовлен прототип рассматриваемой перспективной конструкции рабочего органа РСО (рисунок 28). Основные геометрические размеры перспективной конструкции рабочего органа: радиус вертикальной фрезы, $R_\phi = 0,1$ м; высота вертикальной фрезы, $H = 0,21$ м; ширина режущей полосы, $h = 0,05$ м; внутренний радиус установки режущей полосы, $r_\phi = 0,06$ м; ширина захвата рабочего органа, $B_\phi = 0,23$ м; радиус загрузочного окна, $R_3 = 0,085$ м.

В результате проведения натурных испытаний предлагаемой конструкции, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 23080-78 «Снегоочистители роторные. Правила приемки и методы испытаний», были получены изменения потребляемой мощности рабочим органом во времени и произведена оценка его производительности.



Рисунок 28 – Прототип перспективного рабочего органа РСО:
а) общий вид; б) вид сверху в процессе работы

Сравнительные результаты изменения удельной энергоемкости перспективного рабочего органа и рабочего органа с горизонтальным расположением фрезы в зависимости от угловой скорости ω_ϕ к $V_{пер}$, представлены на рисунке 29.

Экспериментальные исследования показали, что при ω_ϕ в диапазоне от 20...40 рад/с и $V_{пер} > 0,1...0,3$ м/с относительный рост удельной энергоемкости горизонтально расположенного питателя по сравнению с вертикально расположенным питателем изменяется 18% до 40%. При меньших значениях наблюдается рост удельной энергоемкости уже вертикального питателя по сравнению с горизонтальным. При значениях отношения $\omega_\phi / V_{пер} > 350$ рад/м наиболее эффективным является вертикально расположенный питатель.

Таким образом, экспериментальные исследования показали возможность использования перспективной конструкции рабочего органа РСО, а так же определили условия его максимальной эффективности.

Одним из принципиальных отличий предлагаемой конструкции является работа вертикальной фрезы с большей угловой скоростью по сравнению с существующими конструкциями. Поэтому при заданной угловой скорости вращения минимальная поступательная скорость такого РСО возрастает.

Сравнительная оценка исследуемой конструкции с существующими конструкциями фрез питателей РСО показала трехкратное уменьшение металлоемкости. По результатам экономических расчетов стоимость самоходного РСО малой мощности эквивалентна стоимости существующих фрезерно-роторных снегоочистителей, однако за счет повышения производительности перспективная конструкция РСО обеспечивает экономический эффект до 21%.

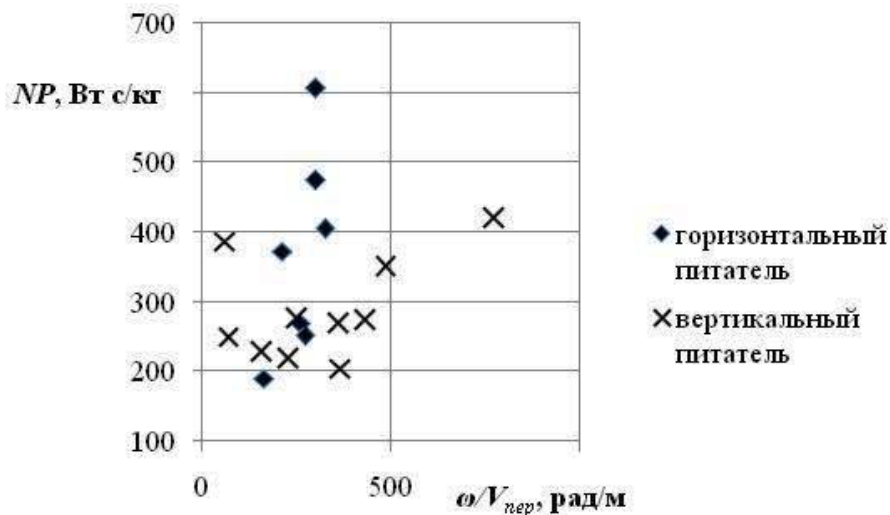


Рисунок 29 – Удельная энергоэффективность, NP , перспективного рабочего органа и фрезы с горизонтальным расположением питателя РСО в зависимости от отношения $\omega_\phi / V_{пер}$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Совокупность новых научно обоснованных технических решений, разработанных в ходе диссертационного исследования, представляющих собой дальнейшее развитие теории моделирования, практики проектирования, анализа рабочего процесса РСО, вносит вклад в решение актуальной научно-технической проблемы интенсификации проведения снегоочистных работ. По работе были сделаны следующие выводы:

1. На основе сформулированной концепции РСО как результата объединения элементов, образующих множества питателей, МА и базовых машин, в котором определены отношения эквивалентности и порядка на основе параметрической систематизации и представления результата в виде упорядоченного графа, с таких методологических позиций были разработаны обобщенные кинематические соотношения для: одноступенчатых, двухступенчатых и трехступенчатых РСО.

2. Разработана совокупность математических моделей, описывающих процесс проведения работ по очистке от снега РСО, представляющих собой сложную динамическую систему, включающую в себя подсистемы: снежный массив, фреза питателя РСО, фрезерный питатель, МА, которые позволяют более чем на 20% повысить точность вычислений основных параметров работы рабочего оборудования РСО. Так расхождение по скоростям снежных частиц, отбрасываемых фрезой питателя в области загрузочного окна для снежных частиц с характерным радиусом более 0,01 м при угловых скоростях вращения фрезы $\omega_{\phi} > 12$ рад/с, составило 6%, для снежных частиц с характерным радиусом менее 0,01 м при угловых скоростях вращения фрезы $\omega_{\phi} > 12$ рад/с, составило 22%. Установлены зависимости энергоэффективности работы основных подсистем РСО от их конструктивных и технологических параметров. Получена оптимальная конфигурация лопасти ротора МА РСО, обеспечивающая максимум скорости снежной частицы при сходе ее с лопасти, описываемой выражением:

$$\eta = -89,98 - 0,1844 \cdot \cos(0,017 \cdot \varphi_p) - 0,0844 \cdot \sin(0,017 \cdot \varphi_p).$$

На основании проведенных экспериментальных исследований была предложена оригинальная конструкция внутренней стенки питателя с изменяемой геометрией, которая защищена патентом Российской Федерации на полезную модель.

3. Определены численные значения параметров, входящих в математические модели; подтверждена адекватность математических моделей; подтверждена работоспособность и эффективность предложенных инженерных решений. Теоретически обоснованы диапазоны поступательных скоростей фрезерно-роторного снегоочистителя в зависимости от радиуса фрезы, так для радиусов менее 0,15 м поступательная скорость не должна превышать 0,3 м/с; для радиусов от 0,15 до 0,25 м – 1 м/с и радиусов более 0,25 м – 3...5 м/с. Для фрезерно-роторных снегоочистителей малой и средней мощности, увеличение числа заходов сопровождается увеличением потребляемой мощности. На каждый дополнительный заход фрезы, при

$\theta=10^0$, приходится около 90 Вт. При увеличении угла захода, дополнительные затраты мощности с увеличением числа заходов уменьшаются, так при $\theta=20^0$ они составляют 20 Вт на каждый заход. Увеличение размера транспортируемых частиц $r_i \geq 0,02$ м приводит к необходимости уменьшения угловой скорости вращения фрезы до 8 рад/с. Установлено, что влияние аэродинамических сил необходимо учитывать, при угловых скоростях вращения фрезы питателя РСО, расположенной горизонтально более 20 рад/с.

Установлен характер распределения частиц по ширине снежного вала носит следующий характер, на основе которого были получены уравнения регрессии, описывающие характер изменения снежной массы по ширине снежного вала, а также зависимость изменения толщины снежного вала в зависимости от ширины очищаемой территории, B_0 , при различной ширине захвата питателя РСО, B_ϕ .

4. Изложены научно-обоснованные технические решения создания конструкций рабочих органов РСО, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение энергоэффективности процесса очистки от снега на 12-18%. Экспериментально подтверждена адекватность математической модели питателя с вертикальным расположением фрезы, расхождение теоретических и экспериментальных значений составила не более 12%. Предложена перспективная энергоэффективная конструкция рабочего органа РСО с вертикальной осью вращения, позволяющая обеспечить до 40% более энергоэффективной процесс проведения снегоочистных работ на повышенных скоростях поступательного движения РСО, чем аналогичные по геометрическим характеристикам фрезы с горизонтальным расположением. Ожидаемый экономический эффект до 21%. Разработана и внедрена в производство методика проектирования рабочего оборудования РСО.

5. Направлением дальнейших исследований являются экспериментальные исследования захвата снежной массы рабочим оборудованием РСО, позволяющей уточнить модель контактного взаимодействия, теоретические исследования энергоэффективности использования поверхностей рабочего оборудования РСО с переменными характеристиками, а так же исследование возможностей создания конструкций РСО регулирование ширины и высоты захвата, которых обеспечивается за счет установки или демонтажа типовых элементов рабочего оборудования.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ для докторских диссертаций

1. Обоснование выбора конструкции питателя роторного снегоочистителя, исходя из условий эксплуатации / Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина, Е. В. Хирьянов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2023. – Т. 23, № 2. – С. 39-48. – DOI 10.14529/engin230204.

2. Оценка возможностей рабочих органов роторных снегоочистителей на основе их конструктивных и технологических параметров / Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина, Е. В. Хирьянов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20, № 3(91). – С. 304-315. – DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-3-304-315.

3. Алешков, Д. С. Исследование математической модели работы ротора роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 8. – С. 18-22.

4. Алешков, Д. С. Математическая модель процесса транспортирования снежной массы в роторе снегоочистителя / Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19. – № 5(87). – С. 610-623. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-5-610-623.

5. Алешков, Д. С. Исследование работы физических моделей вертикального и горизонтального питателей снегоочистителя / Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 16. – С. 56-61. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-56-61.

6. Алешков, Д. С. Теоретические исследования движения снежной частицы в вертикальном питателе роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2022. – № 4. – С. 263-274.

7. Алешков, Д. С. Математическая модель работы вертикальной фрезы при транспортировании снежной массы / Д. С. Алешков, М. В. Суковин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19. – № 1(83). – С. 24-35. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-24-35.

8. Алешков, Д. С. Геометрические и кинематические характеристики питателя и метательного аппарата фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2018. – Т. 15. – № 5(63). – С. 638-648.

9. Алешков, Д. С. Обоснование ширины ленты фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2017. – № 2(54). – С. 7-11.

10. Алешков, Д. С. Экспериментальные исследования физической модели питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 5(51). – С. 49-54.

11. Алешков, Д. С. Влияние основных параметров фрезерно-роторного снегоочистителя на вырезаемый объем снежной стружки / Д. С. Алешков, Н. Ю. Урусова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2013. – № 5(33). – С. 10-14.

12. Алешков, Д. С. Влияние кинематических характеристик питателя и базовой машины фрезерно-роторного снегоочистителя на процесс отделения стружки / Д. С. Алешков, Н. Ю. Урусова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2012. – № 5(27). – С. 7-10.

В изданиях, включенных в базы цитирования Web of Science и Scopus

1. Experimental investigations of snow bank formation during milling and rotary snow blower operation / D. S. Aleshkov, M. V. Sukovin, M. V. Banket [et al.] // Journal of Applied

Engineering Science. – 2021. – Vol. 19. – No 1. – P. 9-16. – DOI 10.5937/jaes0-28018.

2. Teterina, I. A. Investigation into effects of the utility machine performance characteristics on the vibration at the operator's workplace / I. A. Teterina, P. A. Korchagin, D. S. Aleshkov // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics 2018) : 12th International Scientific and Technical Conference, Omsk, 13–15 ноября 2018 года. – Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2019. – P. 8601434.

3. Aleshkov, D. S. Aerodynamic characteristics of the milling and rotary snowblower feeder in the loading gate area / D. S. Aleshkov, M. V. Sukovin // International Review of Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 11. – No 9. – P. 701-708. – DOI 10.15866/ireme.v11i9.13832.

Патенты

1. Патент на полезную модель № 215725 U1 Российская Федерация, МПК E01H 5/09. Снегоочиститель отбрасывающего действия с вертикальным ротором : № 2022116926 : заявл. 23.06.2022 : опубл. 23.12.2022 / Д. С. Алешков, М. В. Суковин, М. Е. Агапов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681022 Российская Федерация. Расчет снежного вала при работе роторного снегоочистителя : № 2022680210 : заявл. 01.11.2022 : опубл. 09.11.2022 / Д. С. Алешков, М. В. Суковин, Б. С. Трофимов, И. А. Тетерина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет".

3. Патент на полезную модель № 177929 U1 Российская Федерация, МПК E01H 5/09. Питатель фрезерно-роторного снегоочистителя : № 2017125543 : заявл. 17.07.2017 : опубл. 16.03.2018 / В. С. Щербаков, Д. С. Алешков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)".

4. Патент на полезную модель № 151371 U1 Российская Федерация, МПК E01H 5/09. Фреза питателя фрезерно-роторного снегоочистителя : № 2014137230/13 : заявл. 15.09.2014 : опубл. 10.04.2015 / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)".

Публикации в других изданиях

1. Алешков, Д. С. Экспериментальные исследования горизонтального и вертикального питателей роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина // Интерстроймех-2022 : Материалы XXVI Международной научно-технической конференции, Ярославль, 12–14 октября 2022 года. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2022. – С. 83-94.

2. Алешков, Д. С. Теоретические закономерности влияния числа заходов и угла захода ленты фрезы на конструкцию питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Омск, 25–26 ноября 2021 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. – С. 4-7.

3. Алешков, Д. С. Экспериментальные исследования работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя с переменной шириной ленты фрезы / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, Омск, 28–29 ноября 2019 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. – С. 4-8.

4. Алешков, Д. С. Нелинейная множественная регрессия показателей рабочего

процесса фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова // Техника и технологии строительства. – 2015. – № 3(3). – С. 4-8.

5. Алешков, Д. С. Тенденции развития снегоочистителей отбрасывающего действия / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова // Прогрессивные технологии и процессы : Сборник научных статей Международной молодежной научно-практической конференции: в 2-х томах, Курск, 25–26 сентября 2014 года. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 34-37.

6. Алешков, Д. С. Определение плотности снега / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки : Материалы международной научно-практической конференции, Омск, 15–16 декабря 2014 года. – Омск: ФГБОУ ВПО "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)", 2014. – С. 90-92.

7. Алешков, Д. С. Взаимосвязь угловой скорости вращения ротора метательного аппарата и угловой скорости вращения фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки : Материалы международной научно-практической конференции [Электронный ресурс], Омск, 15–16 декабря 2014 года. – Омск: ФГБОУ ВПО "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)", 2014. – С. 7-10.

8. Алешков, Д. С. К вопросу создания снегоочистителей отбрасывающего действия / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы : Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, Рубцовск, 18–19 декабря 2013 года / Рубцовский индустриальный институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»; Под редакцией Н. И. Черкасовой. – Рубцовск: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), 2013. – С. 145-147.

9. Урусова, Н. Ю. К вопросу движения снежной стружки под действием винтовой лопасти питателя в зоне резания / Н. Ю. Урусова, Д. С. Алешков // Научные труды молодых ученых, аспирантов и студентов : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки (с международным участием), Омск, 08 февраля 2012 года. – Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), 2012. – С. 273-276.

10. Алешков, Д. С. Синтез продольной образующей стенки направляющего насадка фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков // Проблемы автомобильных дорог России и Казахстана : Тезисы докладов международной научно-технической конференции, Омск, 15–19 октября 2001 года. – Омск: ФГБОУ ВПО "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)", 2001. – С. 86-88.