

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ (СИБАДИ)»**

На правах рукописи



Алешков Денис Сергеевич

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОТОРНЫХ
СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ**

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

**ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук**

**НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:
доктор технических наук,
профессор П.А. Корчагин**

Омск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОПИСАНИЕ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ	11
1.1. Обзор конструктивных схем роторных снегоочистителей.....	11
1.2. Параметрическая систематизация роторных снегоочистителей.....	17
Выводы.....	40
2. ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ.....	41
2.1. Математическая модель рабочего оборудования роторного снегоочистителя.....	41
2.1.1. Геометрические и кинематические соотношения.....	41
2.1.2. Математическая модель взаимодействия снежных частиц.....	51
2.1.3. Уравнения динамики транспортирования снежной массы в питателе роторного снегоочистителя.....	55
2.1.4. Начальные и граничные условия процесса транспортирования снежной массы.....	77
2.2. Вариационные принципы решения уравнений работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей.....	82
2.3. Математическая модель формирования снежных валов при работе роторных снегоочистителей.....	88
Выводы.....	98
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СНЕЖНОЙ МАССЫ	100
3.1. Показатели эффективности работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей.....	100
3.2. Теоретические исследования влияния количества транспортируемых	

частиц на показатели эффективности работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей.....	109
3.3. Теоретические исследования влияния характерного размера транспортируемых снежных частиц на показатели эффективности работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей.....	125
3.4. Теоретические исследования влияния угла захода ленты фрезы на показатели эффективности работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей.....	143
3.5. Теоретические исследования влияния угловой скорости вращения фрезы питателя на показатели эффективности рабочего оборудования роторных снегоочистителей.....	169
3.6. Влияние числа заходов ленты фрезы питателя на показатели эффективности работы роторных снегоочистителей.....	185
3.7. Теоретические исследования влияния конструктивных и технологических параметров роторного снегоочистителя на формирование снежных валов.....	196
Выводы.....	203
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ.....	206
4.1. Экспериментальные исследования аэродинамики рабочего органа роторного снегоочистителя в области загрузочного окна.....	207
4.2. Экспериментальные исследования формирования снежных валов при работе роторного снегоочистителя.....	224
Выводы.....	237
5. ПЕРСПЕКТИВНАЯ МОДЕЛЬ РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ	239
5.1. Конструктивный образ перспективной модели роторного снегоочистителя.....	239
5.2. Математическая модель перспективного роторного снегоочистителя..	244

5.3. Условия применения уравнений работы вертикального питателя роторного снегоочистителя.....	257
5.4. Оценка эффективности работы перспективной модели роторного снегоочистителя.....	284
Выводы.....	292
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	294
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	297
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	298
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	301
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	322

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. 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.

Интенсификация процесса проведения снегоочистных работ роторными снегоочистителями не возможна при формальном увеличении скоростей их взаимодействия со снежным массивом. Совершенствование конструкции ведется в двух направлениях: изменение формы и повышение структурной сложности. Существующие теоретические исследования включают в себя набор отдельных математических моделей, косвенно связанных между собой умозаключениями, построенными на результатах эмпирических исследований. Сами математические модели базируются на допущениях, которые не в полной мере отражают реальный характер взаимодействия рабочего органа и транспортируемой снежной массы. В методиках используются простые поверхности второго порядка, что в совокупности обеспечивает решение дифференциальных уравнений в явном виде. Так же практически не проработаны вопросы дальнейшего поведения отбрасываемой снежной массы, хотя знание этого позволяет решать ряд важных задач в смежных областях науки и техники.

При широко представленных результатах теоретико-прикладных исследований поведения снега, известные в научной литературе результаты исследований вопросов повышения эффективности работы роторных снегоочистителей носят локальный характер и направлены на решение конкретных задач, а методики и методы проектирования роторных снегоочистителей базируются на

полуэмпирических формулах, не учитывающих всего многообразия возможных состояний системы «роторный снегоочиститель – снежный массив». Основным недостатком которых является то, что на их основе не представляется возможным создание перспективных конструктивных схем роторных снегоочистителей, а также оценка их эффективности.

Необходимым условием повышения эффективности работы роторных снегоочистителей является использование новых научных знаний о характере взаимодействия элементов роторных снегоочистителей и поведении снега при этом взаимодействии, а так же развитие численных методов решения уравнений, описывающих работу роторных снегоочистителей, базирующихся на допущениях, делающих такие модели максимально подобными реальным условиям.

Отсутствие теоретико-методологических положений в теории проектирования роторных снегоочистителей требует постановки и решения важной научно-практической проблемы – разработки комплекса математических моделей, описывающих работу роторных снегоочистителей и инновационных методов выбора их основных параметров. Принимая во внимание все вышесказанное, тема развития теории проектирования роторных снегоочистителей, исследованная в настоящей работе, представляется актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическим и экспериментальным исследованиям по повышению эффективности работы роторных снегоочистителей посвящен ряд работ. Этими проблемами занимается целый ряд исследователей и исследовательских коллективов как у нас в стране, так и за рубежом.

Основы теории проектирования роторных снегоочистителей были заложены такими отечественными учеными, как Эвентов И.М., Шалман Д.А., Иванов А.Н., Мишин В.А., Баловнев В.И. и др.

Теоретические исследования и экспериментальные работы для маломощных шнекороторных снегоочистителей выполняются во ФГБОУ ВО ИжГТУ (Закиров М.Ф.).

Повышению эффективности плужной снегоочистительной техники посвящены исследования Мерданова Ш.М.

Исследованиями по совершенствованию рабочих органов для разрушения снежно-ледяных образований активно занимались и занимаются во ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (Желукевич Р.Б.), ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ) (Сладкова Л.А.), ФГБОУ ВО «СибАДИ» (Галдин Н.С.), среди зарубежных ученых следует отметить работы Deng, H., Wang, J. Моделям базисных процессов взаимодействия рабочих органов дорожно-строительных машин со средой посвящены работы А.М. Завьялова.

Исследованиями в области повышения эффективности использования роторных снегоочистителей при проведении очистных работ ведутся в ФГБОУ ВО «МАДИ» (Кустарев Г.В., Трофимова И.Ф.). Работы Martin Saska, Klaus Schilling, Campbell J.F., также посвящены данному вопросу.

Однако поведение снега и его влияние на характеристики работы роторного снегоочистителя практически никем не раскрыты.

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

Целью исследования является повышение энергоэффективности роторных снегоочистителей.

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

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

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 снегоочистных работ. Научная новизна получена за счет того, что:

- сформулирована концепция проектирования роторных снегоочистителей как результата объединения элементов, образующих множества питателей, метательных аппаратов 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 роторных снегоочистителей, 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 метательным аппаратом; решения вариационных задач на примере ротора метательного аппарата;

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

- получены и теоретически обобщены результаты натурных экспериментальных исследований работы подсистем роторного снегоочистителя, позволившие подтвердить адекватность разработанных моделей, а так же установить условия эффективного использования

полученных технических решений конструкции рабочего органа питателя роторного снегоочистителя.

Теоретическая значимость работы заключается в:

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

- установлены: зависимости поступательных скоростей роторного снегоочистителя 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 роторного снегоочистителя;

- впервые исследован механизм образования снежных валов в процессе проведения снегоочистных работ роторными снегоочистителями, 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 роторного снегоочистителя, обеспечивающие повышение его энергоэффективности, получена оптимальная конфигурация лопасти ротора метательного аппарата роторного снегоочистителя, обеспечивающая максимум скорости снежной частицы при сходе ее с лопасти;

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

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

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 роторных снегоочистителей различного конструктивного исполнения;

- разработан, теоретически обоснован и защищен патентами РФ ряд технических решений, направленных на совершенствование конструкций питателя роторного снегоочистителя, 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 роторного снегоочистителя.

1. ОПИСАНИЕ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ

1.1. Обзор конструктивных схем роторных снегоочистителей

Эффективное удаление снежного покрова с твердых покрытий включает в себя несколько проблем, к которым следует отнести вопросы оперативности очистки территорий и того, как это делать, т.к. при этом возникают скрытые расходы (осаждение, последующая весенняя очистка и утилизация) [159].

Сложившаяся видовая классификация роторных снегоочистителей (далее РСО) [111, 51] представляет собой:

- снегоочистители с отвалом;
- шнеко фрезерно-роторные снегоочистители;
- газоструйные снегоочистители.

Возможные конструктивные схемы РСО наиболее полно могут быть описаны в результате патентных исследований. На рисунке 1.1 представлен пример графа ссылок на патенты по данным Google Patents, ориентация графа обозначает последовательность упоминания в последующих патентах.

Рассмотрим вершины графа имеющие наибольший вес. Наибольший вес имеет патент US20120192464A1 «Высокоскоростной снегоочиститель для взлетно-посадочных полос», представляющий собой снегоочистительное оборудование на специальном шасси (рисунок 1.2). Данный патент ссылается на оригинальную конструкцию снегоочистителя, в которой рабочие элементы питателя расположены в продольном направлении, описанную в патенте US2882620A (рисунок 1.3). Патент US4158923A «Дорожный снегоочиститель» представлен на рисунке 1.4. Данная конструкция является совмещенной, роторы которой выполняют операции вырезания, транспортирования, разгона и отброса снежной массы. При этом оси их вращения расположены поперечно направлению движения снегоочистителя. Совмещение рабочих органов также представлено в патенте US3429061A, однако здесь совмещение операций реализовано в фрезе питателя снегоочистителя (рисунок 1.5). На рисунке 1.6 изображена конструкция

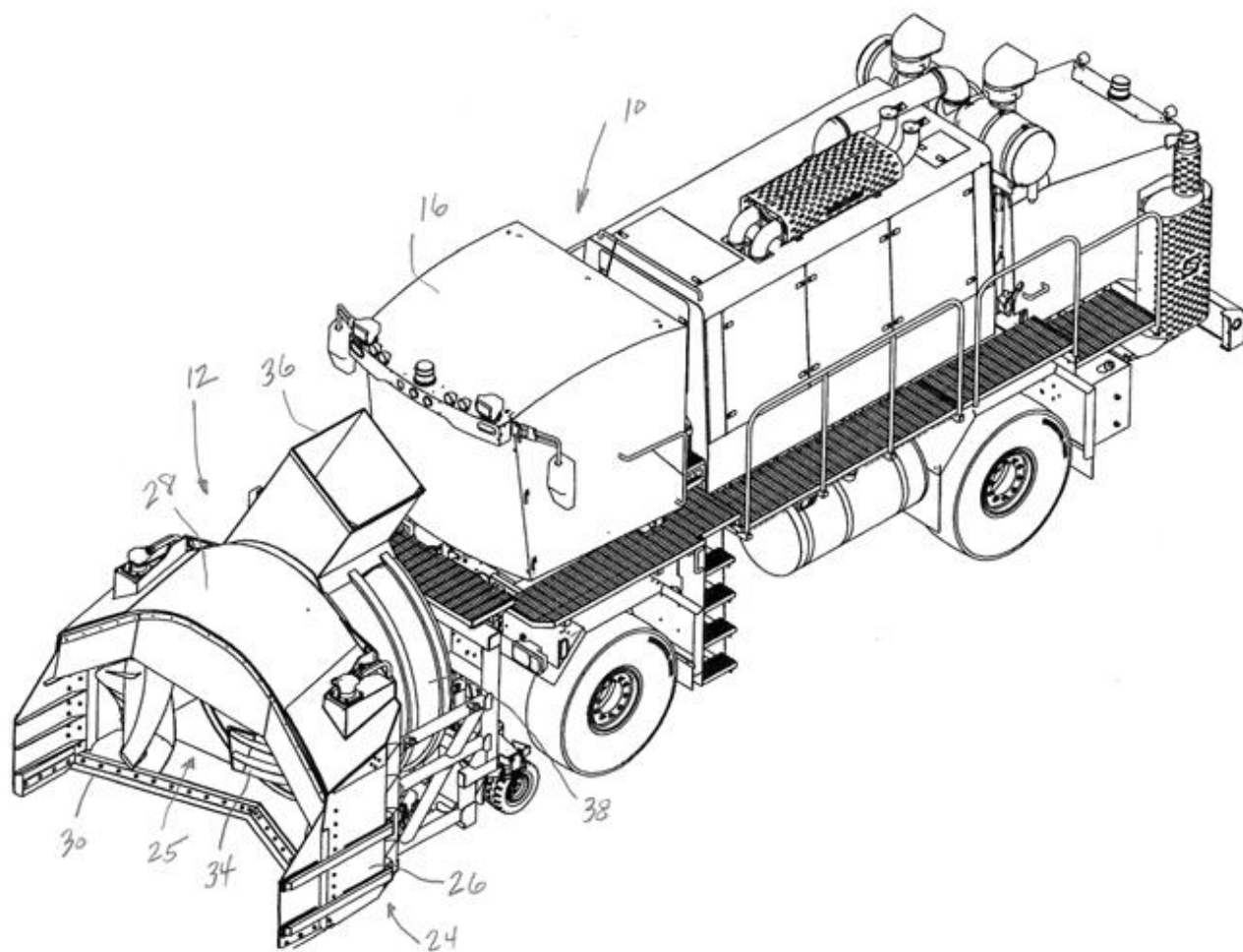


Рисунок 1.2 - Высокоскоростной снегоочиститель для взлетно-посадочных полос, где 10 – базовая машина; 12 – высокоскоростной метательный аппарат; 16 – кабина оператора; 30 – передняя кромка нагнетателя; 24 – корпус нагнетателя; 25 – внутренняя стенка нагнетателя; 26 – боковая стенка нагнетателя; 28 – изогнутый верхний кожух; 30 V-образная передняя кромка; 34 – вращающееся рабочее колесо (ротор метательного аппарата); 36 – направляющий насадок; 38 – обечайка ротора метательного аппарата.

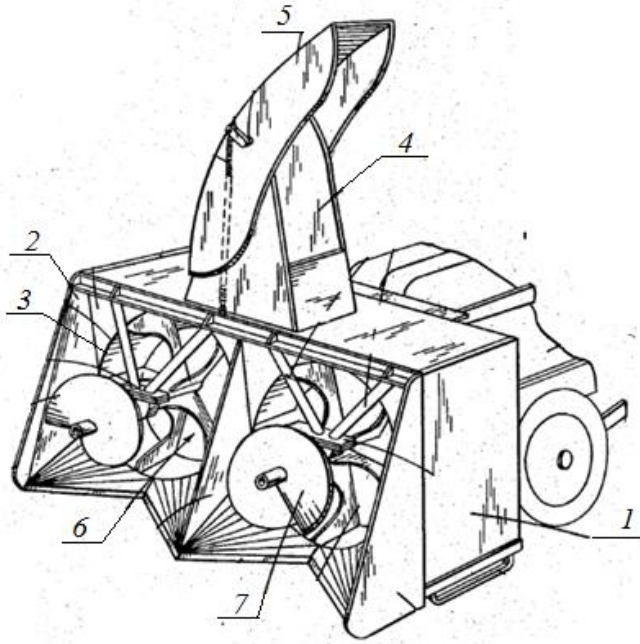


Рисунок 1.3 – Общий вид снегоочистителя, где 1 – корпус; 2 – съемная секция; 3 – круглая камера; 4 – направляющий желоб; 5 – поворотный кожух; 6 – ротор метательного аппарата; 7 –

шнек

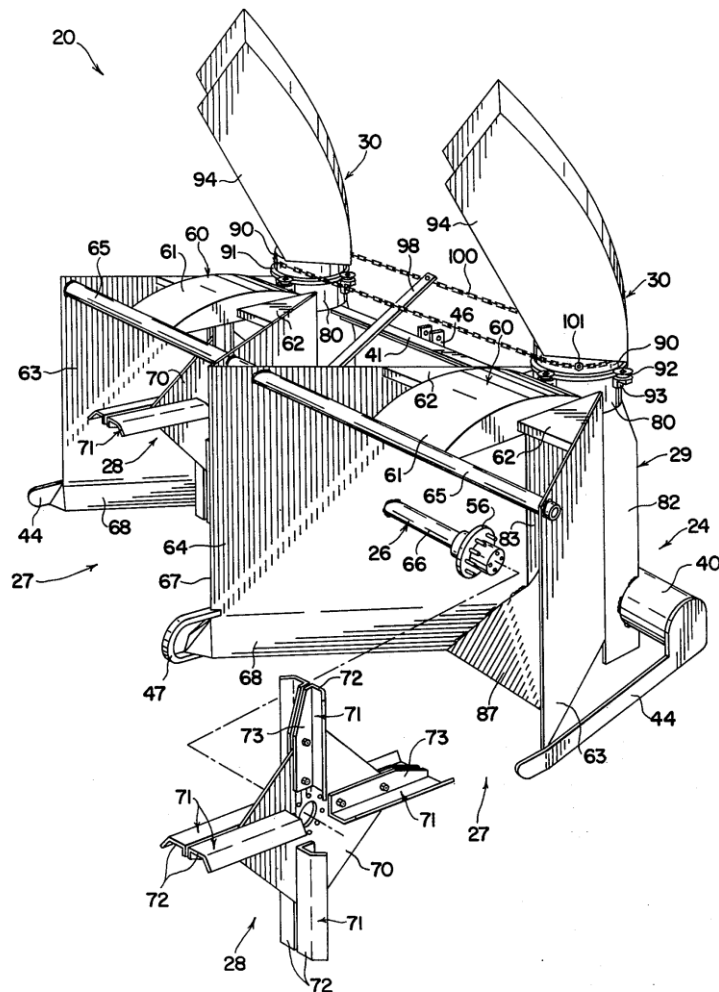


Рисунок 1.4 -Общий вид дорожного снегоочистителя

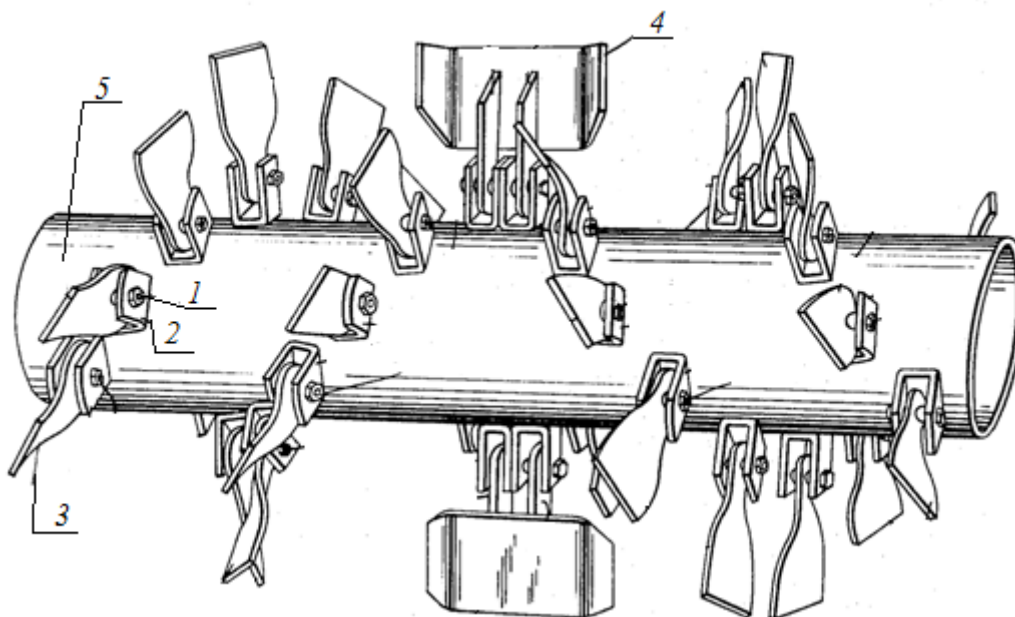


Рисунок 1.5 – Общий вид снегоочистителя, где 1 – штифт; 2 - U-образная скоба; 3 – цепной элемент; 4 – метательное лезвие; 5 – корпус шнека

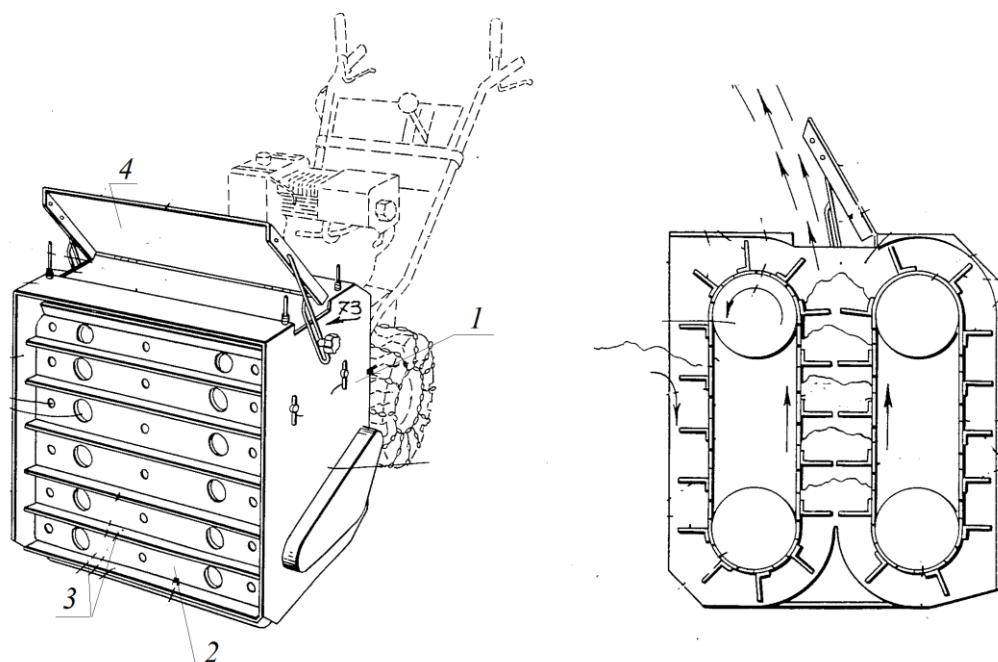


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема снегоочистителя с каналом для снега из вертикальных скребков с полосами, где 1 – корпус; 2 - лента; 3 – горизонтальный скребок; 4 – верхняя крышка

Рассмотрев множество конструктивных решений, направленных на повышение эффективности проведения снегоочистных работ РСО на примере шнеко фрезерно-роторных снегоочистителей, представляется возможным все существующее многообразие этих решений можно свести к группе множеств:

- множество базовых машин, A ;
- множество метательных аппаратов (далее МА), B ;
- множество питателей, C .

Современный РСО – это объединение элементов выделенных выше множеств:

$$A \cap B \cap C$$

Из данного соотношения и патентного обзора следуют следующие варианты конструктивных схем РСО (рисунок 1.2, 1.7):

$$A \cap B,$$

$$A \cap C.$$

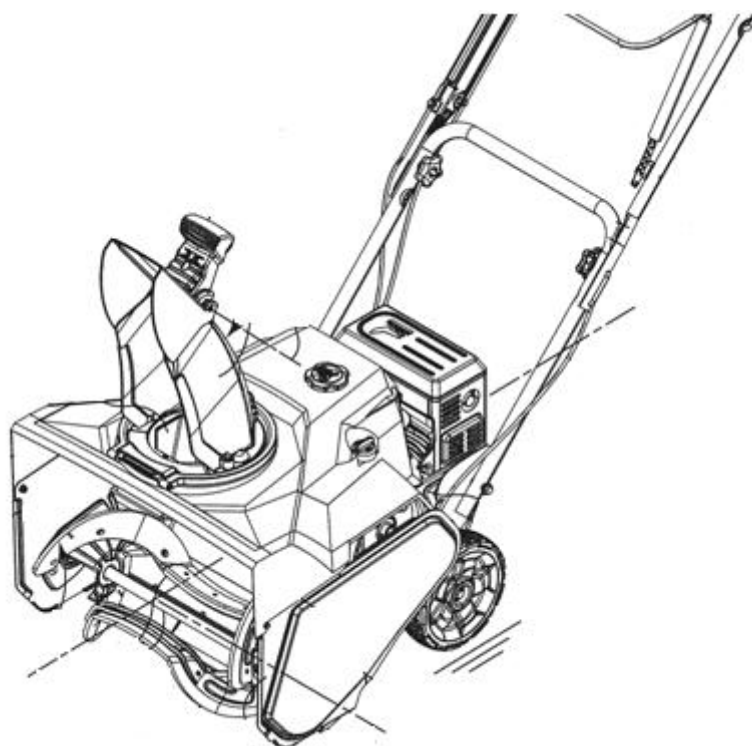


Рисунок 1.7 – Общий вид ФРС, где функция ротора МА совмещена с фрезой питателя.

Упорядочивание перечисленных множеств, произведем, используя теорию графов, множество вершин которых представляют собой множества базовых машин, A , метательных аппаратов, B , и питателей, C , и множеством их парных связей - множеством рёбер. Элемент множества рёбер есть пара элементов множества вершин [90]. Выбор инструментария описания множества РСО обусловлен тем, что любая классификация, или графическое представление системы, имеют древовидный вид. Согласно [90], дерево – это одна из

разновидностей графов, в котором отсутствуют циклы и минимально возможное число ребер.

Использование графа для классификации множества РСО возможно при определении отношений эквивалентности между элементами внутри множеств A , B , C , для которых используется операция объединения, а также отношений порядка между ними.

1.2. Параметрическая систематизация роторных снегоочистителей

В представлении классификации РСО в виде графа имеет важное значение выбор отношения эквивалентности между элементами рассматриваемых множеств. Отношения могут быть существенными и несущественными [31].

Существующая классификация РСО достаточно многообразна [66]. Эта классификация, как упорядоченный результат деления множества РСО по соответствующим классификационным признакам, может быть представлена в виде графа. [90]. Основные классификационные признаки и построенная на ее основе классификация в виде ортографа изображена на рисунке 1.8. Необходимо отметить, что согласно формуле Кэли [66], классификация (см. рисунок 1.8) может быть представлена, K_p :

$$K_p = n_g^{n_g - 2},$$

где K_p – число деревьев с n_g вершинами; n_g – количество вершин в древовидном графе.

Анализ полученного графа указывает на отсутствие циклов Гамильтона и Эйлера, что может характеризовать множество РСО, как открытое множество, где каждый отдельный вид развивается самостоятельно. Максимальная степень вершин у снегоочистителей коммунального назначения, обладающих максимальным конструктивным разнообразием по сравнению с другими двумя направлениями развития РСО. Наиболее консервативными, с этих позиций, являются аэродромные РСО.

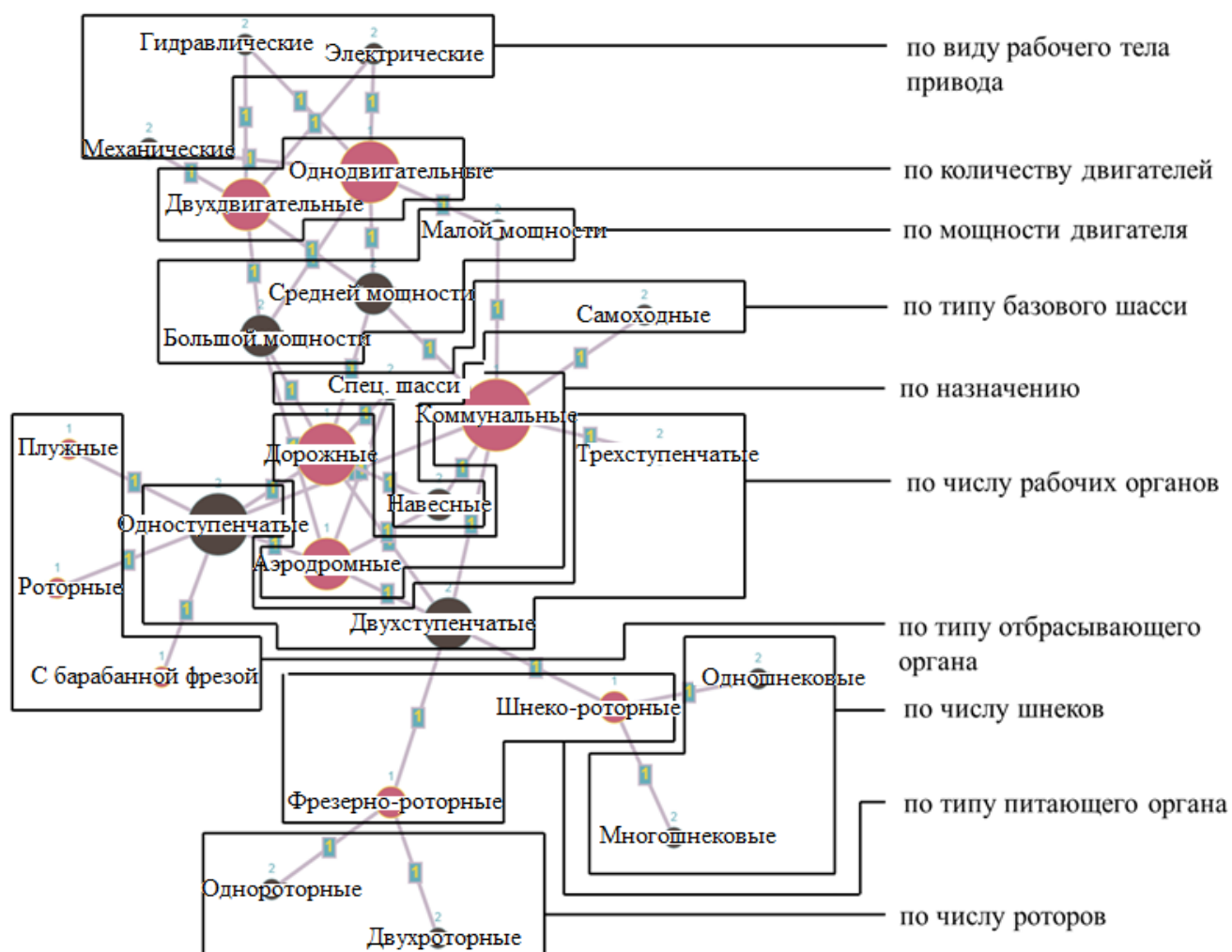


Рисунок 1.8 - Классификационные признаки и классификация PCO

Одна из трудностей, которая возникает при классификации, является переходная форма [31]. Для ее преодоления, необходимы объективные классификационные признаки, представляющие собой конкретные элементы, значения их характеристик или функциональное назначение присутствующие в системе PCO. Следовательно, необходимо математическое описание каждого классификационного признака множества - роторные снегоочистители, построенного на конструктивных и технологических соотношениях.

Для PCO в методиках их проектирования [111, 66] необходимые конструктивные и технологические параметры представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1–Формулы определения конструктивных и технологических параметров РСО

Параметр	Формула
1	2
радиус ротора метательного аппарата, R_p , м	$R_p = \frac{\Pi_{mex}}{1,8 \cdot \rho_{сн} \cdot K_H \cdot V_p \cdot b_p \cdot (1 - K_I^{-2})}$
коэффициент отношения	$K_I = \frac{R_P}{r_P} = 0,5 \cdot [\exp(\varphi_P \cdot \alpha_V) + \exp(-\varphi_P \cdot \alpha_V)] = 2,2 \dots 2,5$
техническая производительность ротора РСО, т/ч,	$\Pi_{mex p} = \frac{V_p \cdot b_p \cdot R_p}{2} \left(1 - \frac{r_p^2}{R_p^2} \right)$
диаметр фрезы питателя РСО, D_ϕ , м	$D_\phi \geq \frac{3 B}{2 \pi}$
ширина ленты фрезы питателя, b_ϕ , м	$b_\phi \geq \frac{100 \cdot V_{nep}}{60 \cdot n_\phi \cdot z} + \sqrt{2 \cdot D_\phi \cdot f_2 \cdot \frac{100 \cdot V_{nep}}{60 \cdot n_\phi \cdot z} \cdot \sin \alpha_k}$
длина лопасти ротора, l_p , м	$l_p = R_p (1 - K_I^{-1})$
ширина лопасти ротора, b_p , м	$b_p = 2 \cdot R_p \cdot K_p \text{ где } K_p = 0,325 \dots 0,375$
ширина захвата, B , м	$B = 4 \cdot \pi \cdot R_\phi \cdot \operatorname{tg}(\theta)$

Продолжение таблицы 1.1.

1	2
Энергетические соотношения	Формула
мощность, кВт, затрачиваемая на разгон снежной массы лопастью ротора метательного аппарата, N_p	$N_p = 1,32 \cdot 10^{-3} \omega_p \cdot R_p^2 \cdot \Pi_{mex} \left[1 + \frac{1}{1+f_p} - 0,5 \frac{1}{(1+f_p)^2} \left(1 - \frac{r_p^2}{R_p^2} \right) \right]$
мощность, кВт, затрачиваемая на преодоление сил трения снега о неподвижный кожух	$N_2 = \frac{\omega_p^2 \cdot R_p^2 \cdot \Pi_{mex} \operatorname{tg} \delta}{1000} \frac{1-c_x^{-3}}{1-c_x^{-2}}$
мощность, кВт, теряемая при ударе лопастей о снег	$N_3 = 0,78 \cdot 10^{-3} \frac{J_p J_{ch} \omega_p^3}{J_p + J_{ch}}$
затраты мощности, кВт, на резание снега роторами роторно-торцевых снегоочистителей	$N_4 = 10^{-3} \cdot \pi \cdot k_{рез} \cdot V_{nep} \cdot R_p^2 \cdot \left(1 - K_1^{-2} \right)$
затраты мощности, кВт, на резание снега питателем	$N_{\phi 1} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot \pi^2 k_{рез} B \cdot R_\phi \cdot V_{nep} \cdot z_n}{\omega_\phi \cdot n_3 \cdot T \cdot \cos(\theta)} \left(R_\phi \omega_\phi - \frac{\pi \cdot V_{nep}}{n_3} \right) \times \operatorname{tg}(\theta + \delta_{CH})$
затраты мощности, кВт, на транспортирование снега в питателе	$N_{\phi 2} = 1,39 \cdot 10^{-3} \frac{B \cdot \omega_\phi^2 \cdot R_\phi \cdot \Pi_{mex} (\operatorname{tg} \rho + \operatorname{tg} \delta_{CH}) \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \delta_{CH})}{\operatorname{tg} \alpha}$

Окончание таблицы 1.1.

1	2
мощность привода лопастного ротора, кВт	$N_p = 2,72 \cdot 10^{-3} \omega_p^2 \cdot R_p^2 \cdot \Pi_{tex} \cdot K$
мощность привода шнекового питателя, кВт	$N_n = a \cdot \Pi_{tex} + N_o$

Из представленных выражений следует, что PCO, как подсистема включает в себя подсистемы более низкого иерархического уровня, которые представлены на рисунке 1.9.

Энергетические соотношения вступают в качестве отношений порядка. Параметрические выражения используются в качестве отношений эквивалентности.

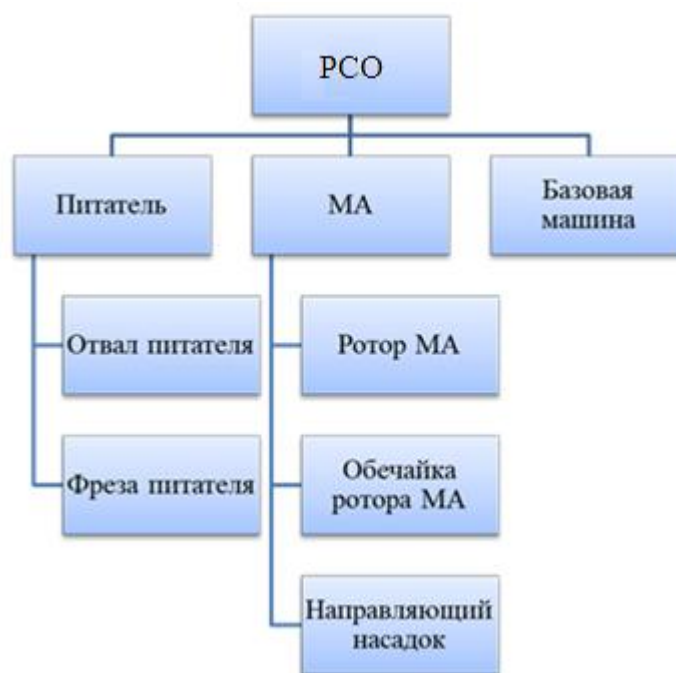


Рисунок 1.9 – Структурная схема элементов подсистем на примере PCO

Общее количество параметров, характеризующих подсистему PCO, составляет 7 [111], количество исходных данных и соответственно равно 10 [66].

Первым шагом осуществления параметрической систематизации роторных снегоочистителей является статистическая обработка представленных на рынке

роторных снегоочистителей с получением регрессионных зависимостей их конструктивных и технологических параметров. Так в работе [87], представлены результаты регрессионно-корреляционного анализа существующих конструкций РСО в виде регрессионных зависимостей технической производительности снегоочистителя, Π_{mex} , от мощности двигателя, $N_{\phi pc}$, кВт, и производительности, Π_{mex} , от ширины захвата, B_{ϕ} , м, соответственно:

$$\Pi_{mex} = 0,1104 \cdot B_{\phi}^{1,5189},$$

$$\Pi_{mex} = 987 \cdot e^{0,0876 \cdot N_{\phi pc}}.$$

Можно так же привести регрессионные зависимости полученные средствами Microsoft Excel для таких конструктивных и технологических параметров как зависимости мощности двигателя РСО, $N_{\phi pc}$, от его ширины захвата, B , технической производительности, Π_{mex} , диаметра ротора МА, D_p , м и диаметра фрезы, D_{ϕ} , м, представленные на рисунках 1.10, 1.11, 1.12 и 1.13.

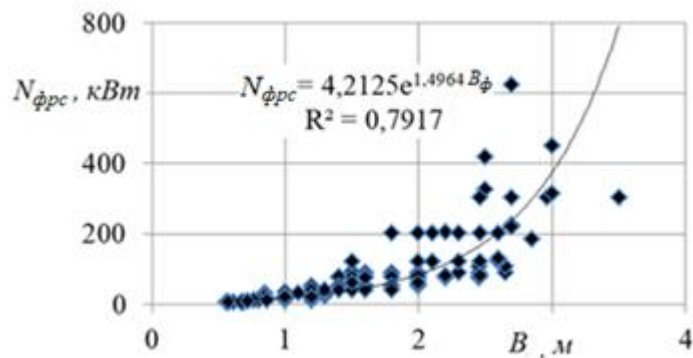


Рисунок 1.10 - Зависимость мощности двигателя, $N_{\phi pc}$, от ширины захвата РСО

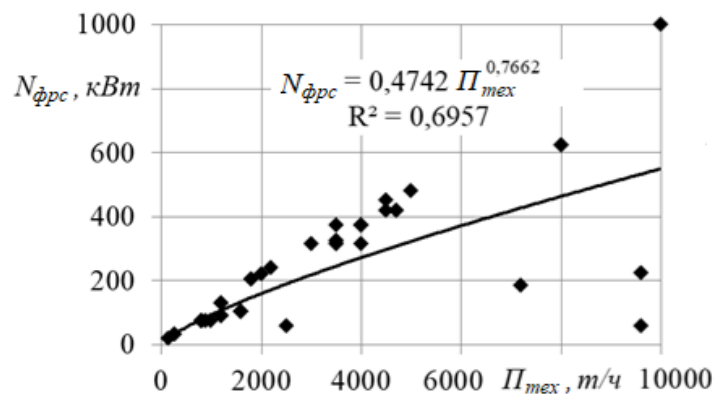


Рисунок 1.11 - Зависимость мощности двигателя, $N_{\phi pc}$, от производительности РСО

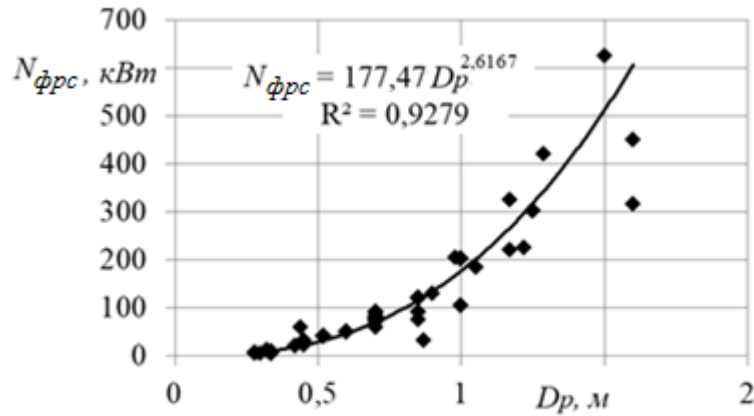


Рисунок 1.12 - Зависимость мощности двигателя, $N_{\phi pc}$, от диаметра ротора МА РСО

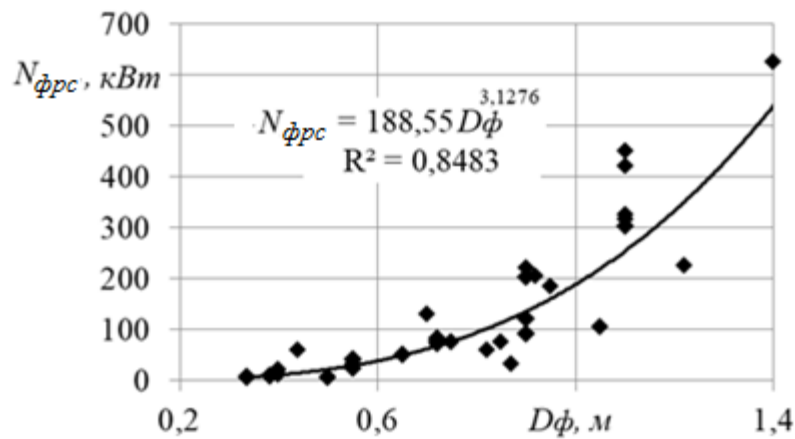


Рисунок 1.13 - Зависимость мощности двигателя, $N_{\phi pc}$, от диаметра фрезы питателя РСО

Однако представленные соотношения являются бесполезными для целей классификации, и тем более параметрической систематизации.

В этом случае можно получить лишь общие отличительные признаки, которые, как правило, составляют основу высших иерархических уровней классификации. В работе [111] представлен классификационный признак в параметрическом виде: по мощности привода, который всё множество РСО разбивает на три подмножества (см. рисунок 1.8). Однако не ясно, на основании чего были определены легкие с мощностью до 75 л.с., средние – до 150 л.с. и тяжелые свыше 150 л.с., а так же разбиение множества РСО по производительности на подмножества: легкие (производительность до 200 т/час), средние (до 1000 т/час) и тяжелые с производительностью более 1000 т/час [66].

Для определения, в частности, границ, получаемых подмножеств, воспользуемся элементами кластерного анализа. В нашем случае под кластером будем понимать подмножество PCO, которое выделяется из остальной части наличием некоторой однородности его элементов, а одной из задач является структуризация PCO [68]. Критерием для таблиц «объект – признак» является сумма расстояний от объектов до центров соответствующих кластеров, т.н. Евклидово расстояние, которое является критерием метода k -средних [68]. Метод k -средних – самый популярный метод построения разбиения по матрице объект – признак, включен во все пакеты статистики [68].

В качестве представителя обычно выбирается объект, ближайший к центру по расстоянию, используемому в критерии метода k -средних [68], обычно – метрики Евклида, именно этот представитель может выступать в качестве количественного показателя соответствующего классификационного признака.

На рисунках 1.14, 1.15, 1.16 представлено объединение, средствами программного обеспечения (далее ПО) Statistica, множества PCO в метриках мощность двигателя, $N_{фрс}$, и диаметр ротора МА, D_p , в 3, 4 и 5 кластеров, соответственно, методом k -средних [1]. На рисунке 1.17 представлена дендрограмма разбиения по наблюдаемым характеристикам PCO.

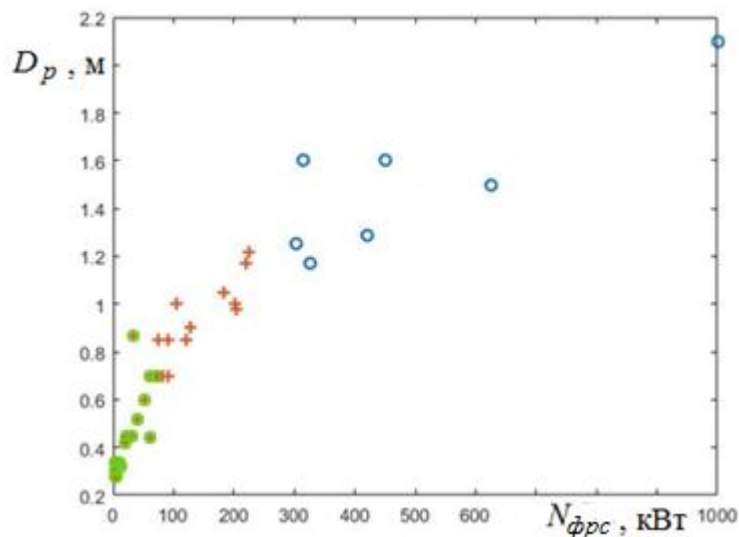


Рисунок 1.14–Разбиение подмножества PCO на три кластера

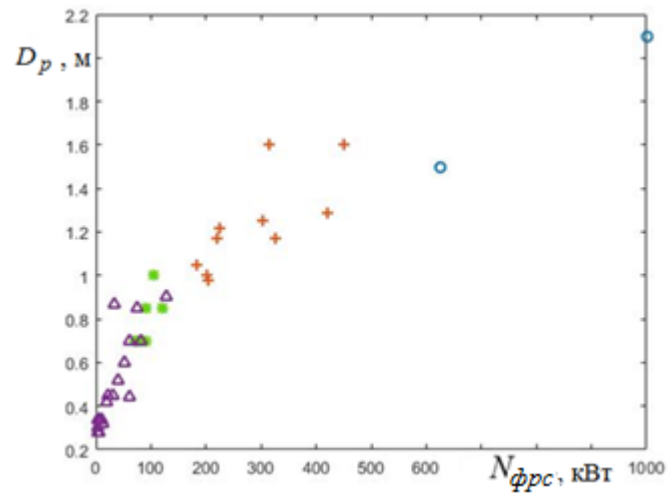


Рисунок 1.15 - Разбиение подмножества PCO на четыре кластера

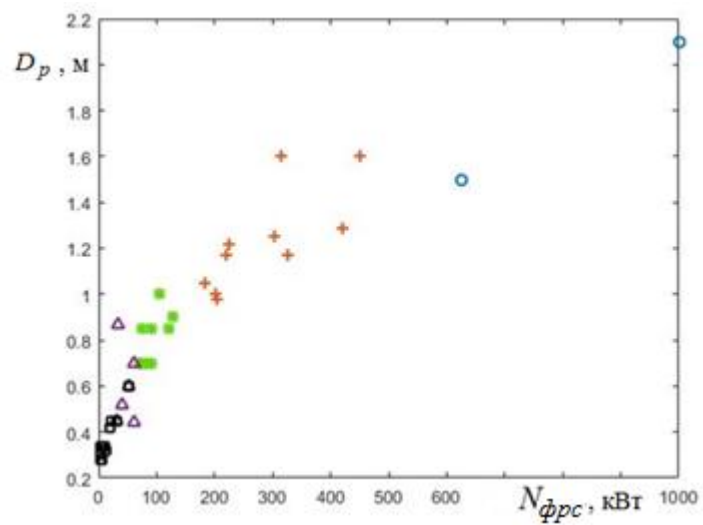


Рисунок 1.16 - Разбиение подмножества PCO на пять кластеров

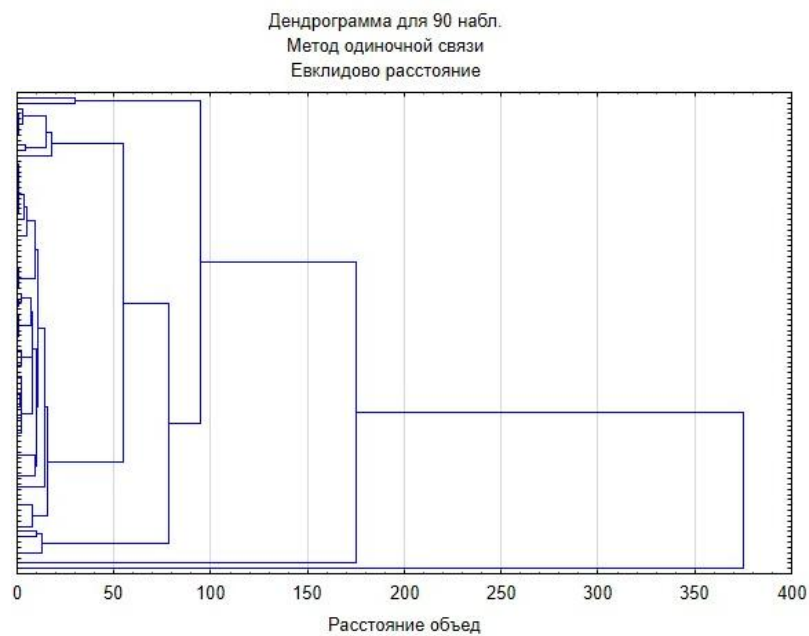


Рисунок 1.17 – Дендрограмма разбиения по наблюдаемым характеристикам PCO

Определение основных параметров подсистемы РСО и количества независимых переменных для построения образа РСО базируется на наборе базовых соотношений, которые получаются из соотношений определяющих траекторию движения элементов подсистемы РСО, кинематических выражений определяющих синхронность совместной работы этих элементов.

В работе [5] приводится условие рекомендуемых режимов работы фрезы, под которым понимается такое соотношение поступательной скорости фрезерно-роторного снегоочистителя (далее ФРС), $V_{пер}$, угловой скорости вращения фрезы питателя РСО, ω_{ϕ} , и радиуса фрезы, R_{ϕ} , которое исключает отсутствие точек пересечения траектории произвольной точки фрезы в вертикальной плоскости [5]:

$$R_{\phi} \geq \frac{V_{пер}}{\omega_{\phi}}. \quad (1.1)$$

Данное условие может быть интерпретировано, как условие разделения множества снегоочистителей на роторные и скоростные плужные снегоочистители.

Рассмотрим условие наличия точек пересечения траектории произвольной точки фрезы в вертикальной плоскости. Очевидно, что их количество может быть велико, что в свою очередь может быть интерпретировано, как отделение от очищаемой снежной массы, снежной стружки различной толщины, и чем большее количество точек пересечения имеет траектория движения точки фрезы, тем тоньше толщина снежной стружки. Толщина снежной стружки зависит от периода траектории движения фрезы роторного снегоочистителя, T_{ϕ} , который может быть определен по формуле:

$$T_{\phi} \geq \frac{V_{пер}}{\omega_{\phi}}. \quad (1.2)$$

Очевидно, что в процессе работы питателя РСО, фреза должна вырезать такое количество снега, которое бы обеспечивало, полную загрузку метательного аппарата, т.е. период движения фрезы питателя должен быть не менее конкретной

величины. Очевидным является условие того, что толщина снежной стружки должна быть не меньше ширины ленты фрезы, b_ϕ , т.е. период движения фрезы питателя в поступательном движении ФРС составляет не менее ширины ленты фрезы. При больших значениях толщины вырезаемой снежной стружки будут возрастать потери снежной массы в питателе при ее транспортировании к загрузочному окну. С учетом сказанного, выражение (1.2) можно переписать в виде:

$$b_\phi \leq 2\pi \frac{V_{пер}}{\omega_\phi}. \quad (1.3)$$

В случае если $b_\phi = R_\phi$, получаем условие, характерное для работы шнекового питателя шнекороторного снегоочистителя. Иначе говоря, условие (1.3) является условием разделения роторных снегоочистителей на классы фрезерно-роторные и шнеко-роторные снегоочистители. Условие (1.3) так же подразумевает уточнение представленной в работе [5] нижней границы в зависимости от вырезаемого объема снега из снежного массива.

Выражения (1.1) и (1.3) образуют систему ограничений накладываемых на множество возможных значений кинематических характеристик питателя ФРС и размеров фрезы питателя. Совместное решение неравенств (1.1) и (1.3) приводит к условию:

$$b_\phi \leq 2\pi R_\phi. \quad (1.4)$$

Выражение (1.4) с точки зрения геометрии элементов фрезы питателя ФРС не имеет смысла и преобразуется в тривиальное неравенство вида:

$$0 < b_\phi \leq R_\phi. \quad (1.5)$$

Необходимо отметить, что в случае если величина b_ϕ является непостоянной характеристикой, то можно ввести дополнительное отношение эквивалентности (классификационный признак), подразделяющий фрезы ФРС на фрезы с постоянной шириной и переменной шириной ленты фрезы.

Применительно к фрезам питателей ФРС, согласно [62], они относятся к классу коротких фрез. Соответственно, увеличение число шагов, $n_{ш}$, является

отношением эквивалентности между шнекороторными и фрезерно-роторными снегоочистителями. Так же данная конструктивная характеристика порождает сюррективное отображение на другие множества: шнеков измельчителей [65]; фрез земснарядов [94]; грунтометов [24]; экструдеров [77].

В литературе [66] указывается, что у существующих фрез питателей ФРС наблюдается условие:

$$R_{\phi} = 2...3 \cdot b_{\phi},$$

тогда (1.3) можно переписать:

$$R_{\phi} \geq (2...3) \cdot 2\pi \cdot \frac{V_{пер}}{\omega_{\phi}}. \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) можно принять в качестве нижней границы (рисунок 1.18), дополняющей неравенство (1.1), для существующих конструкций ФРС, при выполнении которого, фреза вырезает из снежной массы стружку снега толщиной равной толщине ленты фрезы.

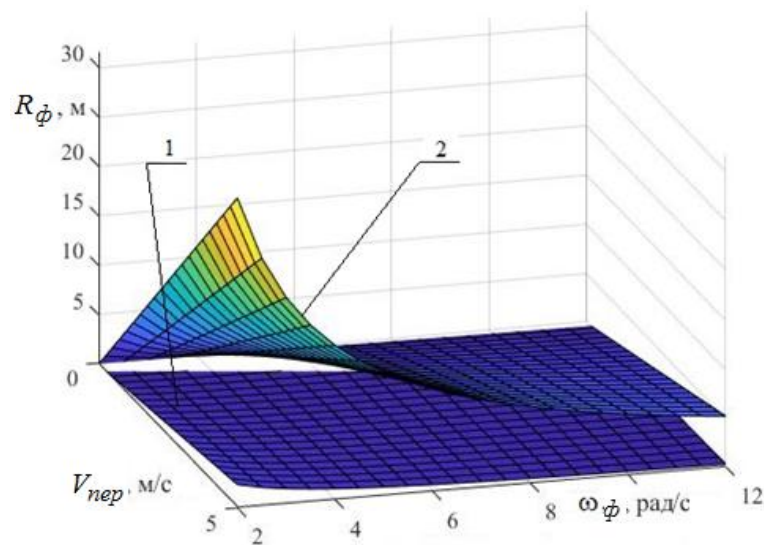


Рисунок 1.18 -Поверхности границ областей определяющих характер движения i -ой точки фрезы: 1 - нижняя граница допустимых значений конструктивных и технологических параметров двухступенчатого ФРС обеспечивающих соблюдение условия (1.1); 2 - нижняя граница области допустимых значений конструктивных и технологических параметров двухступенчатого ФРС, обеспечивающих соблюдение условия (1.5).

В работе [10] указывается на соответствие производительностей работы питателя ФРС и МА ФРС:

$$B \cdot h \cdot V_{\text{пер}} \cdot R_{\phi} = \pi \cdot b_p \cdot (R_p^2 - r_p^2) \cdot \omega_p, \quad (1.7)$$

где h – толщина снежного массива, м.

Аналогичный подход был реализован [44] с использованием четвертой координаты (время) [20] при оценке влияния технологических параметров ФРС на процессы резания снежного массива и транспортирования снежной массы. Согласно [44], отношение эквивалентности для фрез питателей ФРС по окружной скорости составляет 8...10 м/с.

Величина угловой скорости вращения фрезы питателя ФРС выступает в качестве отношения иерархичности. Увеличение угловой скорости вращения ротора позволяет совместить следующие функции:

- захват и транспортирование снежной массы;
- отброс снежной массы в сторону.

Это характерно для одноступенчатых РСО. Именно решение второй задачи изначально обуславливает придание высокой угловой скорости вращения фрезе РСО. При этом условие (1.1) выполняется. Для маломощных, самоходных ФРС [5, 66] с радиусом фрезы порядка 0,1 м и скоростью поступательного движения 0,8 м/с, минимальное значение угловой скорости составит 8 рад/с. Окружная скорость при этом будет равна 0,8 м/с, что не обеспечивает большой дальности отброса. Таким образом, повышение дальности отброса у одноступенчатых ФРС может быть обеспечено за счет:

- увеличение радиуса фрезы, R_{ϕ} ,
- увеличение угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} .

В случае увеличения радиуса фрезы, R_{ϕ} , увеличивается и ширина захвата питателя ФРС, B , что неизбежно приводит к росту мощности, N , сообщаемой фрезе питателя. При увеличении угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , возникает необходимость в увеличении скорости доставки снежной массы к разгрузочному окну, при сохранении поступательной скорости движения ФРС,

$V_{пер}$, а так же возрастают динамические силы, действующие на фрезу и транспортируемую снежную массу. Для обеспечения эффективности работы одноступенчатых ФРС, в классах средней и высокой мощности, реализуются другие конструктивные решения фрезы питателя ФРС.

Одноступенчатые РС в классе маломощных ФРС представлены РСО в которых фреза имеет большой угол захода ленты фрезы, малый радиус и высокую угловую скорость вращения фрезы. При переходе в классы среднемощных и ФРС большой мощности, одноступенчатые ФРС представлены барабанной фрезой.

Минимизация динамических нагрузок за счет ограничения угловой скорости вращения фрезы неизбежно приводит к появлению двухступенчатых ФРС. Первой ступенью в которых выступает питатель с небольшой по сравнению с угловой скоростью вращения ротора, ω_p , метательного аппарата – второй ступенью.

Двухступенчатые ФРС с относительно небольшой угловой скоростью вращения фрезы, ω_f , порождают отображение множества ФРС с функцией фрезерования [6] на рабочие органы для удаления снежного наката и разработки мерзлых грунтов [88].

Необходимо отметить, что ориентация плоскости вращения элементов рабочего оборудования РСО, так же выступает в качестве отношения эквивалентности, и определяет характер объединения подмножеств, из которых формируется образ роторного снегоочистителя. Существующие конструктивные варианты:

- вращение в поперечной вертикальной плоскости (см. рисунок 1.2);
- вращение в продольной вертикальной плоскости (см. рисунок 1.4);
- вращение в поперечной и продольной плоскостях, например ФРС SB 500 (АФ 5000), (рисунок 1.19);
- вращение в горизонтальной плоскости, примером таких конструктивных схем может являться лаповый снегопогрузчик СнП-17 (рисунок 1.20).



Рисунок 1.19 – ФРС SB 500 (АФ 5000)



Рисунок 1.20 – Лаповый снегопогрузчик СнП-20

Соотношение (1.7) посредством $V_{пер}$, связывает конструктивные параметры питателя РСО с конструктивными параметрами МА РСО. Дополним выражение (1.7) рядом конструктивных параметров питателя и ротора МА. Для этого воспользуемся выражением для многозаходных, n_3 , одношаговых двух встречных фрез [9]:

$$W_{\phi} = 8 \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot R_{\phi} \cdot \frac{V_{пер}}{n_3 \cdot \omega_{\phi}}. \quad (1.8)$$

где θ – угол захода ленты фрезы, град.

Данный вырезанный объем должен быть полностью загружен в МА РСО. Время загрузки для многозаходной фрезы, t_3 , соответственно равно:

$$t_3 = \frac{2\pi}{\omega_{\phi}}. \quad (1.9)$$

С другой стороны выражение (1.9) может быть написано через конструктивные и технологические параметры МА ФРС такие, как количество целых оборотов ротора МА ФРС, за которые весь вырезанный объем снежной массы будет

загружен, n_{po} , количество лопастей ротора МА, n_p , и количество межлопастных пространств загруженных вырезанной снежной массой, i_p . Время загрузки, с учетом перечисленных конструктивных параметров, примет вид:

$$t_3 = \frac{2\pi \cdot (n_{po} + \frac{i_p}{n_p})}{\omega_p} . \quad (1.10)$$

Приравнявая (1.9) и (1.10) окончательно получаем:

$$\frac{n_{po} + \frac{i_p}{n_p}}{\omega_p} = \frac{1}{\omega_\phi} . \quad (1.11)$$

Условие (1.11) может интерпретироваться как отношение эквивалентности (классификационный признак) деления множества РСО по числу рабочих органов. Анализ уравнения (1.11) позволяет сделать вывод о прямо пропорциональной зависимости между ω_p и ω_ϕ , где в качестве коэффициента пропорциональности выступает заполняемый объем ротора МА. Однако данное равенство является слишком условным в силу того, что учитывает всего две технологические характеристики ФРС, что проявляется, например, при том, что ротор МА роторного снегоочистителя должен заполняться за один оборот и мы получаем тривиальное выражение, как минимум, равенства, ω_ϕ , и, ω_p , при этом практика показывает что, ω_p , намного превышает, ω_ϕ . В сочетании с выражением (1.1) получаем условие, связывающее поступательную скорость РСО, радиус фрезы и минимальную угловую скорость вращения ротора МА ФРС [11]:

$$R_\phi \geq \frac{V_{nep}}{\omega_p} (n_{po} + \frac{i_p}{n_p}) . \quad (1.12)$$

На рисунке 1.21 представлены поверхности нижних допустимых значений угловой скорости вращения, ω_ϕ , фрезы питателя РСО и ротора МА РСО, вычисленные по формулам (1.1) и (1.12), соответственно. При условии, что ротор МА полностью заполняется за один оборот фрезы питателя РСО. В случае

увеличения продолжительности заполнения ротора, например, за два полных оборота, то его угловая скорость вращения увеличится в два раза.

Выражение (1.10) необходимо учесть, при уточнении выражения (1.7) [10].

Теоретическая производительность питателя РСО, Π_{ϕ} , с учетом выражений (1.8) и (1.9) имеет вид:

$$\Pi_{\phi} = \frac{8\pi^2 h \cdot R_{\phi} \cdot \operatorname{tg}\theta \frac{V_{\text{пер}}}{n_3 \omega_{\phi}}}{\frac{2\pi}{\omega_{\phi}}} = 4\pi \cdot h \cdot R_{\phi} \cdot \operatorname{tg}\theta \frac{V_{\text{пер}}}{n_3}. \quad (1.13)$$

Теоретическая производительность МА РСО, Π_p , с учетом выражения (1.10) запишется следующим образом:

$$\Pi_p = \frac{\frac{\pi \cdot b_p (R_p^2 - r_p^2)}{2\pi(n_{po} + \frac{p}{n_p})}}{\omega_p} = \frac{\omega_p b_p (R_p^2 - r_p^2)}{2(n_{po} + \frac{p}{n_p})}. \quad (1.14)$$

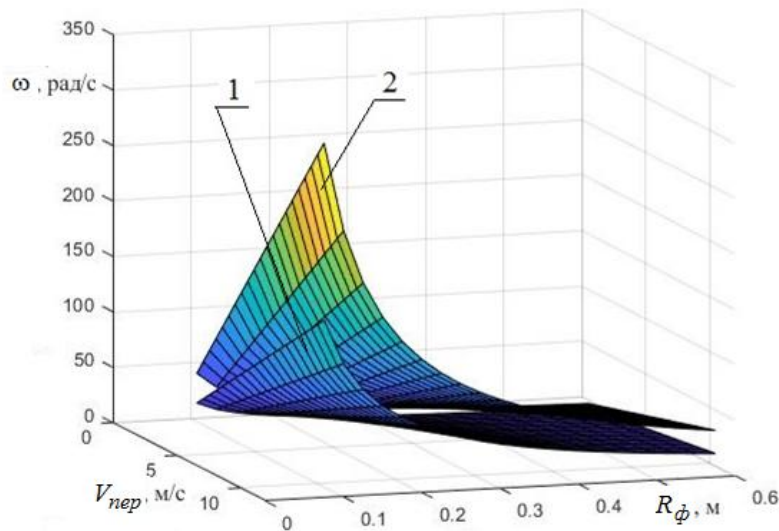


Рисунок 1.21 - Поверхности нижних границ областей допустимых значений угловых скоростей вращения ротора: 1 - нижняя граница допустимых значений ω_{ϕ} обеспечивающих соблюдение условия (1.1); 2 - нижняя граница области допустимых значений, ω_p из условия (1.12).

Приравнявая (1.13) и (1.14) получаем:

$$8\pi \cdot h \cdot R_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta \frac{V_{nep}}{n_3} = \frac{\omega_p b_p (R_p^2 - r_p^2)}{n_{p0} + \frac{p}{n_p}}. \quad (1.15)$$

С целью определения степени согласованности результатов с выражением (1.1), из равенства (1.15) выразим, ω_p . На рисунке 1.22 представлены поверхности нижней границы допустимых значений, ω_{ϕ} , и, ω_p , вычисленных по формулам (1.1) и (1.15) соответственно, при $\theta=20^0$; $h=0,1$; $n_3=2$; $R_p=0,9R_{\phi}$; $r_p=0,7R_p$; $b_p=0,7R_p$; для случая загрузки ротора за один оборот фрезы.

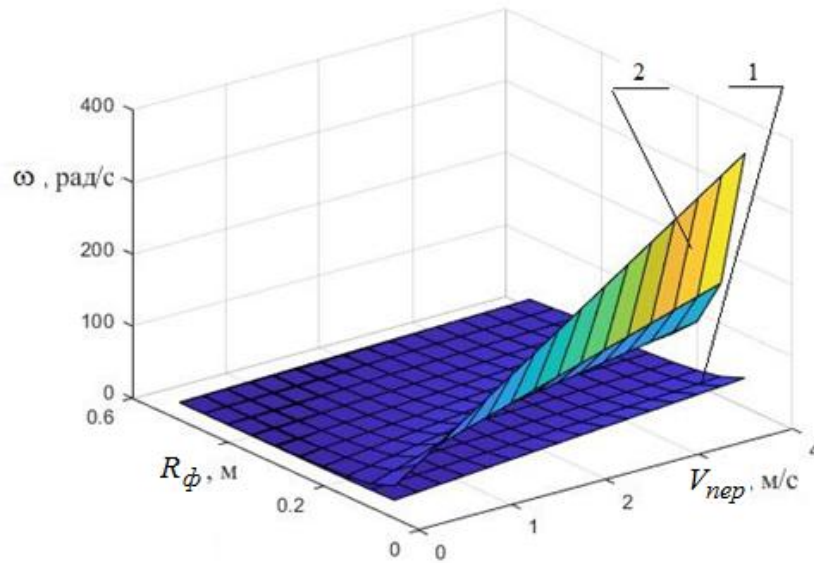


Рисунок 1.22 - Поверхности нижних границ областей допустимых значений угловых скоростей вращения: 1 - нижняя граница допустимых значений, ω_{ϕ} , обеспечивающих соблюдение условия (1.1); 2 - поверхность значений, ω_p , вычисленная по формуле (1.15).

В работе [16] проведено исследование выражений, получаемых из условия соответствия образующегося снежного вала, h , при работе МА РСО и количества вырезанной снежной массы из снежного массива, при дальности отброса снежной массы, L , м:

$$h = \frac{B \cdot h \cdot V_{nep} \cdot \Delta t}{S_y \cdot L} = \frac{B \cdot h}{L},$$

$$h = \frac{\omega_p \Delta t \cdot R_p^2 \cdot b_p}{S_y \cdot L} = \frac{\omega_p \cdot R_p^2 \cdot b_p}{V_{nep} \cdot L}.$$

Анализ этих выражений показывает, что необходима согласованность основных технологических параметров питателя и МА РСО (рисунок 1.23). В противном случае будут наблюдаться различные толщины снежного вала, h , в продольном и поперечном направлениях (рисунок 1.23). Эта согласованность достигается обеспечением равенства [10]:

$$B \cdot h \cdot V_{nep} = \omega_P \cdot R_P^2 \cdot b_P.$$

На рисунке 1.23 точка А пересечения двух кривых является решением данного уравнения.

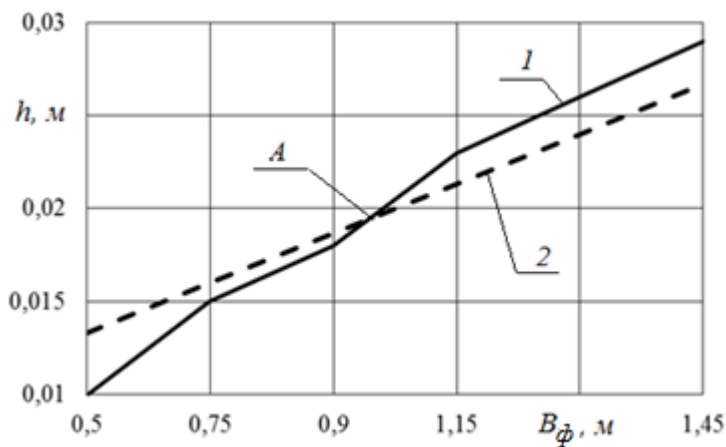


Рисунок 1.23 – Зависимость толщины пятна разброса от ширины лопасти ротора (ряд 1) и ширины захвата питателя ФРС (ряд 2), при $L=5\text{ м}$, $h=0,1\text{ м}$; $\omega_p=87,2\text{ с}^{-1}$; $R_p=0,16\text{ м}$; $V_{nep}=1,4\text{ м/с}$.

Максимально допустимая угловая скорость вращения ротора, ω_p , МА роторного снегоочистителя может быть приближенно оценена из следующих соображений: частица конкретного размера, $r_{чi}$, в момент схода с ленты фрезы должна попасть в межлопастное пространство ротора МА ФРС. Максимальный путь, $l_{ч}$, который проходит частица с эквивалентным радиусом, $r_{чi}$, для конструктивной схемы расположения осей вращения ротора МА и фрезы питателя РСО в одной горизонтальной плоскости, в общем виде, описывается уравнением:

$$l_{ч} = R_\phi.$$

Время, за которое частица пройдет путь l_c , при условии, что скорость частицы постоянна, равно:

$$t_c = \frac{l_c}{v_x} = \frac{R\phi}{v_x}, \quad (1.16)$$

где v_x – скорость движения частицы в направлении оси ротора МА РСО.

Следовательно, минимальный угол поворота ротора, α_c , для полного попадания частицы в межлопастное пространство составит:

$$\alpha_c = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{r_{ci}}{R_p}\right).$$

Время, затраченное ротором на поворот на данный угол:

$$t_c = \frac{\alpha_c}{\omega_p} = \frac{2}{\omega_p} \arcsin\left(\frac{r_{ci}}{R_p}\right). \quad (1.17)$$

Приравнивая (1.16) и (1.17) имеем:

$$\frac{R\phi}{v_x} = \frac{2}{\omega_p} \arcsin\left(\frac{r_{ci}}{R_p}\right). \quad (1.18)$$

Так же, необходимо учесть, что размер частицы должен быть меньше межлопастного пространства ротора МА:

$$\alpha_c \leq \frac{2\pi}{n_p},$$

или

$$2 \cdot \arcsin\left(\frac{r_{ci}}{R_p}\right) \leq \frac{2\pi}{n_p}. \quad (1.19)$$

Из выражений (1.18), (1.19) можно произвести оценку размеров снежных частиц, транспортируемых в МА РСО и скорость, которую им необходимо сообщить лентой фрезы питателя РСО.

На рисунке 1.24 представлена зависимость максимального эквивалентного радиуса снежной частицы, r_{ci} , от R_p при $n_3=2, 3$ и 4 , соответственно.

На рисунке 1.25 представлена зависимость проекции вектора скорости частицы в направлении ротора МА от эквивалентного радиуса, r_{qi} , снежной частицы и угловой скорости вращения ротора при $R_p = 0,3$ м и $R_p = 0,24$ м.

На рисунке 1.26 представлено окно модуля программного продукта, осуществляющего расчет основных конструктивных и технологических параметров по формулам (1.1), (1.3), (1.7), (1.11), (1.15), (1.18), (1.19).

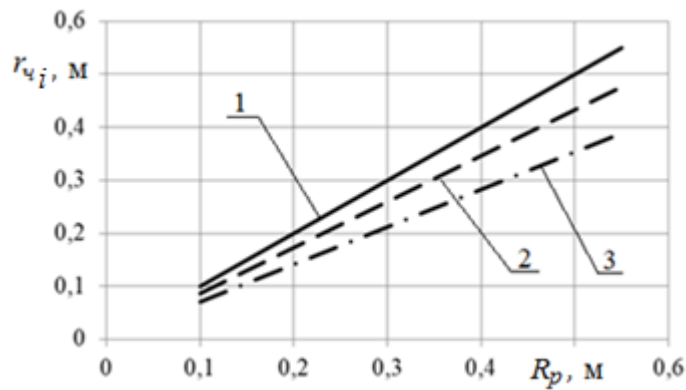


Рисунок 1.24 - Зависимость максимального эквивалентного радиуса снежной частицы, r_{qi} , от радиуса ротора, R_p , где 1 — $n_3=2$; 2 — $n_3=3$; 3 — $n_3=4$.

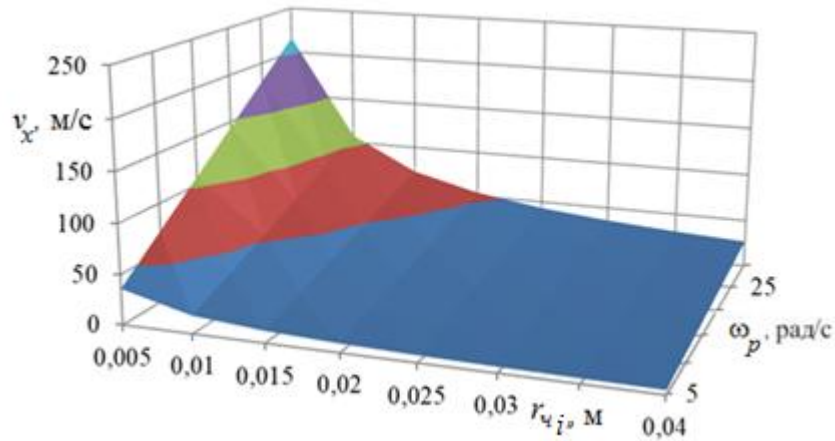


Рисунок 1.25 - Зависимость проекции вектора скорости частицы в направлении ротора МА, v_x , от эквивалентного радиуса снежной частицы, r_{qi} , и угловой скорости вращения ротора, ω_p .

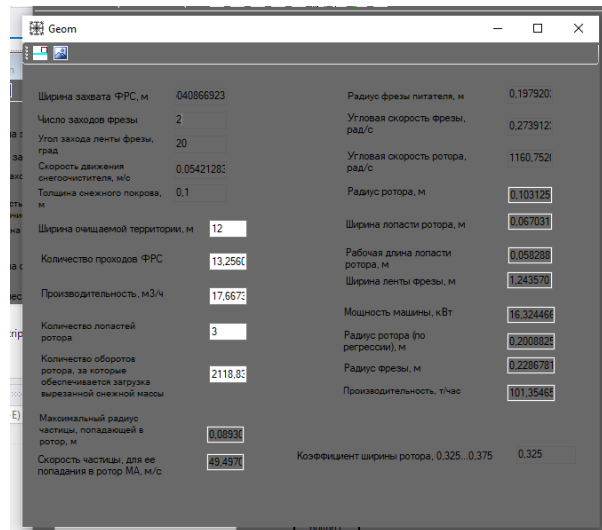


Рисунок 1.26 - Окно модуля программного продукта, осуществляющего расчет основных конструктивных и технологических параметров ФРС.

Общее количество переменных в формулах (1.1), (1.3), (1.7), (1.11), (1.15), (1.18), (1.19), равно 15. Из них 5 относятся к фрезе питателя ФРС, 5 к ротору МА, 3 к снежной массе, 2 к роторному снегоочистителю в целом. Их можно считать независимыми. Соответственно, однозначный выбор конструктивных и технологических параметров РСО осуществить не представляется возможным. Необходимы дополнительные соотношения, которые могут быть получены, только в результате математического моделирования работы элементов РСО.

На основании проведенного анализа были определены следующие направления решения сформулированной 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 конструкции рабочего оборудования РСО.

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 также 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.

Выводы

Рассмотрены альтернативные подходы к упорядочиванию существующего множества РСО.

Определены отношения эквивалентности и иерархичности, представляющие собой количественные значения конструктивных и технологических параметров, на основе которых формируется упорядоченное множество РСО.

Представлены отображения подмножеств ФРС на множества других рабочих органов, что показывает, особенности образующихся систем и характерные диапазоны значений конструктивных и технологических параметров в зависимости от целевого назначения. Такой подход позволил выявить закономерности развития РСО, и реализовывать новые инструменты в проектировании их перспективных конструкций.

Проведен анализ существующей классификации РСО на основе теории графов, что позволило на основании отношений эквивалентности и отношений порядка перейти к определению возможных направлений развития РСО.

Представлены аналитические зависимости как отношения эквивалентности и порядка на основании которых была проведена параметрическая систематизация РСО в рамках существующих классификационных признаков.

Уточнены введенные ранее параметры разбиения множества РСО на основе положений теории кластерного анализа.

Описан алгоритм выбора параметров ФРС на основе функциональных зависимостей связывающих основные конструктивные и технологические параметры ФРС, а так же выбора перспективных схем ФРС.

Определены основные направления решения сформулированной проблемы.

Сформулированы взаимосвязанные задачи исследования, решение которых обеспечивает достижение поставленной в работе цели.

2. ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ

2.1. Математическая модель рабочего оборудования роторного снегоочистителя

2.1.1. Геометрические и кинематические соотношения

Движение снежной массы в РСО осуществляется по одной или двум поверхностям. Примерами транспортирования снежной массы по одной поверхности являются плужные снегоочистители, у которых поверхность отвала является частью цилиндрической, конической, а, в случае скоростной очистки, и более сложной поверхностью [111].

Движение элементов снежного массива в РСО обусловлено уже не только поступательным движением рабочих органов, но и их вращением в различных плоскостях, как было указано выше.

Для проведения исследований работы РСО необходимо ввести систему координат.

Введем прямоугольную систему координат $O_0X_0Y_0Z_0$ (рисунок 2.1), которую будем считать абсолютной инерциальной и связанной ньютоновым пространством Ξ , где начало координат помещаем в начало очищаемого от снега участка и совпадающего с продольной осью симметрии снегоочистителя. Ось O_0X_0 направлена в сторону движения снегоочистителя. Ось O_0Z_0 направлена перпендикулярно очищаемой поверхности. Ось O_0Y_0 дополняет их до правой ортогональной декартовой системы координат [18]. Относительно данной системы координат проводятся исследования движения РСО и организации проведения снегоочистных работ [11, 115].

Прямоугольная инерциальная, относительная система координат $O_1X_1Y_1Z_1$, изображенная на рисунке 2.1, связана с центром масс базовой машины. Направление оси O_1X_1 совпадает с направлением движения снегоочистителя, ось

O_1Z_1 направлена перпендикулярно вверх, а ось O_1Y_1 дополняет до правой ортогональной декартовой системы координат, которая описывает положения рабочего оборудования [18, 52].

При исследовании работы рабочих органов и их элементов целесообразно введение другой прямоугольной относительной системы координат $O_\phi X_\phi Y_\phi Z_\phi$ связанной с элементом рабочего органа, непосредственно взаимодействующего с внешней средой [2, 113]. В случае исследования работы фрезы питателя ФРС система координат $O_\phi X_\phi Y_\phi Z_\phi$ помещена в крайнюю точку оси вращения фрезы питателя ФРС от области загрузочного окна (рисунок 2.1). Направление оси $O_\phi X_\phi$ совпадает с направлением движения снегоочистителя, ось $O_\phi Z_\phi$ направлена перпендикулярно вверх, а ось $O_\phi Y_\phi$ дополняет до правой ортогональной декартовой системы координат и ее направление совпадает с осью вращения фрезы. Такое расположение системы координат, так же позволяет проводить исследования динамических нагрузок действующих на фрезу при вырезании и транспортировании снежной массы, что продемонстрировано в работе [62]. При исследовании работы МА РСО аналогично вводится система координат $O_p X_p Y_p Z_p$, связанная с ротором МА (рисунок 2.1) [4].

При исследовании поведения внешней среды, вводятся дополнительные относительные системы координат, как правило, так же ортогональные [54].

Геометрическая модель фрезы питателя РСО достаточно полно описана в работе [103], в которой так же представлена траектории движения i – ой точки фрезы (рисунок 2.2, 2.3).

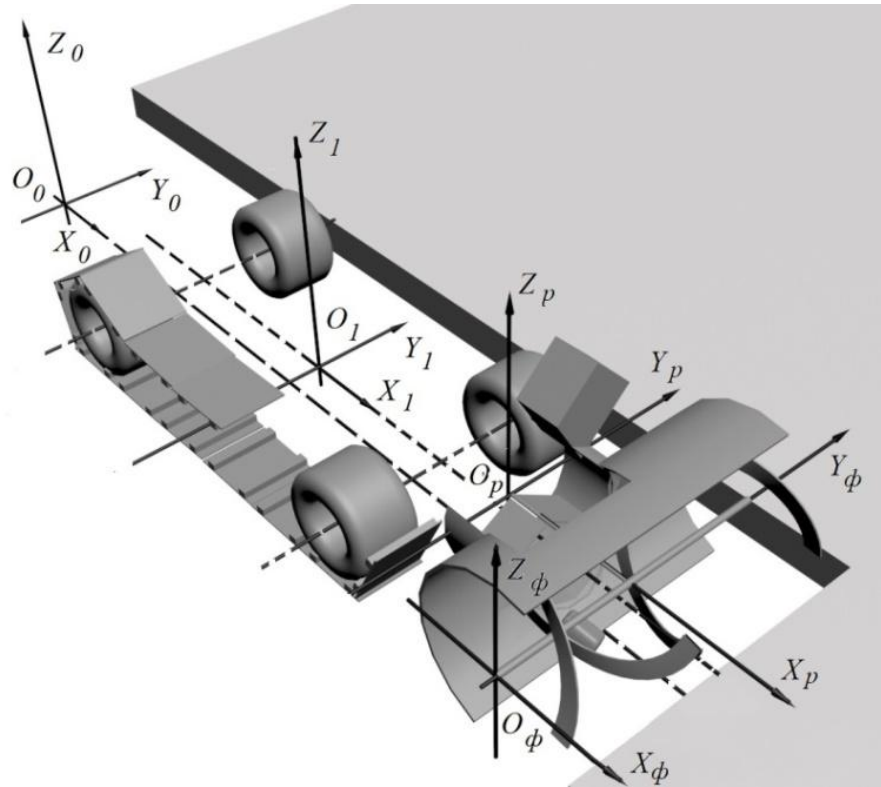


Рисунок 2.1 – Системы координат, в которых осуществляется описание работы PCO

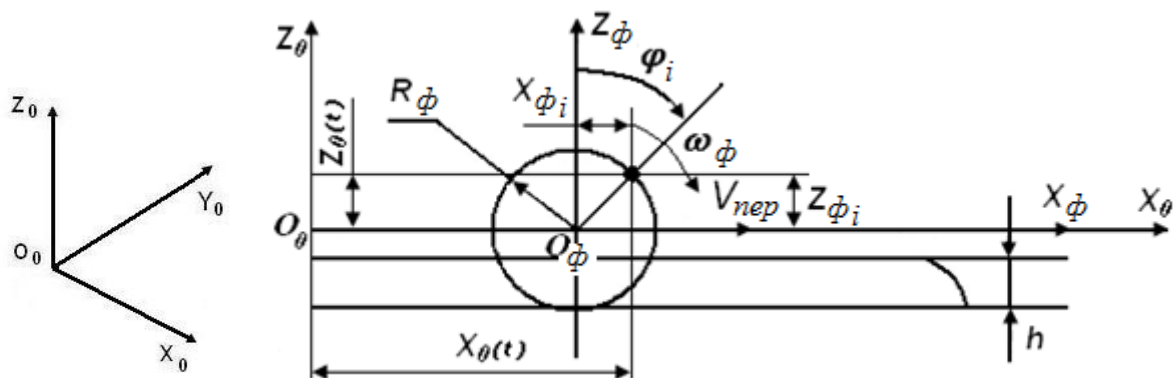


Рисунок 2.2– Расчетная схема для определения траектории движения i – ой точки фрезы в плоскости $X_0O_0Z_0$, вид сбоку: R_ϕ – радиус фрезы питателя; h – толщина снежного покрова; $V_{пер}$ – поступательная скорость PCO; ω_ϕ – угловая скорость вращения фрезы питателя PCO; $x_{\phi i}$, $z_{\phi i}$ – координаты положения i – ой точки фрезы в системе координат $X_\phi O_\phi Z_\phi$

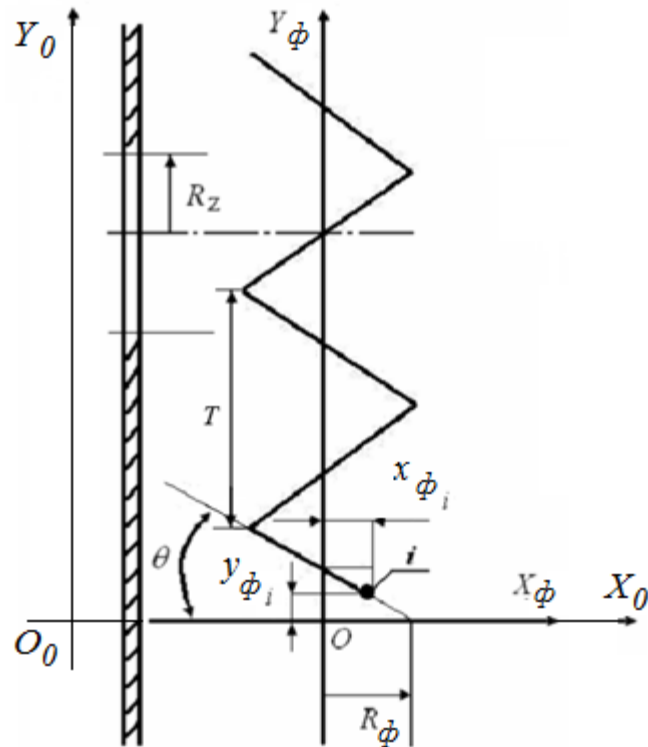


Рисунок 2.3 – Расчетная схема для определения траектории движения i – ой точки фрезы в плоскости $X_0O_0Y_0$:

θ – угол захода ленты фрезы, град; T – шаг винтовой линии ленты фрезы; R_z – радиус загрузочного окна

Траектория движения i – ой точки фрезы в плоскости $X_0O_0Z_0$ описывается уравнениями [85]:

$$\begin{cases} x_0(t) = V_{nep} \cdot t + x_{\phi i} = V_{nep} \cdot t + R_{\phi} \cdot \sin\varphi(t); \\ z_0(t) = z_{\phi i} = R_{\phi} \cdot \cos\varphi(t); \\ \varphi(t) = \omega_{\phi} \cdot t, \end{cases} \quad (2.1)$$

где t – текущее время.

Винтовая линия ленты фрезы питателя ФРС, в системе координат $O_{\phi}X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$, однозначно задается следующими уравнениями [56, 85]:

$$\begin{cases} x_{\phi i}^2 + z_{\phi i}^2 = R_{\phi}^2; \\ \frac{z_{\phi i}}{x_{\phi i}} = \operatorname{tg} \frac{y_{\phi i}}{R_{\phi} \cdot \operatorname{tg}\theta}. \end{cases} \quad (2.2)$$

Во всех случаях условия (1.1)- (1.6) будут определять процесс загрузки пространства, транспортирующего вырезанную снежную массу.

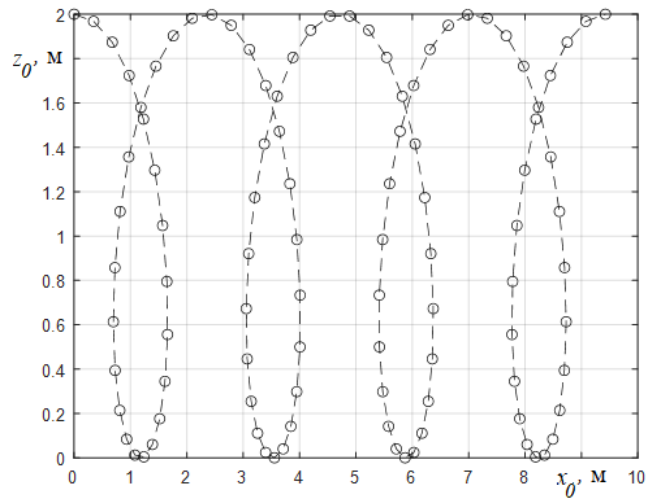


Рисунок 2.4 – Траектория движения i точки ленты фрезы

Для случая роторных снегоочистителей и МА ФРС, расчетная схема представлена на рисунке 2.5.

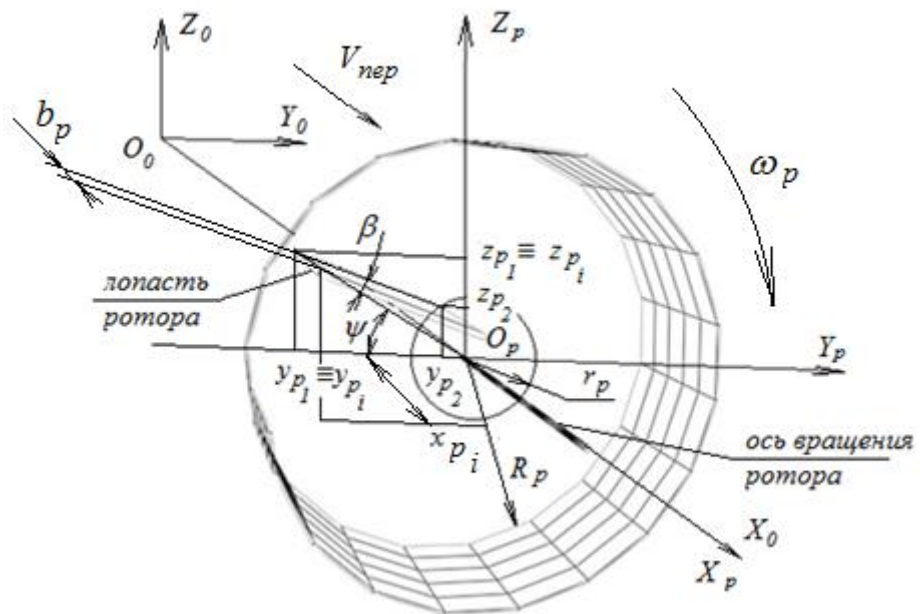


Рисунок 2.5– Расчетная схема определения траектории движения лопасти ротора МА

(роторного снегоочистителя), изображение в перспективе:

β – угол наклона лопасти ротора относительно радиуса ротора; ψ – угол поворота лопасти ротора; ω_p – угловая скорость вращения лопасти ротора МА (роторного снегоочистителя); r_p – внутренний радиус ротора МА; b_p – ширина лопасти ротора; R_p – наружный радиус ротора

Параметрические уравнения траектории движения i -ой точки таких конструкций в плоскости $X_0O_0Z_0$ будут иметь вид:

$$\begin{cases} x_0(t) = V_{nep} t; \\ y_0(t) = y_{pi} = R_p \cdot \sin \psi(t); \\ z_0(t) = z_{pi} = R_p \cdot \cos \psi(t); \\ \psi(t) = \omega_p \cdot t. \end{cases} \quad (2.3)$$

Лопасть ротора МА РСО, в связанной системе координат, $O_p X_p Y_p Z_p$, будет задаваться уравнениями:

$$\begin{aligned} x_{pi} &= b_p; \\ \frac{y_{pi} - y_{p2}}{y_{p2} - y_{p1}} &= \frac{z_{pi} - z_{p2}}{z_{p2} - z_{p1}}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{cases} (y_{pi} - R_p \cdot \cos \psi(t)) \frac{R_p \cdot \sin \psi(t) - r_p \cos(\psi(t) - \beta - \arccos \frac{R_p \sin \beta}{r_p})}{R_p \cdot \cos \psi(t) + r_p \sin(\psi(t) - \beta - \arccos \frac{R_p \sin \beta}{r_p})} = z_{pi} - R_p \cdot \sin \psi(t); \\ x_{pi} = b_p. \end{cases} \quad (2.4)$$

На рисунке 2.6 представлена схема трехступенчатого РСО с системами координат, связанных с каждой ступенью, представляющих собой фрезу питателя, шнек и ротор МА.

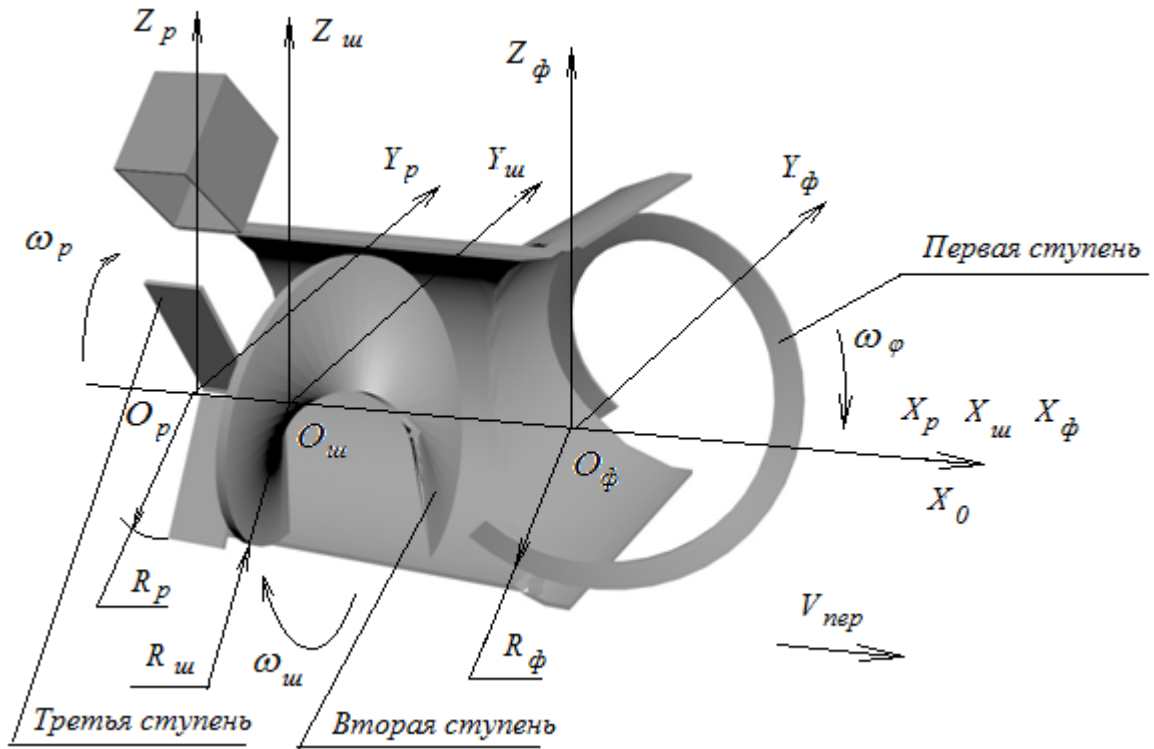


Рисунок 2.6 - Схема трехступенчатого PCO с системами координат, связанных с каждой ступенью

В многоступенчатых PCO соответственно получаем следующие группы уравнений траекторий движения второй ступени, так как первая и третья ступени описываются уравнениями аналогичными (2.1) – (2.4):

$$\begin{cases} x_0(t) = V_{пер} t; \\ y_0(t) = y_i = R_{ш} \cdot \sin \zeta(t); \\ z_0(t) = z_i = R_{ш} \cdot \cos \zeta(t); \\ \zeta(t) = \omega_{ш} \cdot t. \end{cases} \quad (2.5)$$

Винтовая линия шнека питателя второй ступени PCO однозначно задается следующими уравнениями [56, 85]:

$$\begin{cases} y_{шi}^2 + z_{шi}^2 = R_{ш}^2; \\ \frac{z_{шi}}{y_{шi}} = \operatorname{tg} \frac{x_{шi}}{R_{ш} \operatorname{tg} \theta_{ш}}. \end{cases} \quad (2.6)$$

где $\theta_{ш}$ – угол захода шнека.

В случае равенства нулю угловых скоростей вращения, получаются тривиальные уравнения траекторий движения, которые характеризуют поступательное движение элементов рабочего оборудования плужных снегоочистителей.

Таким образом, сопоставляя уравнения (2.1) - (2.6) представляется возможным выделить общую систему уравнений описывающих траекторию движения произвольной точки элемента рабочего органа РСО. Для общности получаемых выражений так же необходимо добавить вращение вокруг вертикальной оси, где угловое положение произвольной точки рабочего органа определяется углом γ и угловой скоростью ω_γ . Окончательно получаем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t) = V_{nep} \cdot t + R \cdot (\sin\varphi(t) + \sin\gamma(t)); \\ y_0(t) = R \cdot (\sin\psi(t) + \cos\gamma(t)); \\ z_0(t) = R \cdot (\cos\varphi(t) + \sin\psi(t)); \\ \varphi(t) = \omega_\varphi \cdot t; \\ \psi(t) = \omega_\psi \cdot t; \\ \gamma(t) = \omega_\gamma \cdot t. \end{array} \right. \quad (2.7)$$

где $\varphi(t)$ – угол поворота элемента рабочего оборудования вокруг оси, системы координат связанной с рабочим органом и лежащей в горизонтальной плоскости и направленной перпендикулярно поступательному движению РСО; $\psi(t)$ – угол поворота элемента рабочего оборудования вокруг оси лежащей в горизонтальной плоскости и со направленной поступательному движению РСО; $\gamma(t)$ – угол поворота элемента рабочего оборудования вокруг вертикальной оси, системы координат связанной с рабочим органом; $\omega_\varphi, \omega_\psi, \omega_\gamma$ – угловые скорости элементов рабочего оборудования вращения вокруг горизонтальной оси, направленной перпендикулярно поступательному движению РСО, горизонтальной оси сонаправленной поступательному движению РСО и вокруг вертикальной оси связанной с рабочим оборудованием системы координат, соответственно; R – радиус рабочего оборудования.

Как показано в работах [5, 18], траектория движения i – ой точки фрезы, описываемой системой уравнений (2.1) в плоскости $X_0O_0Z_0$ представляет собой циклоиду. Траектория движения i – ой точки роторного снегоочистителя в системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$ представляет собой геликоид, а в плоскостях $O_0X_0Z_0$, $O_0Y_0Z_0$ и $O_0X_0Y_0$ периодическую функцию (рисунок 2.7).

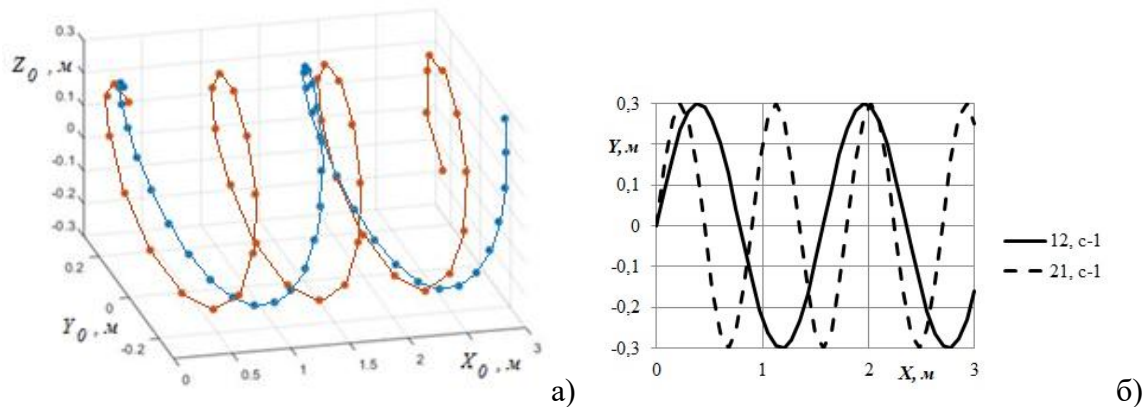


Рисунок 2.7 –Траектория движения лопасти ротора МА (роторного снегоочистителя) при $V_{nep}=3$ м/с, где а) изображение в перспективе, при $\omega_\psi=12$ рад/с (синий) и $\omega_\psi=21$ рад/с (красный); б) в плоскости $O_0X_0Y_0$

В работах [5, 18] приводится уравнение вырезаемого объема снежной массы элементами рабочего оборудования ФРС при его вращении в продольной плоскости. Используя аналогичный подход, получим уравнение вырезаемого объема снежной массы, W_p , при вращении в поперечной плоскости поступательно движущегося элемента рабочего оборудования ФРС.

Значения нижних границ интегрирования будут равны нулю.

Верхние границы интегрирования за один цикл взаимодействия со снежным массивом элемента рабочего оборудования будут определяться следующими значениями:

- по оси X_0 : будут равны расстоянию пройденному снегоочистителем:

$$x_0(t) = 2 \cdot \frac{V_{nep}}{\omega_p} \cdot \arccos\left(\frac{R_p - h}{R_p}\right);$$

- по оси Y_0 :

$$y_0(t) = \sqrt{h \cdot (2 \cdot R_p - h)};$$

- по оси Z_0 : будут равны толщине снежного покрова, h .

Таким образом:

$$W_p = \int_0^h \int_{\sqrt{h \cdot (2 \cdot R_p - h)}}^{\sqrt{h \cdot (2 \cdot R_p - h)}} \int_0^{2 \cdot \frac{V_{nep}}{\omega_p} \cdot \arccos\left(\frac{R_p - h}{R_p}\right)} dx \cdot dy \cdot dz.$$

В результате интегрирования получили объем, вырезаемый элементом рабочего оборудования в поперечной плоскости:

$$W_p = 4 \cdot h \cdot \frac{V_{nep}}{\omega_p} \arccos\left(\frac{R_p - h}{R_p}\right) \sqrt{h \cdot (2 \cdot R_p - h)}. \quad (2.8)$$

Уравнение (2.8) показывает, что вырезаемый объем, W_p , прямо пропорционально зависит от соотношения поступательной скорости снегоочистителя, V_{nep} , и угловой скорости вращения ротора, ω_p , а так же нелинейно от радиуса ротора, R_p , и высоты снежной призмы, h [11].

Так же необходимо учитывать, что вырезанный объем, W_p , не должен превышать свободного объема межлопастного пространства ротора, W_m , МА, которое может быть записано следующим образом:

$$h \cdot \frac{V_{nep}}{\omega_p} \arccos\left(\frac{R_p - h}{R_p}\right) \sqrt{h \cdot (2 \cdot R_p - h)} \leq \frac{\pi \cdot R_p^2 \cdot b_p}{3 \cdot n_p}. \quad (2.9)$$

Таким образом, получены основные геометрические и кинематические соотношения, применимые к подсистемам РСО различной пространственной ориентации и последовательности в конструкции РСО в процессе транспортирования снежной массы.

2.1.2. Математическая модель взаимодействия снежных частиц

Существующие математические модели взаимодействия элементов рабочих органов роторных снегоочистителей со снежным массивом составлены на основе нескольких расчетных схем. Разнообразие состояний снега обуславливает использование различных методов изучения его поведения [156, 168].

В работах [117, 151], снег - это пористый материал, включающий в себя твердый скелет из кристаллов льда, воздуха и водяных паров, заполняющих поры. Данное определение позволяет при определенных допущениях рассматривать снег как отдельное крупнокусковое образование [19], и формулировать более сложные модели с периодической, масштабируемой и т.д. структурами [117, 133, 164].

Одной из первых и наиболее распространенных расчетных схем и является расчетная схема, составленная на основе допущения о том, что снежная частица рассматривается как изолированная материальная частица [51, 66, 111]. В работах [133, 162] снег рассматривается как совокупность снежных частиц конечных размеров. Результаты измерений размеров отдельных снежных частиц представлены в работе [141]. В данной работе было принято допущение о том, что снег является материальной частицей [19, 51, 111]. Математическая модель на основе такой расчетной схемы обладает простотой, допускает получение решение дифференциальных уравнений в явном виде. Основным недостатком, такого подхода заключается в том, что он лишь частично, отражает реальную картину взаимодействия снежной массы с элементами рабочего оборудования, т.к. материальная частица не позволяет моделировать снежную массу.

Представленная в работах [51, 168] расчетная схема, работы элементов рабочего оборудования роторных снегоочистителей, представляет собой схему, в которой снежная масса представлена элементом сплошной среды. Данный подход широко реализуется в исследованиях связанных с работой шнека. В этом случае теоретические исследования проводятся с использованием законов механики сплошной среды [17, 69, 95]. Данное направление дает достаточно адекватное

описание взаимодействия элементов рабочего оборудования со снежным массивом, особенно при его высокой плотности или на уплотненном снегу, особенно в связи с интенсивным развитием методов конечных элементов и возможностей их численного решения на ЭВМ. Так, в работе [155] исследуется взаимодействие колеса со снежным массивом. Что в свою очередь привело к развитию исследований по определению характеристик снежного массива и его поведению при различных нагрузках [101, 123, 125, 130, 131, 142, 154, 167]. На рисунке 2.8 представлены зависимости значений модуля Юнга и плотности снега при различных видах нагружений [142].

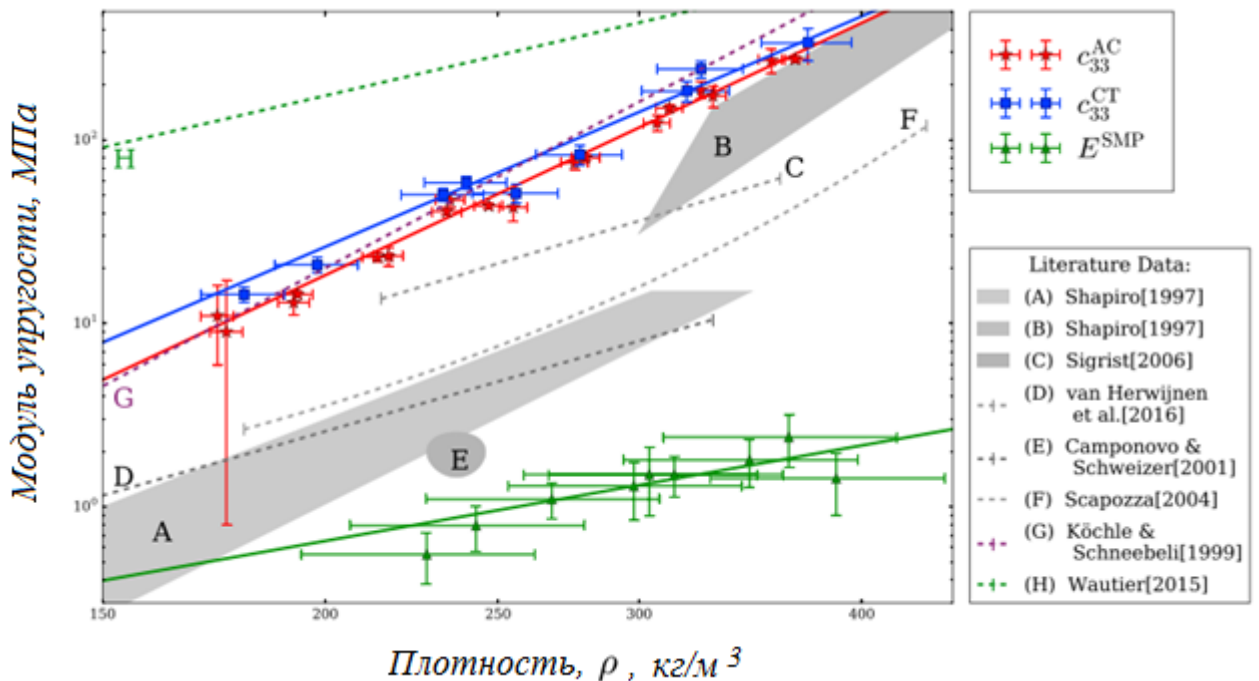


Рисунок 2.8 - Зависимость между модулем упругости и плотностью снега. Квадраты обозначают данные компьютерной томографии (CT), а треугольники и звезды обозначают данные, полученные от пенетрометрии снежной микроструктуры (SMP) и по измерениям распространения акустических волн (AC), соответственно. Функция степенного закона использовалась для получения подгонки упругого отношения модуля к плотности. Одноосное сжатие и модули экспериментов на растяжение (область A) и результаты динамических измерений (область B) взяты из Shapiro и другие. (1997). На экспериментальной основе данные взяты из Sigrist (2006) (прямая C), Van Herwijnen и другие. (2016) (прямая D), Camponovo и Schweizer (2001) (прямая E), Scapozza (2004) (прямая F), а подгонки на основе моделирования конечными элементами (FE) взяты из Köchle и Schneebeli (2014) (прямая G) и Wautier и другие. (2015) (прямая H)

Снег при определенных условиях может переходить из одного состояния в другое в результате различных воздействий, в том числе и механических, что сопровождается изменением в значительном диапазоне его характеристик [142]. В работе [93] исследованы модели разрушения льда, в которых лед представляет собой вязкоупругое тело с гексагональной кристаллической решеткой.

Использование ЭВМ позволило развить еще одно направление моделирования снежного массива, в котором снег представлен как совокупность взаимодействующих частиц конечного размера, так называемый, метод дискретных элементов [107, 145]. В работе [122] зависимости влияния шага и высоты ленты шнекового барабана на производительность и затраты мощности работы такого рабочего органа, при фиксированных кинематических характеристиках шнековых рабочих органов, получены с использованием данного метода [16]. Метод дискретных элементов применяется в исследованиях, благодаря своей наглядности и простоте аналитических выражений. Так, в работе [184] частицы снега рассматривались как сферы с одинаковыми диаметрами 0,015 мм и плотностью, $\rho = 250 \text{ кг/м}^3$ [17].

Для обеспечения адекватности и точности математических моделей, таких сложных явлений как снег, наряду с компьютерным моделированием, проводятся обширные экспериментальные исследования по определению его физико-механических свойств [103]. Для составления физически обоснованной модели и прогнозирования количества снега, попадающего в воздухозаборник автомобиля, в работе [115] проводились измерения размеров частиц снега в климатической аэродинамической трубе.

Особенно подробно рассматривается структура снега в изучении механизма образования лавин. В работе [168] модель снега на основе его микроструктуры была разработана и использована для изучения разрушения снега при смешанном режиме нагрузки. Так же в работе [156] определялась критическая длина трещины, необходимая для быстрого распространения сдвигового разрушения в снегу, который рассматривался как квазихрупкий материал.

В теоретической части данной работы учет взаимодействия снежных частиц, транспортируемой снежной массы, базируется на основе теории упругого контакта Герца [35, 182]. В работе [120] проведено исследование взаимодействие двух сфер по закону Герца (рисунок 2.9).

Согласно теории упругого контакта Герца выражение силы взаимодействия между i и j сферами, F_{ij} , имеет вид [120]:

$$F_{ij} = \frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{E}{1-\vartheta^2} \left(\frac{r_{ci} \cdot r_{cj}}{r_{ci} + r_{cj}} \right)^{1/2} (\Delta R_{ij})^{3/2}, \quad (2.10)$$

где E – модуль Юнга для снега; ϑ – коэффициент Пуассона для снега; r_{ci} – радиус i частицы; r_{cj} – радиус j частицы; ΔR_{ij} – изменение расстояния между центрами масс, взаимодействующих частиц в точке контакта.

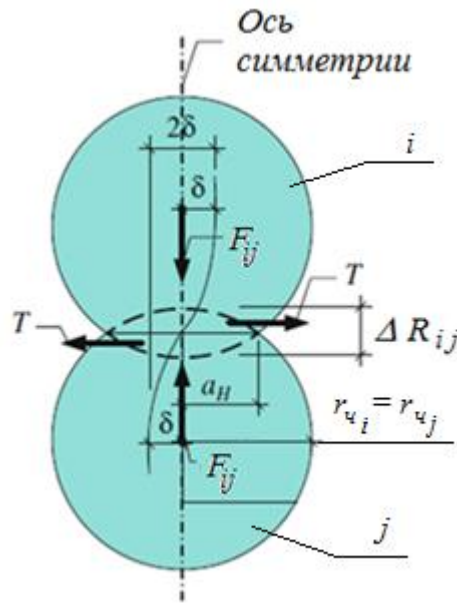


Рисунок 2.9 –Схема контактного взаимодействия двух идентичных упругих сфер

Для определения проекций силы контактного взаимодействия между частицами, F_{ij} , в системе координат связанной с элементом рабочего оборудования, используем известное выражение определения угла между двумя прямыми [23]:

$$\cos \alpha_{cij} = \frac{|x_{\phi i} x_{\phi j} + y_{\phi i} y_{\phi j} + z_{\phi i} z_{\phi j}|}{\sqrt{x_{\phi i}^2 + y_{\phi i}^2 + z_{\phi i}^2} \sqrt{x_{\phi j}^2 + y_{\phi j}^2 + z_{\phi j}^2}};$$

где $x_{\phi i}, x_{\phi j}, y_{\phi i}, y_{\phi j}, z_{\phi i}, z_{\phi j}$ – координаты направляющих векторов прямой проходящей через центры масс взаимодействующих частиц (см. рисунок 2.9), которая в системе координат $O_{\phi}X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$, имеет вид:

$$\frac{x_{\phi} - x_{\phi i}}{x_{\phi i} - x_{\phi j}} = \frac{y_{\phi} - y_{\phi i}}{y_{\phi i} - y_{\phi j}} = \frac{z_{\phi} - z_{\phi i}}{z_{\phi i} - z_{\phi j}}.$$

Соответственно, косинусы углов определяются по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \alpha_{\phi i j} = \frac{|x_{\phi i} - x_{\phi j}|}{\sqrt{(x_{\phi i} - x_{\phi j})^2 + (y_{\phi i} - y_{\phi j})^2 + (z_{\phi i} - z_{\phi j})^2}}; \\ \cos \beta_{\phi i j} = \frac{|y_{\phi i} - y_{\phi j}|}{\sqrt{(x_{\phi i} - x_{\phi j})^2 + (y_{\phi i} - y_{\phi j})^2 + (z_{\phi i} - z_{\phi j})^2}}; \\ \cos \gamma_{\phi i j} = \frac{|z_{\phi i} - z_{\phi j}|}{\sqrt{(x_{\phi i} - x_{\phi j})^2 + (y_{\phi i} - y_{\phi j})^2 + (z_{\phi i} - z_{\phi j})^2}}. \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Уравнения (2.10) и (2.11) позволяют однозначно определять проекции силы контактного взаимодействия между транспортируемыми снежными частицами в уравнениях математической модели работы РСО.

2.1.3. Уравнения динамики транспортирования снежной массы в питателе роторного снегоочистителя

При переходе от реальной конструкции питателя РСО к обобщенной расчетной схеме, приняты основные 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 ФРС, B .

На рисунке 2.10 представлена расчетная схема движения взаимодействующих снежных частиц в питателе ФРС. На ней показаны действующие силы на i частицу с учетом принятых допущений, j частица показана для лучшего понимания процесса работы элементов рабочего оборудования.

Для описания движения снежной частицы воспользуемся уравнением Лагранжа первого рода [18, 114]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i \cdot \ddot{x}_{\phi i} = X_u + \sum_{s=1}^k \lambda_s \frac{\partial f_s}{\partial x_{\phi}}; \\ m_i \cdot \ddot{y}_{\phi i} = Y_u + \sum_{s=1}^k \lambda_s \frac{\partial f_s}{\partial y_{\phi}}; \\ m_i \cdot \ddot{z}_{\phi i} = Z_u + \sum_{s=1}^k \lambda_s \frac{\partial f_s}{\partial z_{\phi}}, \end{array} \right. \quad (2.12)$$

где m_i – масса i снежной частицы; X_u , Y_u , Z_u – проекции равнодействующей активных сил, приложенных к i снежной частице; k – количество связей, наложенных на i снежную частицу; λ_s – множители Лагранжа [18].

Соответственно, для группы частиц получаем систему уравнений, включающую в себя систему, состоящую из трех уравнений движения для каждой частицы из группы. Общее количество уравнений движения, N_y , которые необходимо решить, составит:

$$N_y = 3 \cdot n_q.$$

На каждую из рассматриваемых снежных частиц в питателе роторного снегоочистителя действуют следующие активные силы и силы реакций связей (см. рисунок 2.10):

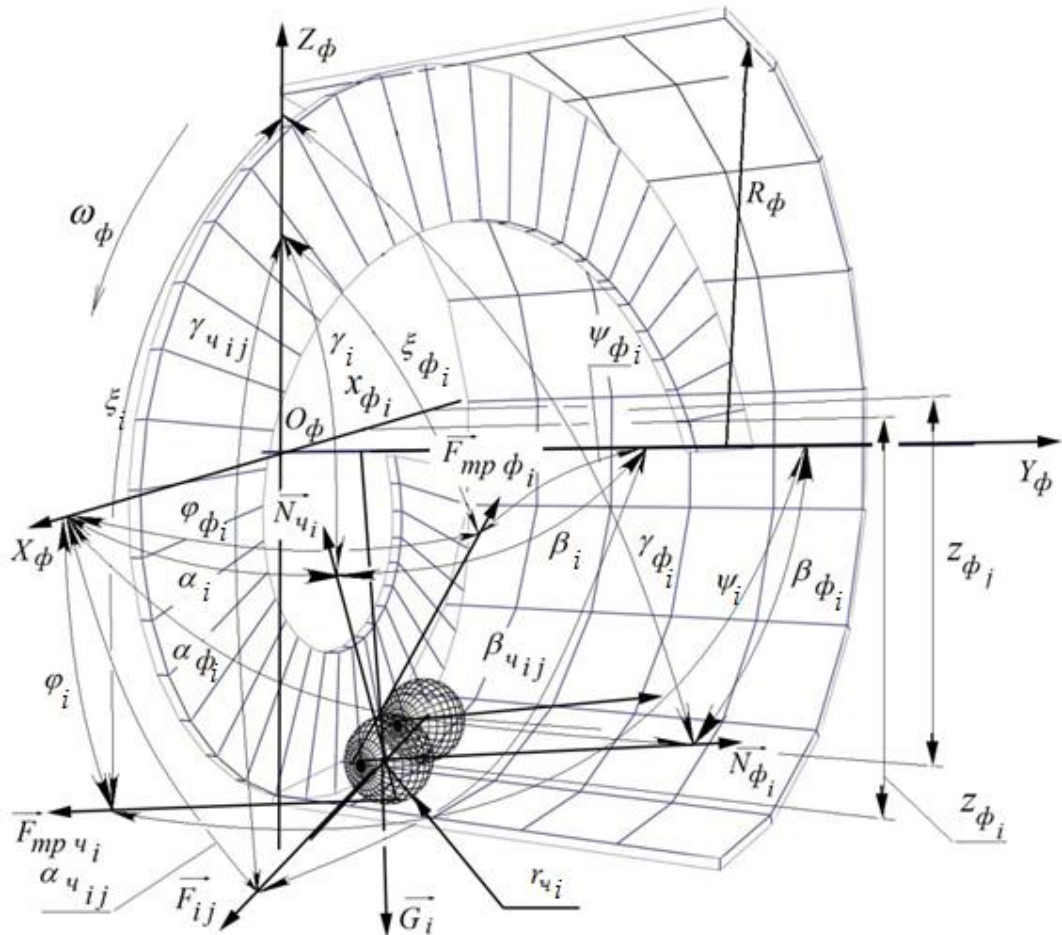


Рисунок 2.10 – Пространственная расчетная схема положения i снежной частицы и действующих сил на нее, при ее взаимодействии с лентой фрезы, где $N_{\phi i}$ - сила нормальной реакции поверхности фрезы; $\alpha_{\phi i}$, $\beta_{\phi i}$, $\gamma_{\phi i}$ - углы между направлением силы нормальной реакции $N_{\phi i}$ и осями координат $O X_{\phi}$, $O Y_{\phi}$, $O Z_{\phi}$, соответственно; $N_{\phi i}$ - сила нормальной реакции опорной поверхности; α_i , β_i , γ_i - углы между направлением силы нормальной реакции $N_{\phi i}$ и осями координат $O X_{\phi}$, $O Y_{\phi}$, $O Z_{\phi}$, соответственно; $F_{tr \phi i}$ - сила трения частицы об опорную поверхность; φ_i , ψ_i , ζ_i - углы между направлением касательной к траектории движения и осями координат $O X_{\phi}$, $O Y_{\phi}$, $O Z_{\phi}$, соответственно; $F_{tr \phi i}$ - сила трения частицы о поверхность ленты фрезы; $\varphi_{\phi i}$, $\psi_{\phi i}$, $\zeta_{\phi i}$ - углы между линией действия силы трения снежной частицы о поверхность ленты фрезы и осями координат $O X_{\phi}$, $O Y_{\phi}$, $O Z_{\phi}$, соответственно; \vec{G}_i - сила тяжести; F_{ij} - сила контактного взаимодействия снежных частиц между собой; α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij} - углы между линией действия силы контактного взаимодействия и осями координат $O X_{\phi}$, $O Y_{\phi}$, $O Z_{\phi}$

- сила нормальной реакции поверхности фрезы $N_{\phi i}$. Ее проекция на оси координат $OXYZ$ определяется углами $\alpha_{\phi i}$, $\beta_{\phi i}$, $\gamma_{\phi i}$, между направлением нормальной реакции $N_{\phi i}$ и осями координат. Для определения косинусов углов, определяющих направление нормальной реакции от поверхности ленты фрезы, $N_{\phi i}$, необходимо найти частные производные от, $f_{\phi}(x, y, z) = 0$, по второй формуле системы (2.2), которая в параметрическом виде записывается следующим образом:

$$\begin{cases} x_{\phi i}(t) = R_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t); \\ y_{\phi i}(t) = R_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \omega_{\phi} \cdot t; \\ z_{\phi i}(t) = R_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t), \end{cases} \quad (2.13)$$

в случае фрезы с постоянным шагом из (2.13):

$$\cos \alpha_{\phi i} = \frac{\frac{\partial f_{\phi}}{\partial x_{\phi i}}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_{\phi}}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\phi}}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\phi}}{\partial z_{\phi i}}\right)^2}} = -\frac{z_{\phi i}}{R_{\phi}} \cos \theta; \quad (2.14)$$

$$\cos \beta_{\phi i} = \frac{\frac{\partial f_{\phi}}{\partial y_{\phi i}}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_{\phi}}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\phi}}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\phi}}{\partial z_{\phi i}}\right)^2}} = \sin \theta; \quad (2.15)$$

$$\cos \gamma_{\phi i} = \frac{\frac{\partial f_{\phi}}{\partial z_{\phi i}}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_{\phi}}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\phi}}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\phi}}{\partial z_{\phi i}}\right)^2}} = \frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}} \cos \theta. \quad (2.16)$$

где $\frac{\partial f_{\phi}}{\partial x_{\phi i}}$, $\frac{\partial f_{\phi}}{\partial y_{\phi i}}$, $\frac{\partial f_{\phi}}{\partial z_{\phi i}}$ - частные производные уравнения поверхности ленты фрезы питателя (2.1) по координатам $x_{\phi i}$, $y_{\phi i}$, $z_{\phi i}$, соответственно.

$$\frac{\partial f_{\phi} / \partial x_{\phi i}}{\partial x_{\phi i} / \partial t} = -R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t),$$

или используя третье уравнение системы (2.13), получаем:

$$\frac{\partial f_{\phi} / \partial x_{\phi i}}{\partial x_{\phi i} / \partial t} = -z_{\phi i} \cdot \omega_{\phi}, \quad (2.17)$$

аналогично, находим оставшиеся частные производные:

$$\frac{\partial f_{\phi} / \partial y_{\phi i}}{\partial y_{\phi i} / \partial t} = R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial f_{\phi} / \partial z_{\phi i}}{\partial z_{\phi i} / \partial t} = x_{\phi i} \cdot \omega_{\phi}. \quad (2.19)$$

Знаменатель в выражениях (2.14) – (2.16), с учетом (2.17) – (2.19), имеет вид:

$$\begin{aligned} & \sqrt{\left(\frac{\partial f_{\phi} / \partial x_{\phi i}}{\partial x_{\phi i} / \partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\phi} / \partial y_{\phi i}}{\partial y_{\phi i} / \partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\phi} / \partial z_{\phi i}}{\partial z_{\phi i} / \partial t} \right)^2} = \\ & = \sqrt{\left(-z_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} \right)^2 + \left(R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta \right)^2 + \left(x_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} \right)^2} = \\ & = \omega_{\phi} \sqrt{z_{\phi i}^2 + R_{\phi}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \theta + x_{\phi i}^2} = \omega_{\phi} \sqrt{R_{\phi}^2 + R_{\phi}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \theta} = \frac{R_{\phi} \cdot \omega_{\phi}}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (2.20)$$

После подстановки (2.17), ..., (2.20) в выражениях (2.14) – (2.16), окончательно получаем, указанные косинусы углов $\alpha_{\phi i}$, $\beta_{\phi i}$, $\gamma_{\phi i}$, между направлением нормальной реакции $N_{\phi i}$ и осями координат.

$-N_{\phi i}$ – сила нормальной реакции опорной поверхности, направлена перпендикулярно ей (см. рисунок 2.10). Аналогично ее проекции на оси координат $OXYZ$ определяется углами α_i , β_i , γ_i . Косинусы углов направления проекций нормальной реакции $N_{\phi i}$, определяются из первого уравнения (2.2), для

случая цилиндрического основания, косинусы углов определяют направление нормальной реакции и определяются из известных соотношений [18]:

$$\cos \alpha_i = \frac{\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}\right)^2}} = \frac{x_{\phi i}}{R_\phi}; \quad (2.21)$$

$$\cos \beta_i = \frac{\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}\right)^2}} = 0; \quad (2.22)$$

$$\cos \gamma_i = \frac{\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}\right)^2}} = \frac{z_{\phi i}}{R_\phi}. \quad (2.23)$$

где $\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}$, $\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}$, $\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}$ - частные производные уравнения опорной поверхности питателя ФРС (1.2) по координатам положения i -ой частицы $x_{\phi i}$, $y_{\phi i}$, $z_{\phi i}$, соответственно. Все выражения компонентов, входящих в уравнения (2.21) – (2.23), представлены ниже в (2.24) – (2.27):

$$\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}} = 2 \cdot x_{\phi i}, \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}} = 0, \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}} = 2 \cdot z_{\phi i}, \quad (2.26)$$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}\right)^2} = 2 \cdot R_\phi. \quad (2.27)$$

- сила трения частицы об опорную поверхность F_{mpci} направлена по касательной к траектории движения. В общем виде направление силы трения определяется углами: $\varphi_i, \psi_i, \zeta_i$, которые являются углами между направлением касательной к траектории движения и осями координат $O_\phi X_\phi Y_\phi Z_\phi$ (см. рисунок 2.10), выражение силы трения в проекциях на оси координат имеет вид [18]:

$$F_{mpci}^X = f_\phi N_{ci} \cos \varphi_i; \quad (2.28)$$

$$F_{mpci}^Y = f_\phi N_{ci} \cos \psi_i; \quad (2.29)$$

$$F_{mpci}^Z = f_\phi N_{ci} \cos \zeta_i, \quad (2.30)$$

где f_ϕ – коэффициент трения снежной частицы о поверхность отвала.

Косинусы углов, $\varphi_i, \psi_i, \zeta_i$, определяются следующими зависимостями:

$$\cos \varphi_i = \frac{\dot{x}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}; \quad (2.31)$$

$$\cos \psi_i = \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}; \quad (2.32)$$

$$\cos \zeta_i = \frac{\dot{z}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}; \quad (2.33)$$

- для силы трения частицы о поверхность ленты фрезы, F_{mpfi} , направление действия силы трения снежной частицы о поверхность ленты фрезы определяется углами: $\varphi_{fi}, \psi_{fi}, \zeta_{fi}$. Выражение, F_{mpfi} , в проекциях на оси принятой системы координат имеет аналогичный вид, как (2.14) – (2.16):

$$F_{mpf}^X = f_\phi N_\phi \cos \varphi_{fi}; \quad (2.34)$$

$$F_{mpf}^Y = f_\phi N_\phi \cos \psi_{fi}; \quad (2.35)$$

$$F_{mpf}^Z = f_\phi N_\phi \cos \zeta_{fi}, \quad (2.36)$$

где f_ϕ – коэффициент трения снежной частицы о ленты фрезы. Значения косинусов углов $\varphi_{\phi i}$, $\psi_{\phi i}$, $\zeta_{\phi i}$ определяются из факта обратной пропорциональной зависимости угловых коэффициентов нормали и касательной:

$$\cos \varphi_{\phi i} = \frac{z_{\phi i}}{R_\phi} \cdot \sin \theta; \quad (2.37)$$

$$\cos \psi_{\phi i} = \cos \theta; \quad (2.38)$$

$$\cos \zeta_{\phi i} = \frac{x_{\phi i}}{R_\phi} \cdot \sin \theta; \quad (2.39)$$

- сила тяжести, G_i :

$$G_i = m_i \cdot g, \quad (2.40)$$

где $g = 9,78 \text{ м/с}^2$.

- проекции силы контактного взаимодействия снежных частиц, F_{ij} , могут быть найдены с учетом уравнений (2.10) и значений углов (2.11), соответственно уравнения проекций сил контактного взаимодействия в принятой системе координат будут описываться уравнениями:

$$F_{ij}^X = \frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{E}{1-g^2} \left(\frac{r_i \cdot r_j}{r_i + r_j} \right)^{1/2} (\Delta R_{ij})^{3/2} \cdot \cos \alpha_{cij}; \quad (2.41)$$

$$F_{ij}^Y = \frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{E}{1-g^2} \left(\frac{r_i \cdot r_j}{r_i + r_j} \right)^{1/2} (\Delta R_{ij})^{3/2} \cdot \cos \beta_{cij}; \quad (2.42)$$

$$F_{ij}^Z = \frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{E}{1-g^2} \left(\frac{r_i \cdot r_j}{r_i + r_j} \right)^{1/2} (\Delta R_{ij})^{3/2} \cdot \cos \gamma_{cij}. \quad (2.43)$$

Выражения множителей Лагранжа, λ_j , для определения нормальных реакций имеют вид:

$$\lambda_u = \frac{N_{\phi i} / m_i}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}\right)^2}}; \quad (2.44)$$

$$\lambda_\phi = \frac{N_{\phi i} / m_i}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_\phi}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial z_{\phi i}}\right)^2}}. \quad (2.45)$$

Таким образом, динамика транспортирования снежных частиц будет описываться системой уравнений:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{\phi i} - \omega_\phi^2 \cdot x_{\phi i} - 2 \cdot \omega_\phi \cdot \dot{z}_{\phi i} - \lambda_\phi \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial x_{\phi i}} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_\phi}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial z_{\phi i}}\right)^2} \cos \varphi_{\phi i} \right) - \\ - \lambda_u \left(\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}} + f_u \sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}\right)^2} \cos \varphi_i \right) - \frac{F_{ij}^X}{m_i} = 0, \quad (2.46) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{\phi i} - \lambda_\phi \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial z_{\phi i}} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_\phi}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial z_{\phi i}}\right)^2} \cos \psi_{\phi i} \right) - \\ - \lambda_u \left(\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}} + f_u \sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}\right)^2} \cos \psi_i \right) - \frac{F_{iy}^Y}{m_i} = 0; \quad (2.47) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}_u - \omega_\phi^2 \cdot z_{\phi i} - 2 \cdot \omega_\phi \cdot \dot{x}_{\phi i} - \lambda_\phi \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial z_{\phi i}} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_\phi}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_\phi}{\partial z_{\phi i}}\right)^2} \cos \zeta_{\phi i} \right) - \\ - \lambda_u \left(\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}} + f_u \sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y_{\phi i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z_{\phi i}}\right)^2} \cos \zeta_i \right) + g - \frac{F_{ij}^Z}{m_i} = 0. \quad (2.48) \end{aligned}$$

Произведем подстановку полученных выражений:

$$\begin{aligned}
& \ddot{x}_{\phi i} - \varpi_{\phi}^2 \cdot x_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{z}_{\phi i} - \lambda_{\phi} \left(z_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} + f_{\phi} \cdot \frac{R_{\phi} \cdot \omega_{\phi}}{\cos \theta} \cdot \frac{z_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \sin \theta \right) - \\
& - \lambda_{\phi} \left(2 \cdot x_{\phi i} + 2 f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{x}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right) - \frac{F_{ij}^X}{m_i} = 0; \\
& \ddot{y}_{\phi i} - \lambda_{\phi} \left(R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta + f_{\phi} \cdot \frac{R_{\phi} \cdot \omega_{\phi}}{\cos \theta} \cdot \cos \theta \right) - \\
& - \lambda_{\phi} \left(0 + 2 f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right) - \frac{F_{iy}^Y}{m_i} = 0; \\
& \ddot{z}_{\phi i} - \varpi_{\phi}^2 \cdot z_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} - \lambda_{\phi} \left(x_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} + f_{\phi} \cdot \frac{R_{\phi} \cdot \omega_{\phi}}{\cos \theta} \cdot \frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \sin \theta \right) - \\
& - \lambda_{\phi} \left(2 \cdot z_{\phi i} + 2 f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right) + g - \frac{F_{ij}^Z}{m_i} = 0,
\end{aligned}$$

ИЛИ

$$\begin{aligned}
& \ddot{x}_{\phi i} - \varpi_{\phi}^2 \cdot x_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{z}_{\phi i} - \lambda_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot z_{\phi i} \cdot (1 + f_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta) - \\
& - \lambda_{\phi} \left(2 \cdot x_{\phi i} + 2 f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{x}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right) - \frac{F_{ij}^X}{m_i} = 0; \tag{2.49}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{y}_{\phi i} - \lambda_{\phi} R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot (\operatorname{tg} \theta + f_{\phi}) - \lambda_{\phi} \left(2 f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right) - \frac{F_{iy}^Y}{m_i} = 0; \tag{2.50}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{z}_{\phi i} - \varpi_{\phi}^2 \cdot z_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} - \lambda_{\phi} \cdot x_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} (1 + f_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta) - \\
& - \lambda_{\phi} \left(2 \cdot z_{\phi i} + 2 f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right) + g - \frac{F_{ij}^Z}{m_i} = 0. \tag{2.51}
\end{aligned}$$

Каждая частица в питателе движется с учетом наличия связей между ней и элементами питателя роторного снегоочистителя. Эти связи являются неудерживающими. Для случая принятия допущения об отсутствии качения снежной частицы по поверхностям элементов питателя роторного снегоочистителя, то и неголономными. Уравнения связей для рассматриваемой конструкции роторного снегоочистителя описываются системой уравнений (2.2), где первое уравнение – это условие безотрывного движения по поверхности отвала, а второе уравнение соответствует условию безотрывного движения снежной частицы по ленте фрезы.

Для определения значений сил нормальных реакций найдем вторую производную по времени уравнения основания (отвала питателя) и винтовой линии:

Для случая цилиндрической поверхности:

$$x_{\phi i}^2 - R_{\phi}^2 = -z_{\phi i}^2. \quad (2.52)$$

Находим полные производные по времени, t , выражения (2.52):

$$x_{\phi i} \cdot \dot{x}_{\phi i} = -z_{\phi i} \cdot \dot{z}_{\phi i}, \quad (2.53)$$

или

$$\frac{x_{\phi i}}{z_{\phi i}} \dot{x}_{\phi i} = -\dot{z}_{\phi i}, \quad (2.54)$$

и

$$\dot{x}_{\phi i}^2 + x_{\phi i} \cdot \ddot{x}_{\phi i} = -\dot{z}_{\phi i}^2 - z_{\phi i} \cdot \ddot{z}_{\phi i}. \quad (2.55)$$

После подстановки (2.54) в (2.55) получаем:

$$\frac{1}{z_{\phi i}} \cdot \dot{x}_{\phi i}^2 + \frac{x_{\phi i}}{z_{\phi i}} \ddot{x}_{\phi i} + \frac{1}{z_{\phi i}} \cdot \frac{x_{\phi i}^2}{z_{\phi i}^2} \dot{x}_{\phi i}^2 = -\ddot{z}_{\phi i}. \quad (2.56)$$

Для уравнения винтовой линии, вторая производная по времени имеет вид:

$$\frac{\operatorname{tg} \theta}{R_{\phi}} (\ddot{z}_{\phi i} \cdot x_{\phi i} - \ddot{x}_{\phi i} \cdot z_{\phi i}) = \ddot{y}_{\phi i}. \quad (2.57)$$

Таким образом, получена система из пяти дифференциальных уравнений второго порядка с пятью неизвестными:

$$\ddot{x}_{\phi i} - \omega_{\phi}^2 \cdot x_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{z}_{\phi i} - \lambda_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot z_{\phi i} \cdot (1 + f_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta) - \lambda_u \left(2 \cdot x_{\phi i} + 2 f_u \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{x}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right) - \frac{F_{ij}^X}{m_i} = 0; \quad (2.58)$$

$$\ddot{y}_{\phi i} - \lambda_{\phi} R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot (\operatorname{tg} \theta + f_{\phi}) - \lambda_u \left(2 f_u \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right) - \frac{F_{iy}^Y}{m_i} = 0; \quad (2.59)$$

$$\ddot{z}_{\phi i} - \omega_{\phi}^2 \cdot z_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} - \lambda_{\phi} \cdot x_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} (1 + f_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta) - \lambda_u \left(2 \cdot z_{\phi i} + 2 f_u \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right) - g - \frac{F_{ij}^Z}{m_i} = 0; \quad (2.60)$$

$$\frac{1}{z_{\phi i}} \cdot \dot{x}_{\phi i}^2 + \frac{x_{\phi i}}{z_{\phi i}} \cdot \ddot{x}_{\phi i} - \frac{x_{\phi i}}{z_{\phi i}} \cdot \frac{x_{\phi i}}{z_{\phi i}} \cdot \dot{x}_{\phi i}^2 = \ddot{z}_{\phi i};$$

$$\frac{\operatorname{tg} \theta}{R_{\phi}} (\ddot{z}_{\phi i} \cdot x_{\phi i} - \ddot{x}_{\phi i} \cdot z_{\phi i}) = \ddot{y}_{\phi i}.$$

В полученные выражения (2.58)...(2.60) необходимо подставить уравнения движения (2.49) и разрешить их относительно λ_u , λ_{ϕ} . Для упрощения преобразований вводим следующие обозначения:

$$B_x = 2 \cdot x_{\phi i} + 2 f_u \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{x}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}, \quad (2.61)$$

$$B_y = 2 f_u \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}, \quad (2.62)$$

$$B_z = 2 \cdot z_{\phi i} + 2 f_u \cdot R_{\phi} \cdot \frac{\dot{z}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}, \quad (2.63)$$

$$A_x = \omega_\phi \cdot z_{\phi i} \cdot (1 + f_\phi \cdot \operatorname{tg} \theta), \quad (2.64)$$

$$A_y = R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot (\operatorname{tg} \theta + f_\phi), \quad (2.65)$$

$$A_z = x_{\phi i} \cdot \omega_\phi \cdot (1 + f_\phi \cdot \operatorname{tg} \theta). \quad (2.66)$$

с учетом принятых обозначений, уравнения (2.58), (2.59), (2.60), примут вид:

$$\ddot{x}_{\phi i} = \omega_\phi^2 \cdot x_{\phi i} + 2 \cdot \omega_\phi \cdot \dot{z}_{\phi i} + \lambda_u \cdot B_x + \lambda_\phi \cdot A_x + \frac{F_{ij}^X}{m_i}, \quad (2.67)$$

$$\ddot{y}_{\phi i} = \lambda_u \cdot B_y + \lambda_\phi \cdot A_y + \frac{F_{ij}^Y}{m_i}, \quad (2.68)$$

$$\ddot{z}_{\phi i} = \omega_\phi^2 \cdot z_{\phi i} + 2 \cdot \omega_\phi \cdot \dot{x}_{\phi i} + \lambda_u \cdot B_z + \lambda_\phi \cdot A_z - g + \frac{F_{ij}^Z}{m_i}. \quad (2.69)$$

Уравнения нормальных реакций с учетом взаимодействия частиц, транспортируемых фрезой питателя ФРС имеют, вид:

$$\begin{aligned} \frac{N_{\phi i}}{m_i} = & \frac{R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot \operatorname{tg} \theta}{\cos \theta \cdot M_2 \cdot R_\phi} \times \\ & \times \left(2 \cdot \omega_\phi \cdot (\dot{x}_{\phi i} \cdot x_{\phi i} - \dot{z}_{\phi i} \cdot z_{\phi i}) - x_{\phi i} \cdot g - \frac{F_{i,j}^z}{m_i} \cdot x_{\phi i} + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot z_{\phi i} \right) + \\ & + \frac{R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot F_{i,j}^y}{\cos \theta \cdot M_2 \cdot m_i} - \frac{R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot N_{\phi i} \cdot N_2}{\cos \theta \cdot m_i \cdot M_2}, \end{aligned} \quad (2.70)$$

$$\begin{aligned}
\frac{N_{\phi i}}{m_i} = & \left[\frac{F_{i,j}^y}{m_i} \cdot \frac{M_1}{M_2} + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot \left(x_{\phi i} - \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \theta}{R_{\phi}} \cdot z_{\phi i} \right) + \frac{F_{i,j}^z}{m_i} \cdot \left(z_{\phi i} + \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \theta}{R_{\phi}} \cdot x_{\phi i} \right) \right] \\
& + g \left(z_{\phi i} + \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \theta}{R_{\phi}} \cdot x_{\phi i} \right) - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \left(\dot{x}_{\phi i} \cdot x_{\phi i} - \dot{z}_{\phi i} \cdot z_{\phi i} \right) \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \theta}{R_{\phi}} + \\
& + \left(\dot{x}_{\phi i} \cdot z_{\phi i} + \dot{z}_{\phi i} \cdot x_{\phi i} \right) - 2 \cdot \omega_{\phi}^2 \cdot R_{\phi}^2 - \dot{x}_{\phi i}^2 - \dot{z}_{\phi i}^2 \cdot \frac{2 \cdot R_{\phi}}{N_1 - N_2 \cdot \frac{M_1}{M_2}} \quad , (2.71)
\end{aligned}$$

где

$$M_1 = x_{\phi i} \cdot A_x + A_z \cdot z_{\phi i},$$

$$N_1 = x_{\phi i} \cdot B_x + B_z \cdot z_{\phi i},$$

$$M_2 = A_y + \frac{\operatorname{tg}(\theta)}{R_{\phi}} \left(A_x \cdot z_{\phi i} - A_z \cdot x_{\phi i} \right),$$

$$N_2 = B_y + \frac{\operatorname{tg}(\theta)}{R_{\phi}} \left(B_x \cdot z_{\phi i} - B_z \cdot x_{\phi i} \right).$$

Достоинством описанной математической модели является относительно простая ее адаптация под кинематические особенности движения элементов рабочих органов формирующих образ роторного снегоочистителя. Так же она позволяет учитывать особенности движения снежных частиц в процессе их транспортирования рабочим органом.

В таблице 2.1 представлены основные соотношения, используемые при выводе уравнений работы рабочего органа роторного снегоочистителя с винтовым элементом, совершающего вращение вокруг поперечной оси, а так же аналогичные соотношения при его вертикальной ориентации и вращении вокруг вертикальной оси.

Анализ скоростной видеосъемки работы фрезы питателя РСО показал возможные варианты движения транспортируемой снежной массы при взаимодействии с элементами рабочего оборудования:

Продолжение таблицы 2.1

1	2
$x_{\phi i}^2 - (R_{\phi} - r_{\psi i})^2 = z_{\phi i}^2$	$x_{\phi i}^2 - (R_{\phi} - r_{\psi i})^2 = y_{\phi i}^2$
<p>Уравнения, описывающие фрезу питателя:</p> $\begin{cases} x_{\phi i} = R_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t); \\ y_{\phi i} = R_{\phi} \cdot \operatorname{tg}\theta \cdot \omega_{\phi} \cdot t; \\ z_{\phi i} = R_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t). \end{cases}$	$\begin{cases} x_{\phi i} = R_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t); \\ y_{\phi i} = R_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t); \\ z_{\phi i} = R_{\phi} \cdot \operatorname{tg}\theta \cdot \omega_{\phi} \cdot t. \end{cases}$
Проекция силы нормальной реакции от основания:	
$\begin{aligned} \ddot{x}_{\phi i} + \omega^2 \cdot x_{\phi i} + 2 \cdot \omega \cdot \dot{x}_{\phi i} &= Q_x \\ z_{\phi i} - \omega^2 \cdot z_{\phi i} - 2 \cdot \omega \cdot \dot{z}_{\phi i} &= Q_z \\ y_{\phi i} &= Q_y \end{aligned}$	$\begin{aligned} \ddot{x}_{\phi i} + \omega^2 \cdot x_{\phi i} + 2 \cdot \omega \cdot \dot{x}_{\phi i} &= Q_x \\ \ddot{y}_{\phi i} + \omega^2 \cdot y_{\phi i} + 2 \cdot \omega \cdot \dot{y}_{\phi i} &= Q_y \\ z_{\phi i} &= Q_z \end{aligned}$
Обобщенные силы:	
$\begin{aligned} Q_x &= N_{\phi i}(\cos\alpha_{\phi} + f_{\text{тр}\phi} \cos\varphi_{\phi i}) + N_{\psi i}(\cos\alpha + f_{\text{тр}\psi} \cos\varphi) + \\ &+ F_{ij}^x \\ Q_y &= N_{\phi i}(\cos\beta_{\phi} + f_{\text{тр}\phi} \cos\psi_{\phi i}) + N_{\psi i}(\cos\beta + f_{\text{тр}\psi} \cos\psi) + \\ &+ F_{ij}^y \\ Q_z &= N_{\phi i}(\cos\gamma_{\phi} + f_{\text{тр}\phi} \cos\zeta_{\phi i}) + N_{\psi i}(\cos\gamma + f_{\text{тр}\psi} \cos\zeta) + \\ &+ m_{\psi i} \cdot g + F_{ij}^z \end{aligned}$	$\begin{aligned} Q_x &= N_{\phi i}(\cos\alpha_{\phi} + f_{\text{тр}\phi} \cos\varphi_{\phi i}) + N_{\psi i}(\cos\alpha + f_{\text{тр}\psi} \cos\varphi) + \\ &+ F_{ij}^x \\ Q_y &= N_{\phi i}(\cos\beta_{\phi} + f_{\text{тр}\phi} \cos\psi_{\phi i}) + N_{\psi i}(\cos\beta + f_{\text{тр}\psi} \cos\psi) + \\ &+ F_{ij}^y \\ Q_z &= N_{\phi i}(\cos\gamma_{\phi} + f_{\text{тр}\phi} \cos\zeta_{\phi i}) + N_{\psi i}(\cos\gamma + f_{\text{тр}\psi} \cos\zeta) + \\ &+ m_{\psi i} \cdot g + F_{ij}^z \end{aligned}$

Продолжение таблицы 2.1

1	2
Направляющие косинусы опорной поверхности: $\cos \alpha = \frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}}$ $\cos \beta = 0$ $\cos \gamma = \frac{z_{\phi i}}{R_{\phi}}$	$\cos \alpha = \frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}}$ $\cos \beta = \frac{y_{\phi i}}{R_{\phi}}$ $\cos \gamma = 0$
Направляющие косинусы, определяющие направление вектора силы $\cos \alpha_{\phi} = \frac{z_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \cos \theta$ $\cos \beta_{\phi} = \sin \theta$ $\cos \gamma_{\phi} = \frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \cos \theta$	нормальная реакция от поверхности ленты фрезы [18]: $\cos \alpha_{\phi} = \frac{y_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \cos \theta$ $\cos \beta_{\phi} = \frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \cos \theta$ $\cos \gamma_{\phi} = \sin \theta$
Направляющие косинусы, определяющие направление вектора силы $\cos \varphi_{\phi i} = \frac{z_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \sin \theta$ $\cos \psi_{\phi i} = \cos \theta$ $\cos \zeta_{\phi i} = \frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \sin \theta$	трения нормальной реакции от поверхности ленты фрезы: $\cos \varphi_{\phi i} = \frac{y_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \sin \theta$ $\cos \psi_{\phi i} = \frac{x_{\phi i}}{R_{\phi}} \cdot \sin \theta$ $\cos \zeta_{\phi i} = \cos \theta$

Продолжение таблицы 2.1

1	2
<p>Дополнительные обозначения:</p> $A_x = \omega_{\phi} \cdot z_{\phi i} \cdot (1 + f_{\phi} \cdot tg\theta)$ $A_y = R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot (tg\theta + f_{\phi})$ $A_z = x_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} \cdot (1 + f_{\phi} \cdot tg\theta)$ $B_x = 2 \cdot x_{\phi i} + 2f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{x_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}$ $B_y = 2f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{y_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}$ $B_z = 2 \cdot z_{\phi i} + 2f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{z_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}$	$A_x = \omega_{\phi} \cdot y_{\phi i} \cdot (1 + f_{\phi} \cdot tg\theta)$ $A_y = x_{\phi i} \cdot \omega_{\phi} \cdot (1 - f_{\phi} \cdot tg\theta)$ $A_z = R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot (tg\theta + f_{\phi})$ $B_x = 2 \cdot x_{\phi i} + 2f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{x_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}$ $B_y = 2 \cdot y_{\phi i} + 2f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{y_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}$ $B_z = 2f_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \frac{z_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}$
<p>Уравнения движения:</p> $\ddot{x}_{ce} = \lambda_{\phi} A_x + \lambda_{\psi} B_x + \omega^2 x_{ce} + 2\omega \cdot \dot{y}_{ce} - \frac{F_{ij}^x}{m_i},$ $\ddot{y}_{ce} = \lambda_{\phi} A_y + \lambda_{\psi} B_y + \omega^2 y_{ce} + 2\omega \cdot \dot{x}_{ce} - \frac{F_{ij}^y}{m_i},$ $\ddot{z}_{ce} = \lambda_{\phi} A_z + \lambda_{\psi} B_z - g - \frac{F_{ij}^z}{m_i}.$	$\ddot{x}_{ce} = \lambda_{\phi} A_x + \lambda_{\psi} B_x + \omega^2 x_{ce} + 2\omega \cdot \dot{y}_{ce} - \frac{F_{ij}^x}{m_i},$ $\ddot{y}_{ce} = \lambda_{\phi} A_y + \lambda_{\psi} B_y + \omega^2 y_{ce} + 2\omega \cdot \dot{x}_{ce} - \frac{F_{ij}^y}{m_i},$ $\ddot{z}_{ce} = \lambda_{\phi} A_z + \lambda_{\psi} B_z + \lambda_{\psi} B_z - g - \frac{F_{ij}^z}{m_i}.$

Продолжение таблицы 2.1

1	2
<p>Произвольные по времени уравнения связи:</p> $\dot{x}_{\phi i}^2 + x_{\phi i} \cdot \ddot{x}_{\phi i} - \dot{z}_{\phi i}^2 - z_{\phi i} \cdot \ddot{z}_{\phi i} = -\dot{y}_{\phi i}^2 - y_{\phi i} \cdot \ddot{y}_{\phi i}$ $\frac{tg\theta}{R_{\phi}} (\ddot{z}_{\phi i} \cdot x_{\phi i} - \dot{x}_{\phi i} \cdot \dot{z}_{\phi i}) = \dot{y}_{\phi i}$	$\dot{x}_{\phi i}^2 + x_{\phi i} \cdot \ddot{x}_{\phi i} = -\dot{y}_{\phi i}^2 - y_{\phi i} \cdot \ddot{y}_{\phi i}$ $\frac{tg\theta}{R_{\phi}} (\dot{y}_{\phi i} \cdot x_{\phi i} - \dot{x}_{\phi i} \cdot y_{\phi i}) = \ddot{z}_{\phi i}$
<p>Дополнительные обозначения:</p> $M_1 = x_{\phi i} \cdot A_x + A_z \cdot z_{\phi i}$ $N_1 = x_{\phi i} \cdot B_x + B_z \cdot z_{\phi i}$ $M_2 = A_y + \frac{tg(\theta)}{R_{\phi}} (A_x \cdot z_{\phi i} - A_z \cdot x_{\phi i})$ $N_2 = B_y + \frac{tg(\theta)}{R_{\phi}} (B_x \cdot z_{\phi i} - B_z \cdot x_{\phi i})$	$M_1 = x_{\phi i} \cdot A_x + A_y \cdot y_{\phi i}$ $N_1 = x_{\phi i} \cdot B_x + B_y \cdot y_{\phi i}$ $M_2 = A_z + \frac{tg(\theta)}{R_{\phi}} (A_x \cdot y_{\phi i} - A_y \cdot x_{\phi i})$ $N_2 = B_z + \frac{tg(\theta)}{R_{\phi}} (B_x \cdot y_{\phi i} - B_y \cdot x_{\phi i})$

Продолжение таблицы 2.1

1	2
<p>После подстановки уравнений движения</p> $\begin{aligned} \dot{\lambda}_{\phi} M_1 + \dot{\lambda}_{\psi} N_1 = & -\omega_{\phi}^2 R_{\phi}^2 + z \dot{\phi}_i \cdot g - \dot{\lambda}_{\phi}^2 - z^2 \dot{\phi}_i - \\ & - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \left(x \dot{\phi}_i \cdot z \dot{\phi}_i + z \dot{\phi}_i \cdot x \dot{\phi}_i \right) + \\ & + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot x \dot{\phi}_i - \frac{F_{i,j}^z}{m_i} \cdot z \dot{\phi}_i \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{\phi} M_1 + \dot{\lambda}_{\psi} N_1 = & -\omega_{\phi}^2 R_{\phi}^2 - x \dot{\phi}_i^2 - y \dot{\phi}_i^2 - \\ & - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \left(x \dot{\phi}_i \cdot y \dot{\phi}_i + y \dot{\phi}_i \cdot x \dot{\phi}_i \right) + \\ & + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot x \dot{\phi}_i - \frac{F_{i,j}^y}{m_i} \cdot y \dot{\phi}_i \end{aligned}$
$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{\phi} M_2 + \dot{\lambda}_{\psi} N_2 = & \frac{F_{i,j}^y}{m_i} + \\ & + \frac{ig\theta}{R_{\phi}} (2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \left(x \dot{\phi}_i \cdot x \dot{\phi}_i - z \dot{\phi}_i \cdot z \dot{\phi}_i \right) - x \dot{\phi}_i \cdot g + \\ & + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot z \dot{\phi}_i - \frac{F_{i,j}^z}{m_i} \cdot x \dot{\phi}_i) \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{\phi} M_2 + \dot{\lambda}_{\psi} N_2 = & g - \frac{F_{i,j}^z}{m_i} + \\ & + \frac{ig\theta}{R_{\phi}} (2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \left(x \dot{\phi}_i \cdot x \dot{\phi}_i - y \dot{\phi}_i \cdot y \dot{\phi}_i \right) + \\ & + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot y \dot{\phi}_i - \frac{F_{i,j}^y}{m_i} \cdot x \dot{\phi}_i) \end{aligned}$

Окончание таблицы 2.1

1	2
<p>Выражаем λ_ϕ</p> $\lambda_\phi = \frac{tg\theta}{M_2 \cdot R_\phi} \times$ $\times \left[2 \cdot \omega_\phi \cdot \left(\dot{x}_\phi \cdot x_\phi - \dot{z}_\phi \cdot z_\phi \right) - x_\phi \cdot g - \frac{F_{i,j}^z}{m_i} \cdot x_\phi + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot z_\phi \right] +$ $+ \frac{F_{i,j}^y}{M_2 \cdot m_i} \cdot \lambda_{\psi} \frac{N_2}{M_2}$	$\lambda_\phi = \frac{g}{M_2} + \frac{tg\theta}{M_2 \cdot R_\phi} \times$ $\times \left[2 \cdot \omega_\phi \cdot \left(\dot{x}_\phi \cdot x_\phi - \dot{y}_\phi \cdot y_\phi \right) - x_\phi \cdot g - \frac{F_{i,j}^y}{m_i} \cdot x_\phi + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot y_\phi \right] +$ $+ \frac{F_{i,j}^z}{M_2 \cdot m_i} \cdot \lambda_{\psi} \frac{N_2}{M_2}$
<p>Выражаем λ_ψ</p> $\lambda_\psi \left[N_1 - N_2 \cdot \frac{M_1}{M_2} \right] = \left[\frac{F_{i,j}^y}{m_i} \cdot \frac{M_1}{M_2} + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot x \right.$ $\times \left(x_{e^i} - \frac{M_i}{M_j} \cdot \frac{tg\theta}{R_\phi} \cdot z_{e^i} \right) +$ $+ \frac{F_{i,j}^z}{m_i} \cdot \left(z_{e^i} + \frac{M_i}{M_j} \cdot \frac{tg\theta}{R_\phi} \cdot x_{e^i} \right) + g \cdot z_\phi + \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{tg\theta}{R_\phi} \cdot x_\phi \right] -$ $- 2 \cdot \omega_\phi \cdot \left(\left(\dot{x}_\phi \cdot x_\phi - \dot{z}_\phi \cdot z_\phi \right) \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{tg\theta}{R_\phi} + \right.$ $\left. + \left(\dot{x}_\phi \cdot z_\phi + z_\phi \cdot x_\phi \right) \right] - 2 \cdot \omega_\phi^2 \cdot R_\phi^2 \cdot x_\phi^2 - \dot{x}_\phi^2 - z_\phi^2$	$\lambda_\psi \left[N_1 - N_2 \cdot \frac{M_1}{M_2} \right] = \left[\frac{F_{i,j}^z}{m_i} \cdot \frac{M_1}{M_2} + \frac{F_{i,j}^x}{m_i} \cdot x \right.$ $\times \left(x_{e^i} - \frac{M_i}{M_j} \cdot \frac{tg\theta}{R_\phi} \cdot y_{e^i} \right) +$ $+ \frac{F_{i,j}^y}{m_i} \cdot \left(y_{e^i} + \frac{M_i}{M_j} \cdot \frac{tg\theta}{R_\phi} \cdot x_{e^i} \right) + g \cdot \frac{M_i}{M_j} -$ $- 2 \cdot \omega_\phi \cdot \left(\left(\dot{x}_\phi \cdot x_\phi - \dot{y}_\phi \cdot y_\phi \right) \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{tg\theta}{R_\phi} + \right.$ $\left. + \left(\dot{x}_\phi \cdot y_\phi + y_\phi \cdot x_\phi \right) \right] - 2 \cdot \omega_\phi^2 \cdot R_\phi^2 \cdot x_\phi^2 - \dot{x}_\phi^2 - y_\phi^2$

- движение по поверхностям отвала и ленты фрезы одновременно (рисунок 2.11). Такой вариант движения однозначно описывается системой уравнений (2.12) и уравнениями (2.70), (2.71), для случая вращения геликоида (фрезы питателя ФРС) вокруг своей оси в продольной плоскости;

- движение по поверхности отвала. В этом случае, применительно к фреze питателя ФРС, Сила нормальной реакции поверхности ленты фрезы равна нулю, $N_{\phi}=0$, и в системе (2.12) будут отсутствовать слагаемые (2.14) – (2.18). Уравнение (2.70) будет равно нулю, а уравнение (2.71) примет вид:

$$\frac{N_{ci}}{m_i} = -\frac{2 \cdot R_{\phi}}{B_x \cdot x_{\phi i} - B_z \cdot z_{\phi i}} \left(z_{\phi i} \cdot \dot{z}_{\phi i} - x_{\phi i} \cdot \dot{x}_{\phi i} - g \cdot z_{\phi i} + \frac{F_{i,j}^z \cdot z_{\phi i} - F_{i,j}^x \cdot x_{\phi i}}{m_i} \right). \quad (2.72)$$



Рисунок 2.11 – Скольжение снежных частиц по поверхности отвала и ленты фрезы питателя ФРС

- свободный полет снежной частицы (рисунок 2.12). В таком случае группа уравнений (2.11), (2.22), (2.23) сводится к тривиальному случаю: полету частицы без учета действия аэродинамических сил [114].



Рисунок 2.12 – Отрыв транспортируемых снежных частиц с последующим их свободным полетом при транспортировании снежной массы в питателе ФРС

Переход от одной группы уравнений к другой осуществляется в случае смены знака силы нормальной реакции поверхности отвала, N_{ci} , и (или) силы нормальной реакции ленты фрезы, N_{fi} , (элемента рабочего оборудования).

2.1.4. Начальные и граничные условия процесса транспортирования снежной массы

Особое место в исследовании взаимодействия элементов рабочего оборудования роторных снегоочистителей занимают начальные и граничные условия. Значения координат положения частиц, проекций векторов скоростей в момент времени контакта с элементами рабочего оборудования, и характер их поступления в питатель роторного снегоочистителя.

Начальные условия движения частиц определяются характером математической модели и принятыми допущениями.

На рисунке 2.13 представлены кадры скоростной съемки (120 кадр/с) работы фрезы питателя ФРС. На основании которых, принимается допущение:

- поступление снежных частиц на элемент рабочего оборудования осуществляется последовательно друг за другом.

Все последующие теоретические исследования проведены с учетом данного допущения.



Рисунок 2.13 – Характер поступления снежных частиц в питатель ФРС: а) в начальный момент времени, t_0 ; б) через 0,042 с; в) через 0,084 с.

Таким образом, снежный массив может быть представлен совокупностью сфер характерного радиуса, r_{ci} , (см. допущения п. 2.1.2), которые вырезаются элементом рабочего оборудования за один рабочий цикл (рисунок 2.14).

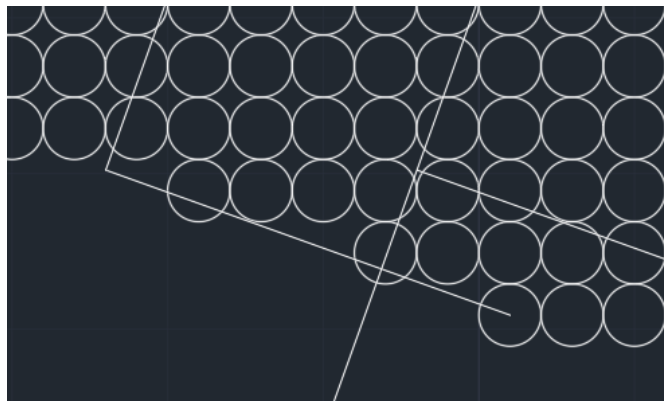


Рисунок 2.14 – Геометрическая модель снежного массива

Под начальным моментом времени подразумевается равенство: $t=0$.

В работе [51] в качестве начального условия скорости снежной частицы на ленте фрезы питателя ФРС принимается равенство абсолютных скоростей участка ленты фрезы, V_ϕ , находящегося в контакте со снежной частицей и снежной частицы, V_{ci} , [51]:

$$V_{ci} = V_\phi = R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot \sin(\theta).$$

Основным недостатком такого типа граничных условий является принятие допущения об отсутствии влияния поступательной скорости движения РСО, $V_{пер}$.

В системе уравнений (2.12) и уравнениях (2.70), (2.71) в явном виде отсутствует поступательная скорость снегоочистителя. Ее учет реализуется в принципе обращенного движения [71, 76, 139], используемого при решении полученных уравнений, в соответствии с которым равномерная скорость, с которой движется РСО, $V_{пер}$, присваивается поступающим в питатель снежным частицам. Так как, принятое выше допущение исключает упругое взаимодействие снежной частицы с лентой фрезы питателя РСО, то вычислительный цикл начинается с уточнения значений проекций вектора абсолютной скорости движения снежной частицы на оси системы координат $O_{\phi}X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$, которые определяются из уравнений связей (2.2). Для описанных случаев задания начальных значений проекций скоростей снежной частицы в питателе РСО, уместна аналогия, связанная с заданием граничных условий «непротекания» и «прилипания», описанных в работе [76].

Соответственно, условие «непротекания» для случая отсутствия смены знака силы нормальной реакции рабочих элементов питателя ФРС будет иметь вид:

$$z_{\phi i} = \sqrt{(R_{\phi} - r_{\phi i})^2 - x_{\phi i}^2},$$

$$y_{\phi i} = (R_{\phi} - r_{\phi i}) \left(\omega_{\phi} \cdot t - a \cdot \tan\left(\frac{x_{\phi i}}{z_{\phi i}}\right) \right) \cdot \operatorname{tg}\theta,$$

$$\dot{z}_{\phi i} = \dot{x}_{\phi i} \frac{x_{\phi i}}{z_{\phi i}},$$

$$\dot{y}_{\phi i} = \frac{\dot{z}_{\phi i} x_{\phi i} - \dot{x}_{\phi i} z_{\phi i}}{(R_{\phi} - r_{\phi i})} \operatorname{tg}\theta - (R_{\phi} - r_{\phi i}) \cdot \omega_{\phi} \operatorname{tg}\theta.$$

Для определения координат начального положения частиц на поверхности отвала питателя реализуется подход, базирующийся на решении геометрических соотношений, сущность которого заключается в том, что характер поступления частиц в питатель ФРС может определяться условием контакта без деформаций соседних частиц, т.е.:

$$\Delta x_{\phi i}^2 + \Delta y_{\phi i}^2 + \Delta z_{\phi i}^2 = 4r_{\phi i}^2, \quad (2.73)$$

Расчетная схема поступления i -ой частицы на ленту фрезы питателя ФРС, где j -ая частица – частица, поступившая в предыдущий момент времени ($j=i-1$), представлена на рисунке 2.15.

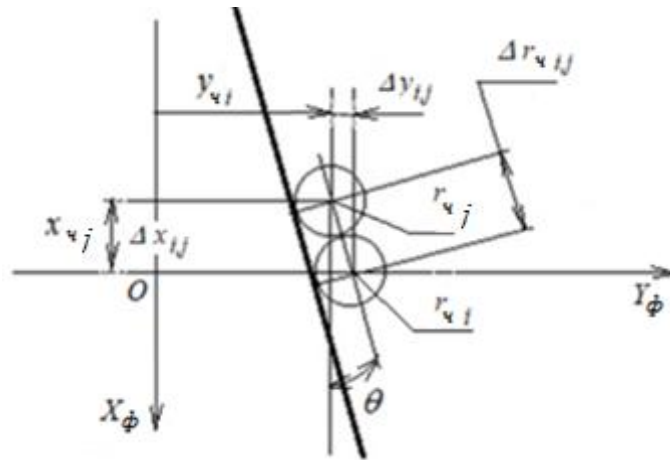


Рисунок 2.15 - Расчетная схема поступления частиц на ленту фрезы

В соответствии с расчетной схемой, в начальный момент времени, известны две координаты новой, i -ой частицы:

$$x_{\phi i} = 0,$$

$$z_{\phi i} = R_{\phi} - r_{\phi i}.$$

Третью координату определяем из условия (2.27) и уравнения геликоида (2.2):

$$\Delta y_{\phi i} = 2 \cdot r_{\phi i} \cdot \operatorname{tg} \theta,$$

$$y_{\phi i} = y_{\phi i-1} + \Delta y_{\phi i} = y_{\phi i-1} + 2 \cdot r_{\phi i} \cdot \operatorname{tg} \theta,$$

и

$$x_{\phi i-1}^2 + (y_{\phi i-1} - y_{\phi i-1} - 2 \cdot (R_{\phi} - r_{\phi i}) \cdot \operatorname{tg} \theta)^2 + (z_{\phi i-1} - r_{\phi i})^2 \geq 4 \cdot (R_{\phi} - r_{\phi i})^2,$$

или

$$x_{\phi i-1}^2 \geq 4 \cdot (R_{\phi} - r_{\phi i})^2 - 4 \cdot ((R_{\phi} - r_{\phi i}) \cdot \operatorname{tg} \theta)^2 - (z_{\phi i-1} - r_{\phi i})^2. \quad (2.74)$$

Использование граничного условия (2.74) при принятом допущении о пренебрежении поступательной скоростью ФРС в виду ее малости, может привести к ситуации, когда частица не поднимется достаточно высоко по поверхности отвала, и новые частицы не будут поступать в питатель ФРС.

Захват частиц, в случае однородности снежных частиц, носит периодический характер, периодичность, T_n , которого зависит от размера снежных частиц, r_{qi} , и определяется выражением:

$$T_n = \Delta t = \frac{2 \cdot r_{qi}}{\omega_{\phi} \cdot (R_{\phi} - r_{qi}) \cdot \operatorname{tg} \theta}. \quad (2.75)$$

В процессе захвата частицы на нее действует снежный массив, обеспечивающий ее поступление на поверхность отвала питателя ФРС (см. рисунок 2.16), и исключает обратное движение снежной частицы.

Учет влияния снежного массива заключался в задании подвижного граничного условия в виде:

$$x_{\phi i} = V_{nep} \cdot \Delta t.$$

Данное условие действует на i частицу в течении всего периода времени T_n (2.75).

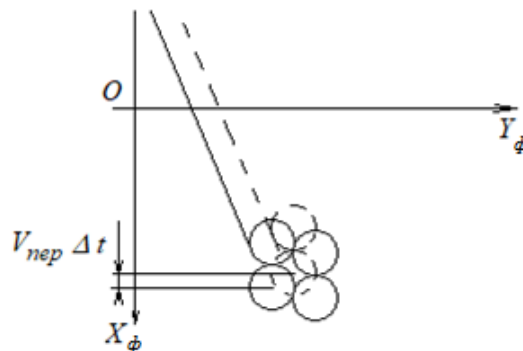


Рисунок 2.16 – Схема поступательного движения снежных частиц в питатель ФРС

Уравнения работы элементов рабочего оборудования (2.2), (2.70), (2.71) представляют собой дифференциальные уравнения второго порядка с правой частью. Очевидно, что наиболее рациональным подходом в решении данной группы уравнений является численное решение на ЭВМ. В работе [18] показано, что использование метода Рунге-Кутты четвертого порядка [56, 80] обеспечивает устойчивый счет, достаточно быстро и относительно небольшую погрешность, для случая движения изолированной частицы конечного размера. Для описанной математической модели и представленных граничных условий, следует ожидать

аналогичных результатов, в случае использования метода Рунге-Кутты четвертого порядка.

2.2. Вариационные принципы решения уравнений работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей

Рассмотрим один из подходов альтернативного исследования математической модели динамики снежного массива при его транспортировании на примере лопасти ротора МА РСО. Математическая модель которого, при транспортировании снежных частиц конечного размера, описана в работе [4, 13, 15]. Аналогичные математические модели грунтометов представлены в работах [79, 136].

Необходимо отметить, что дальность отброса во многом определяет характер формирования снежных валов и как следствие заносимость очищаемой территории [11, 152]. В снежных валах физико-механическая структура снега претерпевает существенные изменения за непродолжительный период времени, что, в итоге, приводит к резкому возрастанию нагрузок на рабочие органы снегоочистительной техники [59].

Предыдущие исследования [160, 171] показывают, что одним из ключевых параметров, помимо структуры отбрасываемого снежного потока, влияющих на дальность отброса снежной массы, L , является скорость снежной частицы, которую она приобретает в результате движения по лопасти ротора. Соответственно, при прочих равных условиях, эффективность работы ротора МА тем выше, чем большую скорость он сообщает снежной массе.

Таким образом, необходимо решить задачу о нахождении такой траектории движения снежной частицы по поверхности лопасти ротора, которая обеспечивает максимум скорости, \dot{x}_{pi} , в конце участка движения снежной частицы, то есть необходимо обеспечить максимум интеграла [8, 25]:

$$J = \int_t \dot{x}_{pi} dt,$$

Решение задачи о нахождении экстремума функционала при наличии связей сводится к составлению и решению уравнений Эйлера для вспомогательного функционала, Φ , [25]:

$$J_{\epsilon} = \int_0^{t_K} \Phi dt; \quad (2.76)$$

$$\Phi = F + \sum_{i=1}^m \lambda_i v_i,$$

где F - подынтегральная функция вспомогательного функционала; λ_i - множитель Лагранжа; v_i - уравнение связи.

Вспомогательный функционал примет вид :

$$\Phi = 2 \cdot \omega_p \cdot f_p \cdot v_{xci} - \omega_p^2 \cdot x_{pi} + g \cdot (f_p \cdot \sin(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta) + \cos(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta)) + \quad (2.77)$$

$$+ f_p \cdot \omega_p^2 \cdot (R_p \cdot \sin \beta + r_{ci}) + \lambda_1 (\dot{x}_{pi} - v_{xci}) = 0$$

где λ_1 , - множитель Лагранжа.

В соответствии с [25] для поиска искомой системы функций $x_{pi}(t)$, $v_{xci}(t)$, $\beta(t)$, реализующих максимум интеграла (2.76), и, кроме того, подчиняющихся уравнениям связи (2.77), используют систему дифференциальных уравнений-уравнений Эйлера, которые имеют следующий вид [8, 139]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}_i} \right) - \frac{\partial \Phi}{\partial y_i} = 0, \quad i=1, 2, \dots, n,$$

где n - количество искомых функций; Φ - вспомогательный функционал; y_i - искомые переменные величины; t - время.

Соответственно имеем:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial v_{xci}} = 2 \cdot \omega_p \cdot f_p - \frac{3 \cdot c \cdot \rho_{\epsilon}}{8 \cdot \rho \cdot r_{ci}} \cdot | -v_{\epsilon} | \cdot (v_{xci} - v_{\epsilon}) + \frac{3 \cdot c \cdot \rho_{\epsilon}}{8 \cdot \rho \cdot r_{ci}} \cdot | v_{xci} - v_{\epsilon} | \cdot v_{\epsilon} - \lambda_1, \quad (2.77)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{v}_{xci}} = 0;$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{v}_{xci}} = 0;$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \beta} = g \cdot (f_p \cdot \cos(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta) - \sin(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta)) + f_p \cdot \omega_p^2 \cdot R_p \cdot \cos \beta;$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\beta}} = 0;$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\beta}} = 0.$$

Окончательно уравнения Эйлера примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_I = 2 \cdot \omega_p \cdot f_p - \frac{3 \cdot c \cdot \rho_{\epsilon}}{8 \cdot \rho \cdot r_{\text{чи}}} \cdot |v_{\epsilon}| \cdot (v_{\text{xчи}} - v_{\epsilon}) + \frac{3 \cdot c \cdot \rho_{\epsilon}}{8 \cdot \rho \cdot r_{\text{чи}}} \cdot |v_{\text{xчи}} - v_{\epsilon}| \cdot v_{\epsilon}, \\ g \cdot (f_p \cdot \cos(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta) - \sin(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta)) + f_p \cdot \omega_p^2 \cdot R_p \cdot \cos \beta = 0. \end{array} \right.$$

Для случая пренебрежения действием аэродинамических сил:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_I = 2 \cdot \omega_p \cdot f_p, \\ g \cdot (f_p \cdot \cos(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta) - \sin(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta)) + f_p \cdot \omega_p^2 \cdot R_p \cdot \cos \beta = 0. \end{array} \right.$$

При времени $t=t_0=0$ начальные условия будут следующие:

$$x_{pi} = r;$$

$$v_{xчи} = 0.$$

При времени $t=t_k$ начальные условия будут равны:

$$x_{pi} \leq R_p, v_{xчи} > 0.$$

Соответственно, в правой части интегрирования имеем:

$$v_{xчи} = \frac{1}{2 \cdot \omega_p \cdot f_p} \left[\omega_p^2 \cdot x_{pi} - g \cdot (f_p \cdot \sin(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta) + \cos(\alpha_0 + \omega_p \cdot t + \beta)) - \right. \\ \left. - f_p \cdot \omega_p^2 \cdot (R_p \cdot \sin \beta + r_{\text{чи}}) + \frac{3 \cdot c \cdot \rho_{\epsilon}}{8 \cdot \rho \cdot r_{\text{чи}}} \cdot |v_{\text{xчи}} - v_{\epsilon}| \cdot |v_{\text{xчи}} - v_{\epsilon}| \right] \quad (2.78)$$

Таким образом, получены уравнения (2.77), (2.78), решение которых позволяет определить профиль лопасти ротора, реализующей максимум интеграла (2.76).

Решение указанных уравнений осуществлялось на ЭВМ на каждом этапе расчета определялись скорости и положения частицы на лопасти ротора. В результате вычислений были определены углы наклона, β , град, участков лопасти ротора, обеспечивающие максимум скорости частицы [8].

Так, при вертикальной разгрузке лопасти ротора, при радиусе ротора 0,3 м и угловой скорости вращения 150 рад/с изменение скорости частицы при

постоянном угле наклона лопасти ротора относительно радиуса и угле наклона, β , град, обеспечивающем соблюдение условия (2.75), представлены на рисунке 2.18 [8]. На рисунке 2.19 представлено изменение угла наклона, β , град, образующей лопасти ротора в зависимости от угла поворота ротора, φ_p , град. Соответственно, профиль лопасти ротора, построенный по данным представленным на графике 2.19, изображен на рисунке 2.20 [8].

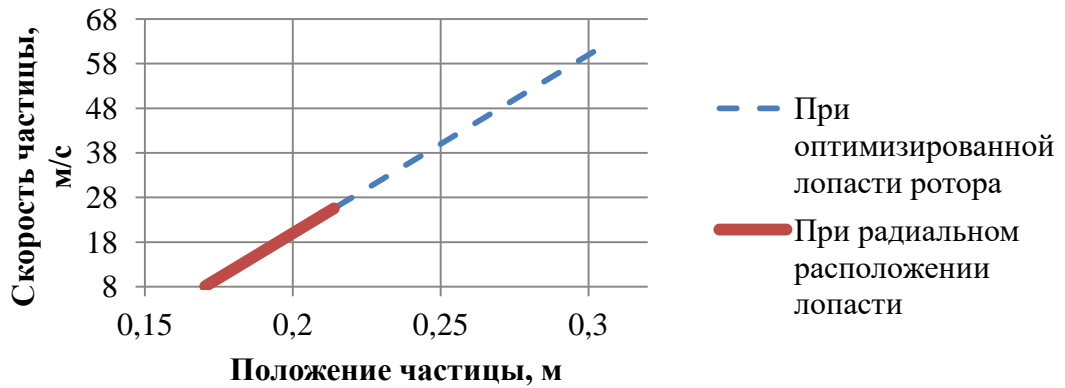


Рисунок 2.18 - Изменение скорости снежной частицы при ее движении по лопасти ротора

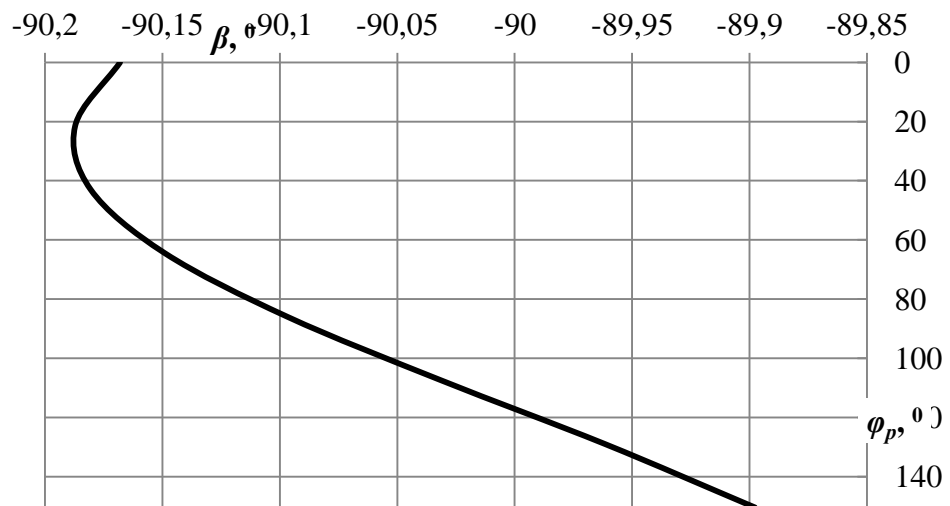


Рисунок 2.19 - Профиль лопасти, обеспечивающий максимум интеграла (2.76)

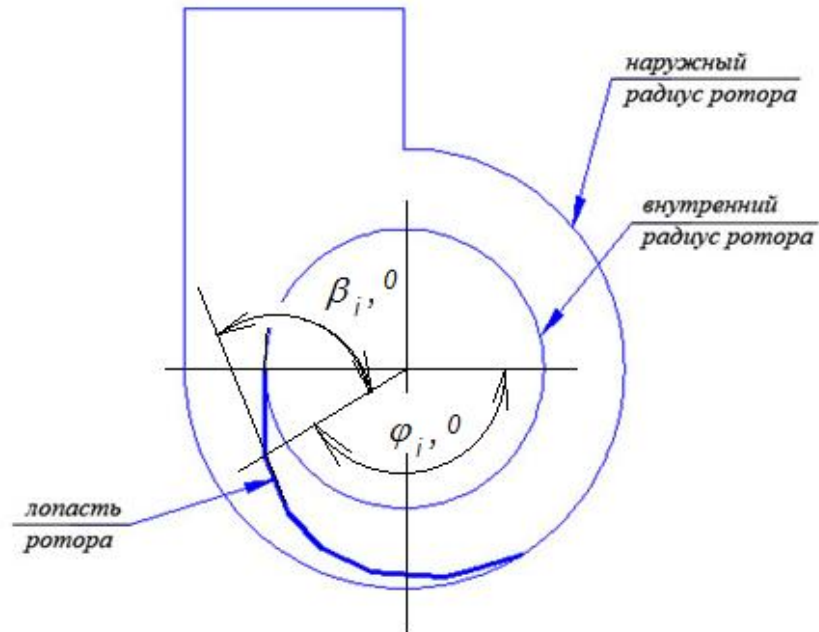


Рисунок 2.20 – Схема профиля лопасти, обеспечивающей максимум скорости снежной частицы

Профиль лопасти, обеспечивающий максимальную скорость снежной частицы при ее сходе с лопасти ротора МА (см. рисунок 2.20), был аппроксимирован уравнением вида:

$$\beta = -89,98 - 0,1844 \cdot \cos(0,017 \cdot \varphi_p) - 0,0844 \cdot \sin(0,017 \cdot \varphi_p), \quad (2.79)$$

где $\varphi_p \geq 0$.

Общий вид оптимальной формы лопасти ротора и ее прототип представлены на рисунке 2.21.

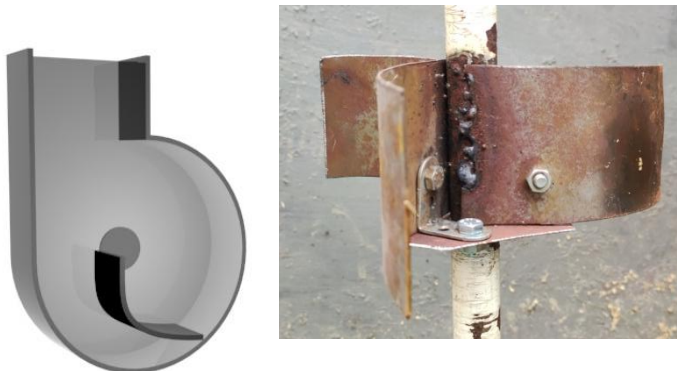


Рисунок 2.21 - Профиль лопасти, обеспечивающей максимум скорости снежной частицы, и ее прототип

Таким образом, повысить удельную энергоэффективность роторного снегоочистителя 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.

2.3. Математическая модель формирования снежных валов при работе роторных снегоочистителей

Оперативное удаление снежного покрова при снегопаде, позволяет управлять рисками, связанными с обеспечением перевозочного процесса, так как исключается уплотнение свежесвыпавшего снега и последующее появление снежно-ледяного образования [40], а обеспечение минимизации роста снежных валов позволяет уменьшить экологические риски, обусловленные ими [11, 75].

В работе [99] выявлены две принципиальные схемы взаимодействия элементов снегоуборочной и другой техники: последовательную и параллельную. В настоящее время при проведении уборки городских территорий используют комбинированную схему взаимодействия снегоуборочной техники, включающую как последовательное, так и параллельное взаимодействие [11].

В [11] показано на основании [99], что повышение эффективности снегоочистных работ зависит от определения рационального состава техники, задействованного в уборке городских территорий. Согласно [99], дифференциация технологии снегоочистки по выполняемым операциям, учитывает не только время на технологические операции, но и затраты на их проведение. Приведенная в [105] математическая модель, по определению оптимального состава снегоочистительной техники относится к классу задач линейного программирования [105], в которой целевая функция зависит от расстояния, пройденного каждым снегоочистителем за время уборки, км; технической скорости и ширины рабочего органа соответствующего типа снегоочистителей; а так же от площади убираемой территории и затрат, зависящих от времени эксплуатации, выраженных в денежном эквиваленте для соответствующего типа снегоочистителей [11, 105].

В работе [100], где представлены зависимости по определению «оптимальной массы» снегоуборочной машины для уборки определенной территории в конкретные сроки для конкретных климатических условий с последующим определением оптимального количества техники из условия максимальной производительности и минимального времени проведения снегоочистных работ. В работе [112], выполнен подбор машин для содержания дорог по группе показателей эффективности, производительности и качеству [11].

Вопрос выбора используемого вида снегоуборочной техники, нашел свое отражение в работах [99, 100, 115]. Так в работе [115] исследуется механизм интенсификации процесса очистки за счет оптимизации маршрутов движения снегоуборочной техники, и выбора оптимального количества техники, в частности для операций разбрасывания и вспашки [166].

При удалении снежного покрова с очищаемой территории без дальнейшей его утилизации наблюдается образование снежного вала на обочине, который в дальнейшем может служить источником формирования снежных наносов [11, 152]. Физико-механические характеристики снега изменяются в таких условиях, и как следствие, приводит к изменению нагрузок, возникающих при дальнейшем взаимодействии рабочих органов машин и механизмов со снегом [11, 59]. В работе [11] представлено описание существующих исследований жизненного цикла снежных наносов. В работе [170], представлена двухмерная численная модель движения и формирования снежных наносов в окрестностях преграды с учетом фрикционных характеристик снежной массы и скорости ветра.

Отличительной особенностью работы РСО является отброс снежной массы в сторону (рисунок 2.22). Стремление к абсолютному удалению снежной массы привело к такому конструктивному решению в области ФРС, как направляющий желоб, обеспечивающий одновременную ее погрузку в транспортное средство. Однако такое решение интенсификации снегоочистки имеет ряд существенных ограничений, поэтому используется только в ограниченном сегменте ФРС средней мощности. При отбросе снежной массы в сторону, неизбежен ее разброс, что приводит к изменению толщины естественно сформированного снежного

покрова, h , и следовательно вызывает изменение дальнейшей производительности РСО.

Одним из критериев эффективности ФРС является дальность отброса снежной массы, L . Зависимости определения которой представлены в работах [51, 66, 111]. В первую очередь зависит от класса ФРС. Для ФРС с мощностью двигателя до 10 кВт составляет от 5 до 10 м, а для снегоочистителей с мощностью двигателя более 100 кВт уже достигает порядка 50 м [11]. В работе [11] указывалось, что на скорость уборки и производительность ФРС непосредственно влияет такой показатель, как ширина разброса снежной массы, которые непосредственное участвуют в образовании снежных валов вдоль края очищаемой поверхности.

С учетом всего сказанного представляется актуальным рассмотреть механизм формирования снежного вала, при работе ФРС, в продольном и поперечном направлениях относительно очищаемой полосы. Для этого были приняты следующие допущения [11]:

- снежная масса распределяется равномерно по всей ширине, B_p , и длине пятна разброса, L_p , транспортируемой снежной массы;
- поступательная скорость ФРС постоянна и равна, $V_{пер}$;
- угловая скорость вращения ротора МА постоянна и равна, ω_p ;
- потери снежной массы, поступившей в питатель ФРС, отсутствуют.
- толщина снежного покрова постоянна и равна, h , на всей площади, подлежащей очистке;
- ширина пятна разброса, B_p , дальность отброса L , остаются постоянными в течение всего уборочного процесса;
- отброс снежной массы осуществляется в одну сторону.

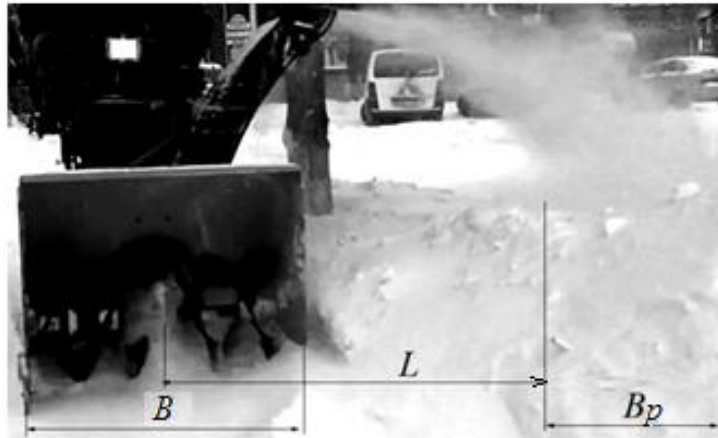


Рисунок 2.22 - Общий вид процесса отброса снежной массы ФРС, где B – ширина захвата питателя ФРС.

Исходя из принятых допущений, следует, что толщина снежного вала в продольном направлении постоянна по всей его ширине при одном проходе ФРС, [11] и все изменения толщины снежного вала будут происходить в его поперечном направлении.

Расчетная схема процесса очистки и формирования снежного вала представлена на рисунке 2.23, [11].

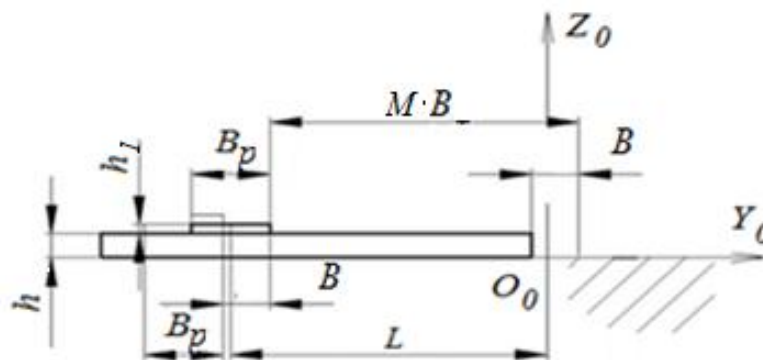


Рисунок 2.23 - Расчетная схема отброса снежной массы в поперечной плоскости, где h_1 – прирост толщины снежного покрова в поперечной плоскости за счет отброшенной снежной массы, при первом проходе РСО

За начальную координату формирования первого снежного вала принимается ближайшая от оси РСО точка отброшенной снежной массы:

$$y_0 = L + B.$$

Количество проходов, M , до отброшенной снежной массы составит:

$$M = \frac{L}{B}.$$

При первом проходе толщина снежного покрова на расстоянии более L , за счет отброшенной снежной массы, увеличится на величину, [11]:

$$h_1 = \frac{B}{B_p} h.$$

Очевидно, что отношение B_p/B , определяет количество проходов, N_n , равных ширине разброса, а общая ширина очищенной площади от снега, a (рисунок 2.24), находится из выражения, [11]:

$$a = B \cdot n_n,$$

где n_n – общее количество проходов совершенных РСО.

При следующем проходе отброшенная снежная масса образует следующий слой, поверх предыдущего, но со смещением равным, B , (см. рисунок 2.23, 2.24). Таким образом, наибольшее увеличение высоты снежного покрова будет наблюдаться на участке пересечения областей разброса отброшенной снежной массы, [11].

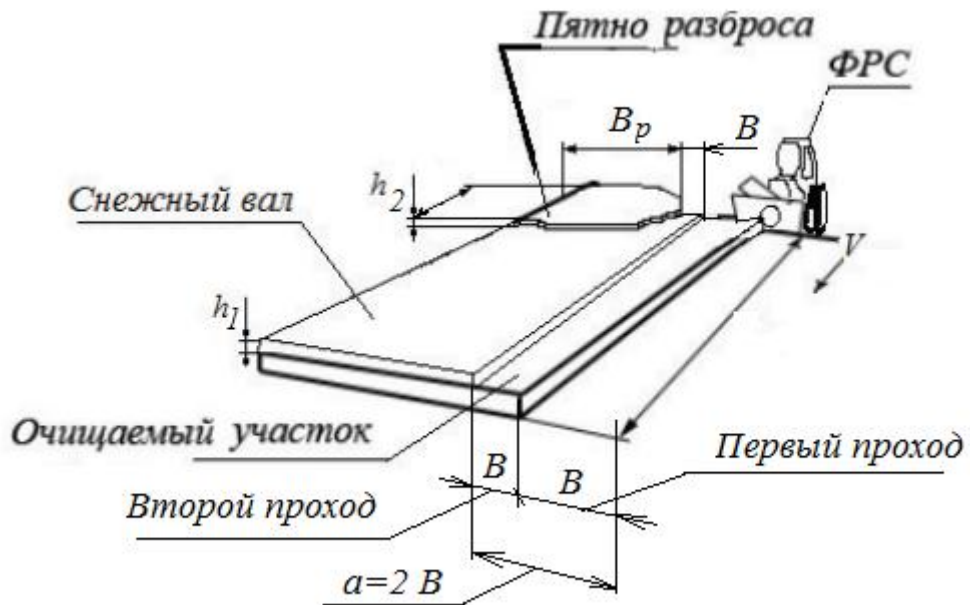


Рисунок 2.24 – Схема формирования снежных валов при работе ФРС, где h_1 – толщина отброшенной снежной массы при первом проходе, h_2 – толщина отброшенной снежной массы при втором проходе ФРС; a - общая ширина очищенной площади от снега за два прохода ФРС

При достижении снегоочистителем границы первого слоя снежного вала, располагающегося на расстоянии, L , от участка, где был сделан первый проход ФРС, толщина перебрасываемого снега, h , уже не будет являться постоянной величиной, т.к. снегоочиститель приступит к переброске только что сформированного снежного вала [11].

Таким образом, рост толщины снежного вала, h , описывается рекуррентными соотношениями и для первого снежного вала имеет вид [11]:

- при $0 < k \leq M$:

$$(k-1) \cdot B < y < L, h = k \cdot h \cdot \frac{B}{B_p} + h, \quad (2.80)$$

$$L + (i-1) \cdot B < y < L + i \cdot B, h = q \cdot h \cdot (k-1) \frac{B}{B_p} + q \cdot h, \quad (2.81)$$

где $i=1, \dots, k-1$.

$$\begin{cases} q = 0, \text{ при } k = 1 \\ q = 1, \text{ при } 1 < k \leq M \end{cases},$$

Выражения, описывающие формирование второго снежного вала за счет переброса уже сформированного первого вала суммируются с предыдущими результатами [11]. В целом, дальнейшие аналитические зависимости становятся существенно громоздкими и сложными в практическом использовании, поэтому целесообразнее осуществлять расчет на ЭВМ [11]. Блок-схема алгоритма расчета толщины снежного вала при любом количестве проходов РСО представлена на рисунке 2.25. Программный продукт, реализующий данный алгоритм, имеет свидетельство о государственной регистрации [91].

Полученные на примере работы ФРС выражения и алгоритм формирования снежного вала, справедливы для любого вида РСО.

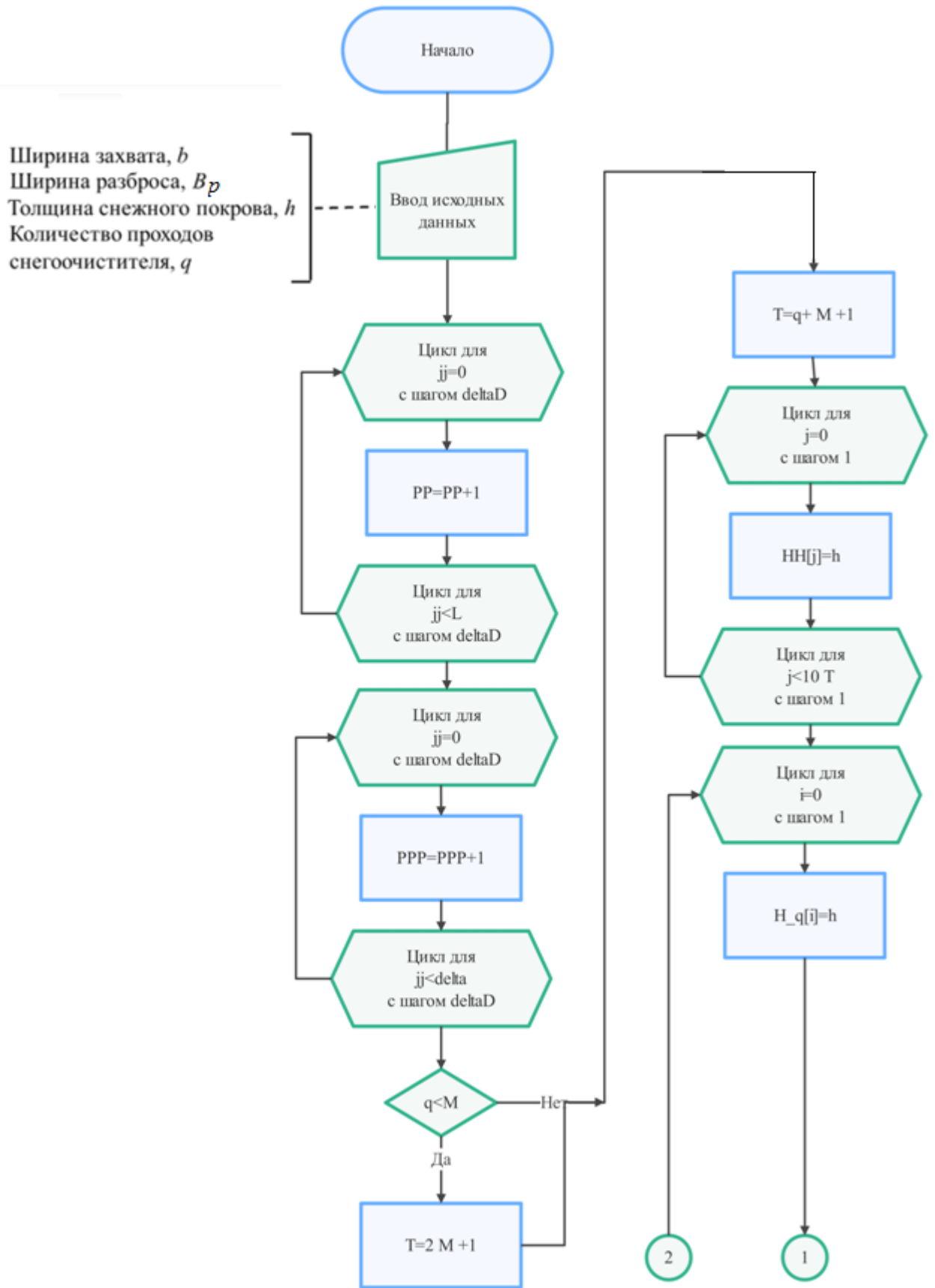


Рисунок 2.25 – Блок-схема алгоритма определения толщины снежного вала

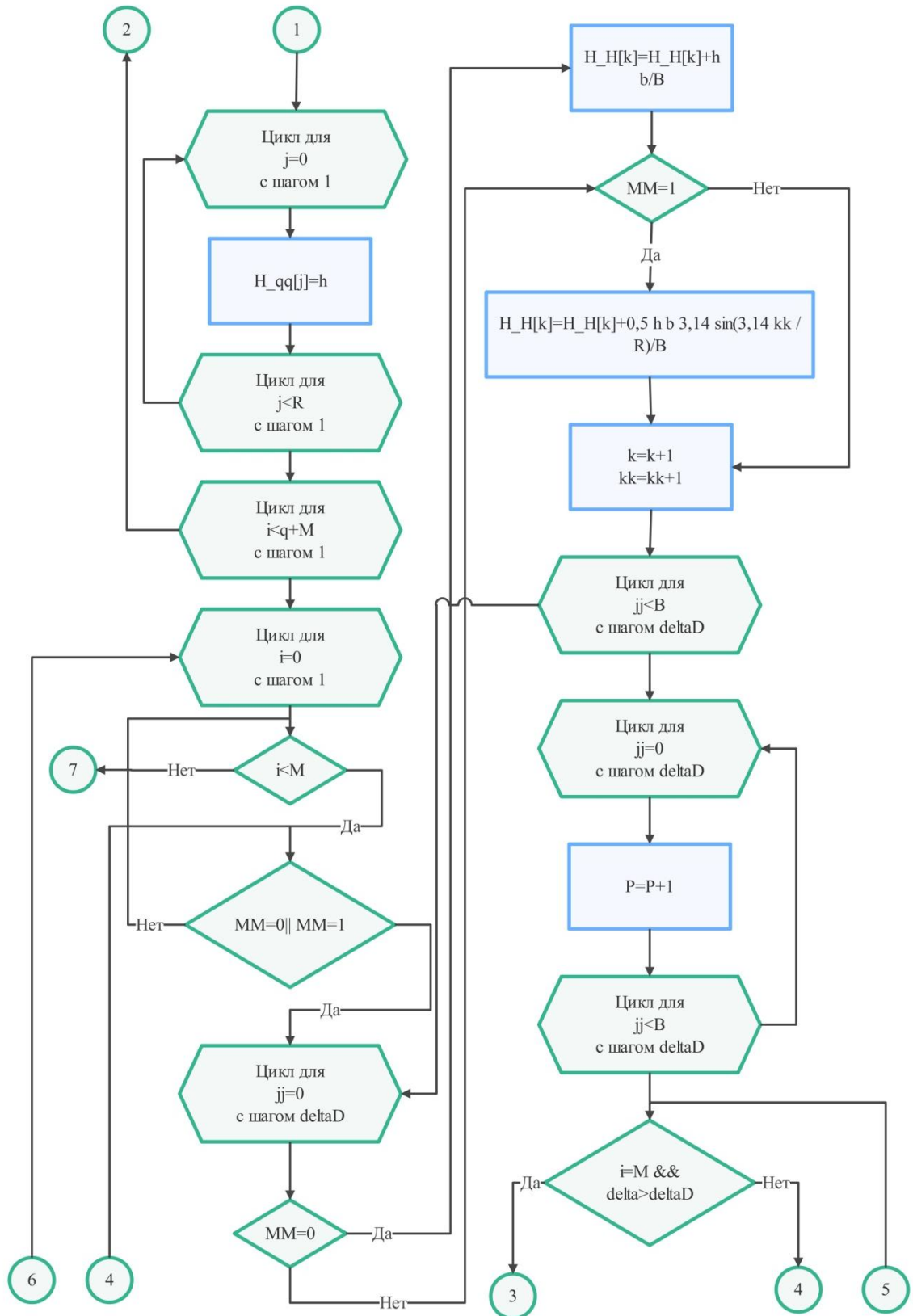


Рисунок 2.25 – Блок-схема алгоритма определения толщины снежного вала (продолжение)

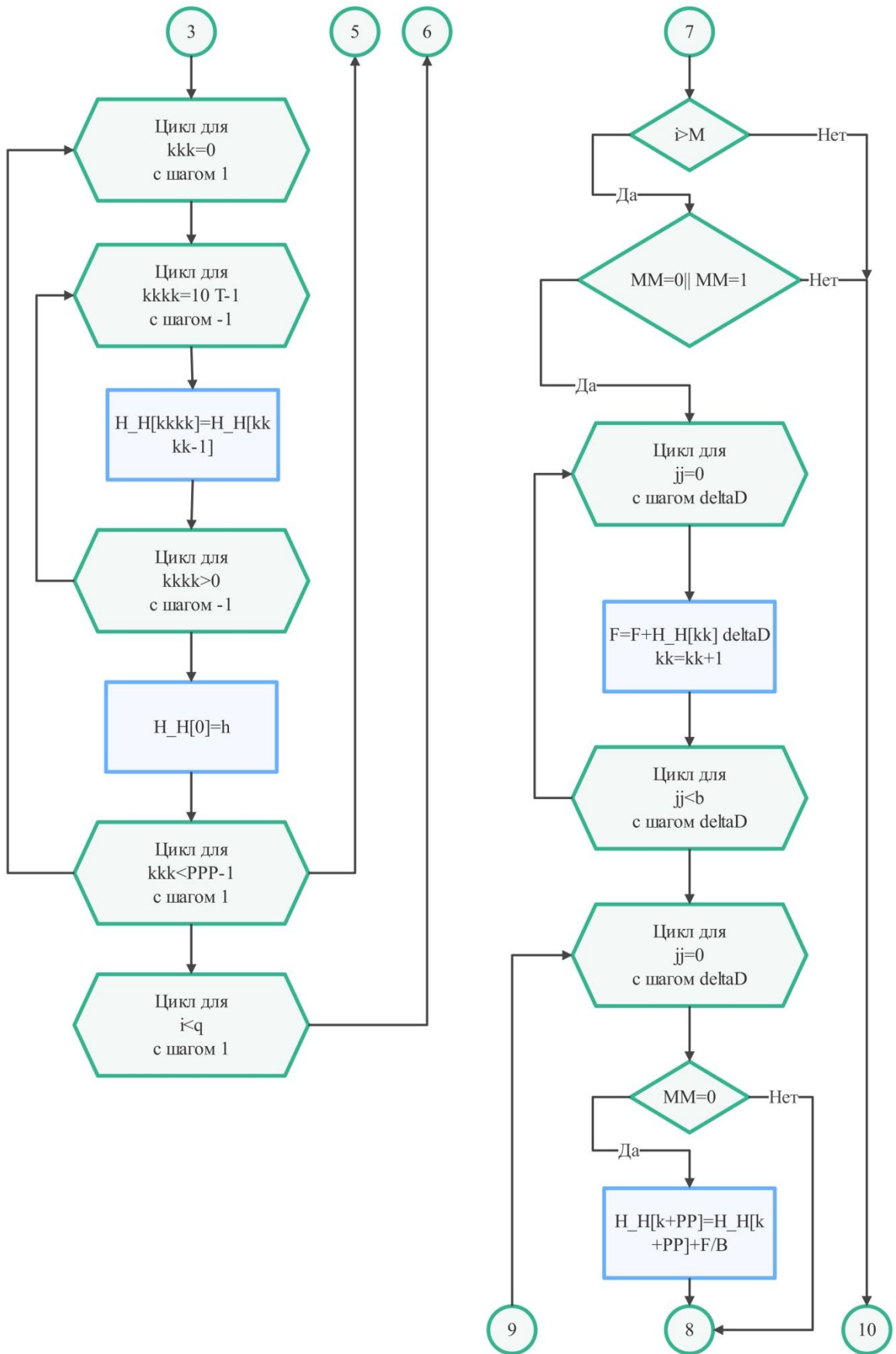


Рисунок 2.25 – Блок-схема алгоритма определения толщины снежного вала (продолжение)

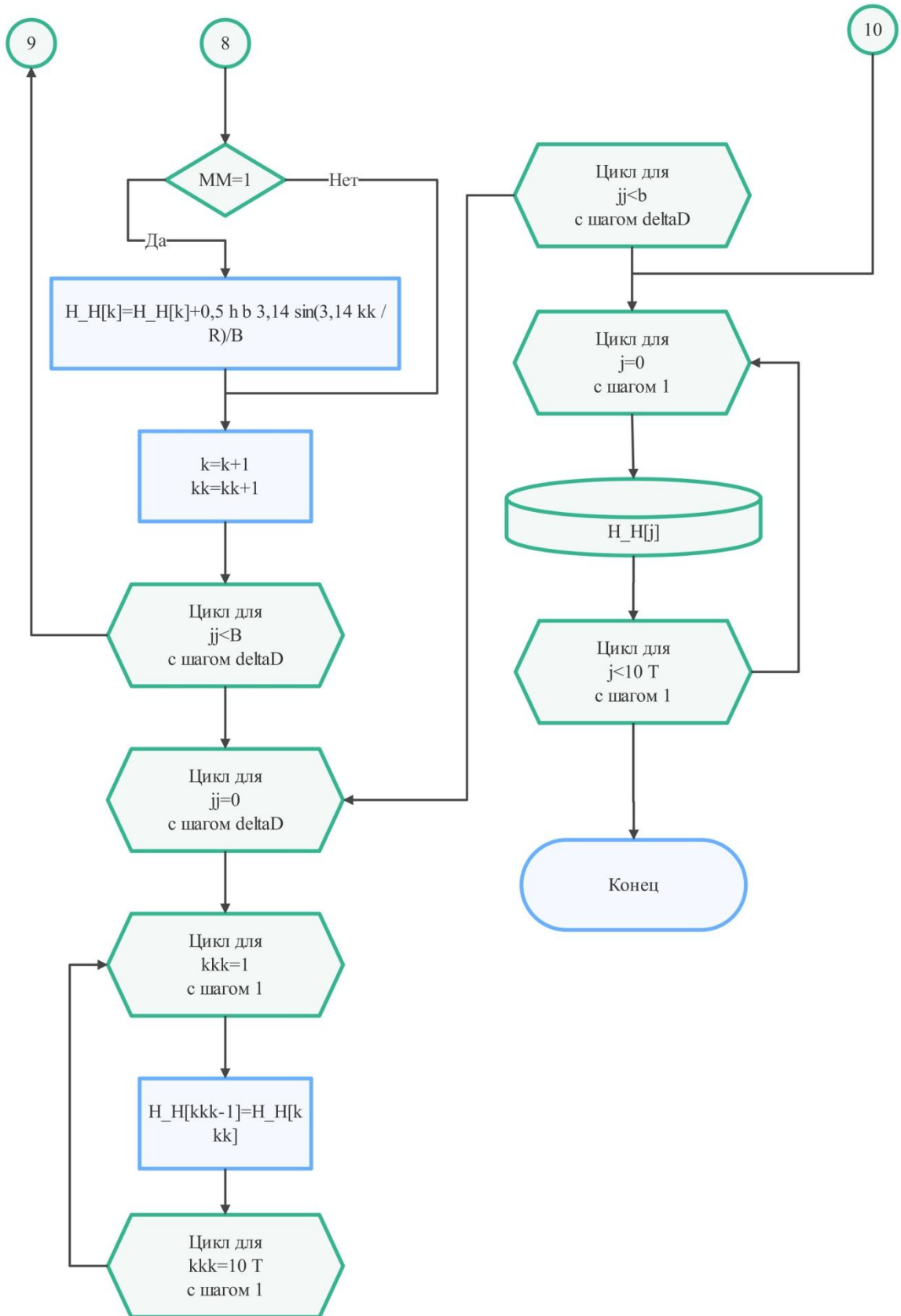


Рисунок 2.25 – Блок-схема алгоритма определения толщины снежного вала (окончание)

Выводы

1. Описаны обобщенные кинематические соотношения возможных конструктивных схем рабочих органов РСО, как отношения эквивалентности и иерархичности, представляющие собой количественные значения конструктивных и технологических параметров, что позволяет на основе кластерного анализа и представления РСО как совокупности подмножеств, формулировать новые направления развития существующих конструкций РСО и создавать новые конкурентноспособные конструкции. Приведены уравнения связей накладываемых на процесс транспортирования снежной массы элементами рабочего оборудования существующих конструкций РСО, позволяющие учесть различные варианты их конструктивного исполнения.

2. Представлены основные существующие направления математического описания взаимодействия элементов рабочего оборудования со снежной средой. Определены, основные характеристики снега, необходимые для реализации соответствующего имитационного моделирования, и модель контактного взаимодействия снежных частиц.

3. С единых методологических позиций получена 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 метательным аппаратом; постановки вариационных задач на примере ротора метательного аппарата.

4. Обоснованы граничные условия, использования модели, описывающей работу элементов рабочего оборудования РСО.

5. Представлен новый подход к решению уравнений математической модели, описывающей работу элементов рабочего оборудования РСО, базирующийся на принципах вариационного исчисления, и заключающийся в том, что на основе

базовых уравнений выводятся уравнения Эйлера для поиска экстремума соответствующего функционала. Данный подход продемонстрирован на примере составленной математической модели транспортирования снежной частицы по лопасти ротора МА. Решение полученных уравнений математической модели описывает профиль обеспечивающий максимум относительной скорости движения снежной частицы в момент ее схода. Получен профиль лопасти ротора МА, обеспечивающий максимальную скорость снежной частицы при ее сходе с лопасти ротора. Прирост относительной скорости частицы в момент ее схода с лопасти ротора составил более чем в 2 раза.

6. Составлена расчетная схема формирования снежного вала при работе РСО, на основе которой описывается математическая модель изменения его толщины в зависимости от конструктивных и технологических параметров РСО. Представлен алгоритм расчета параметров снежного вала образующегося при работе РСО на ЭВМ.

7. Разработана совокупность математических моделей, описывающих процесс проведения работ по очистке от снега РСО, и представляющих собой сложную динамическую систему, включающую в себя такие подсистемы как: снежный массив, фреза питателя РСО, фрезерный питатель, МА.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СНЕЖНОЙ МАССЫ

3.1. Показатели эффективности работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей

Проведение теоретических исследований работы РСО и успешное решение задачи синтеза эффективных решений базируется на выборе показателей эффективности и определении их значений, представляющих собой числовую оценку степени, в которой данная комбинация характеристик рабочего оборудования эффективна для проведения снегоочистных работ [147].

В работах [18, 21, 60] указывается на иерархичность показателей эффективности, суть которой заключается в том, что чем выше уровень рассматриваемого объекта, например, включающего в себя несколько подсистем, тем сложнее по своей структуре будет показатель эффективности. При рассмотрении отдельного элемента, или одной подсистемы часто достаточно использовать единичные показатели, или их группу. В работе [4] в качестве показателя эффективности использовался такой единичный показатель, как дальность отброса снежной массы, L .

Гипотетически, рассматриваемые далее показатели эффективности в определенном диапазоне значений, как и порядковые меры эффективности, согласно [128, 135], должны быть инварианты к масштабу, и непрерывны.

В настоящее время, устоявшимися показателями и их комбинациями, используемыми в качестве критериев эффективности, характеризующими как отдельные подсистемы, так и исследуемую систему в целом, в сфере дорожных, строительных и коммунальных машин являются [18, 66, 67, 73, 92]:

- время рабочего цикла проведения снегоочистных работ, T , с [44];

- объемная производительность, Q , м³/час, производительность по массе, Π , т/час [66, 88, 131];

- мощность, затрачиваемая на транспортирование снежной массы, N , Вт [66, 88, 131] (см. таблицу 1.1).

Оценку эффективности работы рабочего оборудования РСО будем производить по мощности, затрачиваемой на транспортирование снежной массы, N , Вт, и теоретической производительности по массе, Π , кг/с. Перечисленные параметры, являются показателями более высокого иерархического уровня и в неявном виде включают в себя наибольшее количество конструктивных и технологических показателей, описывающих РСО.

Для проведения дальнейших исследований с учетом того, что транспортируемая снежная массы представляется как взаимодействующие между собой отдельные частицы, необходимо определить соотношения, по которым будет определяться затрачиваемая мощность, N , и производительность по массе рабочего оборудования РСО, Π .

Экспериментальные исследования по определению функциональных зависимостей потребляемой мощности и производительности питателя РСО занимают ключевую позицию. Ярким примером, является работа [180], в которой экспериментально исследуется сопротивление резанию и перемещению снежной массы шнековым питателем. Теоретические исследования работы винтовых рабочих органов [95], широко используют положения теории резания. В работе [35] установлено, что эффективность процесса сепарации пласта материала роторами зависит от скорости его подачи, угловой скорости вращения роторов [17], кривизны расположения продольных осей роторов, и свойств материала.

В работе [51], мощность, затрачиваемая на перемещение представлена суммой окружной силы, равной проекции нормальной реакции поверхности ленты фрезы на вертикальную плоскость параллельную направлению движения ФРС, и проекции силы трения частицы о ленту фрезы на ту же плоскость, а так же проекции силы трения частицы от нормальной реакции поверхности отвала питателя ФРС на рассматриваемую плоскость. Аналогичный подход реализован в

работе [18]. Ключевое отличие заключается в том, что затраты мощности могут быть интерпретированы как затраты на транспортирование отдельной частицы, а затраты мощности на транспортирование всей снежной массы, представляют собой сумму отдельных затрат, что описано в работе [111]. Возможен вариант, когда находится эквивалентная транспортируемой в питателе снежной призме снежная частица с последующим определением необходимых затрат мощности на ее транспортирование, что делает такой подход эквивалентным, описанному в [51]. Уравнение затрачиваемой мощности для отдельной частицы в питателе ФРС, N_i , в произвольный момент времени, t , примет вид:

$$N_i = \left(R_\phi - r_{\phi i} \right) \left[N_{\phi i} (\cos \theta + f_\phi \sin \theta) + N_{\psi i} \cdot f_\psi \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right] \omega_\phi. \quad (3.1)$$

Результаты вычислений по формуле (3.1), при фиксированных конструктивных и технологических параметрах рабочего оборудования РСО, изменяются в пространстве введенной системы координат и времени, для каждой частицы, которые образуют транспортируемую снежную массу. Таким образом, возможны следующие варианты определения общих затрат мощности, как функций от указанных выше независимых переменных, которые могут получить практическое применение: по времени, или продолжительности одного полного рабочего цикла. Периодичность рабочих циклов в РСО без питателя зависит от угловой скорости вращения самих роторов, ω_p , поворотной гомотетии с коэффициентом поворотной гомотетии равным 1 для элемента рабочего органа.

Для отдельных элементов фрезы питателя и ротора МА, время периодичности рабочих циклов определяется по формуле:

$$t_u = \frac{2\pi}{n_p \cdot \omega_p} = \frac{2\pi}{n_z \cdot \omega_\phi}, \quad (3.2)$$

где n_p – число лопастей рабочего органа (подобных элементов); n_z – число заходов рабочего органа (подобных элементов).

На рисунке 3.1 представлено изменение периодичности рабочих циклов для фрез питателей ФРС в зависимости от числа заходов при угловой скорости вращения фрезы, $\omega_\phi = 8$ рад/с.

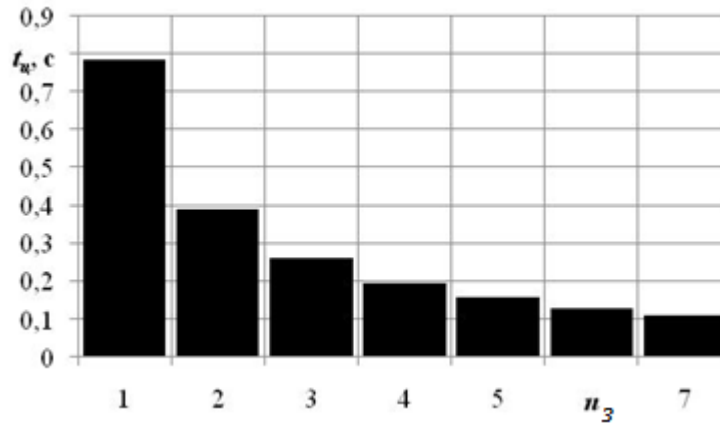


Рисунок 3.1 - Зависимость изменения периодичности рабочих циклов для фрез питателей ФРС от числа заходов, n_z , при угловой скорости вращения фрезы, $\omega_\phi = 8$ рад/с

Используя выражения объемов вырезаемых рабочим органом одноступенчатого РСО (2.8) и фрезой питателя ФРС [18], за данный интервал времени, t_c , равный полному обороту фрезы будет перемещено следующее количество частиц, $n_{\text{ч}}$, с учетом допущения о том, что транспортируемые частицы эквивалентны друг другу по радиусу:

- фрезой питателя ФРС:

$$n_{\text{ч}} = \frac{3 \cdot \pi \cdot R_\phi \cdot \text{tg} \theta \cdot V_{\text{неп}} \cdot h}{n_z \cdot \omega_p \cdot r_{\text{чi}}^3}, \quad (3.3)$$

- рабочим органом одноступенчатого РСО:

$$n_{\text{ч}} = \frac{3 \cdot h \cdot \frac{V_{\text{неп}}}{\omega_p} \arccos\left(\frac{R_p - h}{R_p}\right) \sqrt{h \cdot (2 \cdot R_p - h)}}{\pi \cdot n_p \cdot r_{\text{чi}}^3}. \quad (3.4)$$

На рисунке 3.2 представлено количество частиц в транспортируемом объеме снежной массы при $R_\phi = 0,3$ м, $R_p = 0,3$ м, толщине снежного массива $h = 0,1$ м, эквивалентном радиусе частиц $r_{\text{чi}} = 0,03$ м и числе заходов $n_z = n_p = 3$, в зависимости

от угловой скорости вращения рабочего органа и поступательной скорости РСО, $V_{пер}$, м/с, вычисленные по формулам (3.3) и (3.4) соответственно.

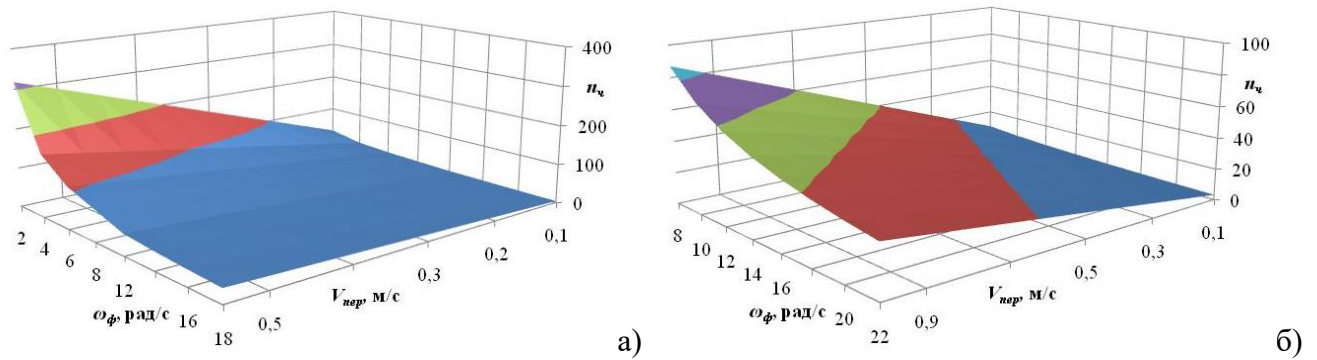


Рисунок 3.2 - Зависимость количества частиц, n_u , в транспортируемом объеме снежной массы: а) в зависимости от угловой скорости вращения фрезы питателя, ω_ϕ , и поступательной скорости, $V_{пер}$, ФРС; б) в зависимости от угловой скорости вращения фрезы питателя, ω_p , и поступательной скорости, $V_{пер}$, одноступенчатого РСО

Из рисунка 3.2 следует, что питатель с горизонтальной фрезой обеспечивает поступление большего количества частиц по сравнению с одноступенчатыми РСО, при прочих равных условиях. Повышение количества вырезанных частиц из снежного массива одноступенчатыми РСО, может быть обеспечено, только за счет повышения поступательной скорости одноступенчатых РСО, или внесения изменений в их конструкцию.

Соответственно, зная затраты мощности на транспортирование снежной массы, N_i , для одного захода ленты фрезы и интервалы времени, Δt_u , через которые начинают работать следующие заходы, можно определить суммарные затраты мощности на транспортирование вырезанной снежной массы по формуле:

$$N_c = \sum_{j=1}^n N_i^j, \text{ при } t \geq t_0 + n_{оф} \cdot j \cdot t_u,$$

где t_0 – начало работы фрезы, $t_0=0$, с; $n_{оф}$ – количество оборотов фрезы; t – текущее время, с; j –заход фрезы питателя.

За интервал времени, t_{u1} осуществляется суммирование мощностей, N_c , от группы частиц, n_u , без учета потерь снежной массы в процессе ее

транспортирования, поступающих в одну из составляющих рабочего оборудования, полученного поворотной гомотетией относительно оси вращения:

$$N_{\phi l} = \sum_{i=1}^n \left(R_{\phi} - r_{\phi i} \right) \left[N_{\phi i} (\cos \theta + f_{\phi} \sin \theta) + N_{\phi i} \cdot f_{\phi} \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}} \right] \omega_{\phi}. \quad (3.5)$$

Более длительный рабочий цикл продолжительностью, t_{u2} , образуется за счет суммирования всех составляющих рабочего оборудования, n_3 . Однако, когда заключительная составляющая сделает полный оборот, все предыдущие части рабочего оборудования уже произведут вырезание части снежной массы (рисунок 3.3). Эти объемы будут пропорциональны периодам, представленным на рисунке 3.1.

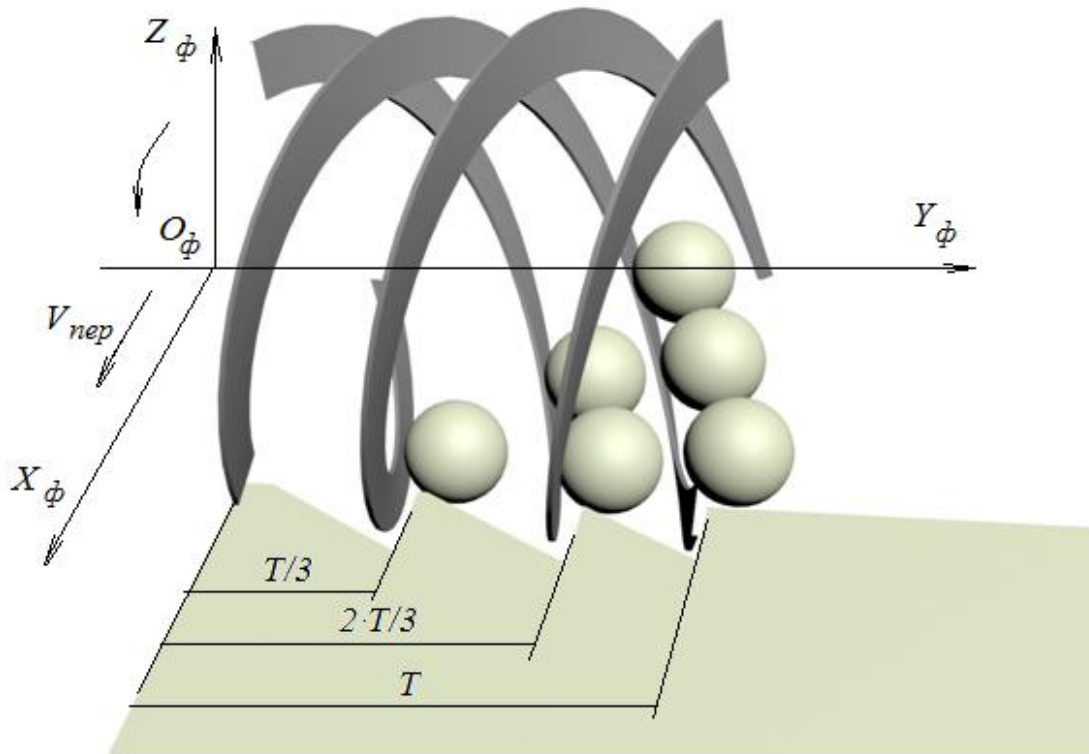


Рисунок 3.3 – Положение элементов рабочего оборудования фрезы питателя РСО по окончании ее полного оборота

Соответственно, количество эквивалентных по радиусу частиц, транспортируемых питателем с горизонтальным расположением трехзаходной фрезы РСО, за один оборот с учетом всех заходов фрезы, будет равно:

$$n_u = \frac{W_\phi + \frac{2}{3}W_\phi + \frac{1}{3}W_\phi}{W_u} = 2 \frac{W_\phi}{W_u}, \quad (3.6)$$

Продолжительность цикла, t_{m2} , будет равна:

$$t_{m2} = \frac{n_p - 1}{n_p} \cdot \frac{2\pi}{\omega_p} = \frac{n_3 - 1}{n_3} \cdot \frac{2\pi}{\omega_\phi},$$

Соответственно суммарная затрачиваемая мощность, N_c , будет определяться суммированием всех рабочих циклов отдельных составляющих рабочего оборудования.

$$N_{u2} = \sum_{j=1}^{n_3} \sum_{i=1}^{n_u} (R_\phi - r_{ui}) [N_{\phi i} \cdot (\cos \theta + f_\phi \sin \theta) + N_{ui} \cdot f_u \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}] \omega_\phi. \quad (3.7)$$

На интервалах времени равному времени цикла целесообразно проводить временное осреднение суммарных значений мощностей, N_{ci} , определяемых по формуле (3.1) для каждой частицы в каждый момент времени, а суммарную затрачиваемую мощность, N_{cc} , рабочего органа определять, как сумму, N_{ci} .

В случае, когда рабочим оборудованием является отвал снегоочистителя - вращение отсутствует. В практике проектирования такого вида машин для оценки энергоэффективности используется величина силы сопротивления, F_i , [53, 66, 111]. Выражение (3.1), в этом случае, примет вид:

$$F_i = N_{ui} \cdot f_u \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2 + \dot{z}_{\phi i}^2}}. \quad (3.8)$$

В качестве продолжительности рабочего цикла, как показателя временного осреднения, может быть принято:

- время нахождения частицы на поверхности отвала с момента ее захвата, до момента схода, определяемое в результате решения системы уравнений обобщенной математической модели.

Величина силы сопротивления, кратная количеству рядов снежных частиц, образующих снежную массу, может быть определено по формуле:

$$F_{\varphi i} = f_{\varphi} \sum_{i=1}^{n_{\varphi}} N_{\varphi i} \frac{\dot{y}_{\varphi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\varphi i}^2 + \dot{y}_{\varphi i}^2 + \dot{z}_{\varphi i}^2}}. \quad (3.9)$$

Данное представление актуально для получения изменения значений сил сопротивления, с целью определения конструктивных параметров элементов рабочего оборудования и исследования его безотказной работы, в зависимости от координаты точки на поверхности рабочего органа.

Оценка теоретической производительности, P_{ρ} , работы рабочих органов РСО, базирующаяся на результатах исследований обобщенной математической модели включает в себя следующие этапы:

1. Определение общей массы, m_s , поступившей на элемент рабочего оборудования РСО, как суммы масс отдельных частиц, представляющих собой сферы характерного радиуса, $r_{\varphi i}$, одинаковой плотности снега, ρ , и определение общей массы, m_{TP} , которая не была потеряна в процессе ее перемещения в рабочем органе, за интервал времени, t_{ml} [17]. Для питателя ФРС условием того, что снежная частица была перемещена в ротор МА, является попадание частицы в область загрузочного окна (рисунок 3.4), которое может быть описано следующим выражением:

$$(B_{\varphi} - y_{\varphi i})^2 + (p - z_{\varphi i})^2 \leq R_p^2. \quad (3.10)$$

Суммарная масса частиц, m_{TP} , достигших области загрузочного окна, определяется по формуле:

$$m_{TP} = \sum_{i=1}^{n_{TP}} m_{TP_i} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^{n_{TP}} r_{\varphi i}^3. \quad (3.11)$$

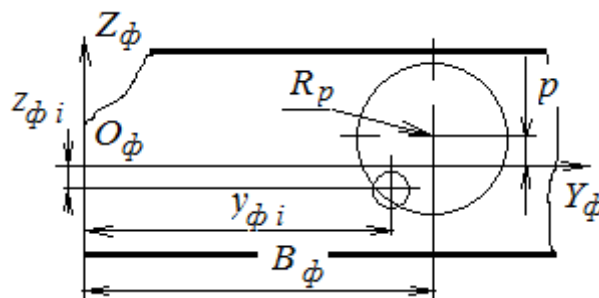


Рисунок 3.4. Схема достижения частицей области загрузочного окна РСО, где p – смещение горизонтальной оси области загрузочного окна относительно горизонтальной оси питателя

Общая масса частиц поступивших в питатель определяется аналогично (3.11):

$$m_s = \sum_{i=1}^{n_q} m_{s_i} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^{n_q} r_{qi}^3. \quad (3.12)$$

В выражении (3.12) величина, n_q , описана выше.

Необходимо отметить, что в работе [17] определяется количество потерянной снежной массы, а снежная масса, достигшая области загрузочного окна, m_{TP} , является разницей между общей массой, m_s , поступившей в питатель и потерянной массой. Учитывая тот факт, что в предыдущих исследованиях [4, 66], используется такой показатель как коэффициент заполнения, представляющий собой отношение фактической массы, находящейся в объеме рабочего органа, к максимальной массе, которая может поступить в этот объем, то удобнее использовать выражение (3.13). Тогда коэффициент заполнения будет равен:

$$k_3 = \frac{m_{TP}}{m_s} = \frac{\frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^{n_{TP}} r_{qi}^3}{\frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^{n_q} r_{qi}^3} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{TP}} r_{qi}^3}{\sum_{i=1}^{n_q} r_{qi}^3}.$$

В случае снежных частиц эквивалентных по радиусу, r_{qi} , и при отсутствии дробления и коагуляции:

$$k_3 = \frac{m_{TP}}{m_s} = \frac{n_{TP}}{n_q}.$$

2. Определение теоретической производительности элемента рабочего оборудования, Π_n , при транспортировании снежной массы, по известному соотношению [17]:

$$\Pi_{po} = \frac{m_{TP}}{t_{\Pi}}.$$

С учетом (3.11), (3.12) и числом заходов, n_3 :

$$\Pi_{\Pi} = \sum_1^{n_3} \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_{TP}} r_{qi}^3}{t_{\Pi 2}} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot n_3 \frac{r_q^3 n_{TP}}{t_{\Pi 2}}. \quad (3.13)$$

Согласно [70], одним из обобщенных показателей является удельная энергоемкость, представляющая собой, в данном случае, отношение:

$$NP = \frac{N}{P}.$$

Уменьшение данного показателя указывает на повышение эффективности. Данный показатель применим, как к отдельным подсистемам, формирующим образ РСО, так и к РСО в целом.

Таким образом, получены выражения показателей эффективности работы рабочих органов РСО с учетом взаимодействия снежных частиц в транспортируемой снежной массе. Показана их масштабируемость относительно интервалов времени, определяющих продолжительность работы отдельных элементов и всего рабочего оборудования РСО в целом.

3.2. Теоретическое исследование влияния количества транспортируемых частиц на показатели эффективности работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей

Теоретические исследования работы рабочего оборудования РСО на примере ФРС. В таблице 3.1 представлены значения конструктивных и технологических параметров, формирующих образ питателя ФРС. Указанные значения являются исходными данными для описанной выше обобщенной математической модели. Значения технологических параметров соответствуют характеристикам РСО малой мощности.

Таблица 3.1 – Исходные данные для обобщенной математической модели применительно к питателю ФРС [17, 18]

Параметр	Значение
1	2
R_f – радиус фрезы, м;	0,3
ω_f – угловая скорость вращения фрезы, рад/с;	8

Продолжение таблицы 3.1.

1	2
$V_{пер}$ – скорость снегоочистителя, м/с;	0,55
θ – угол захода ленты фрезы, град;	20
B_ϕ – половина ширины захвата питателя ФРС, м	$B_\phi = 2\pi R_\phi \text{tg}\theta = 0,69$
f_ψ – коэффициент трения снежной частицы о поверхность отвала;	0,03
f_ϕ – коэффициент трения снежной частицы о ленту фрезы;	0,03
r_{ci} – характерный размер частицы, м;	0,005
ρ – плотность снежной частицы, кг/м ³ ;	500
V_x – скорость частицы по оси $O_\phi X_\phi$, м/с;	0
V_y – скорость частицы по оси $O_\phi Y_\phi$, м/с;	0
V_z – скорость частицы по оси $O_\phi Z_\phi$, м/с;	0
x_ψ – координата ц.м. частицы по оси $O_\phi X_\phi$, м;	0
y_ψ – координата ц.м. частицы по оси $O_\phi Y_\phi$, м.	0
Точность вычислений, с	0,00025
Время вычислений для одного захода, с	$2\pi/\omega_\phi = 0,79$

Для описания транспортируемой снежной массы дополнительно добавляются исходные данные, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Дополнительные исходные данные для группы частиц

Параметр	Значение
n_ψ – количество частиц в между соседними витками фрезы	
E – модуль Юнга снега, Н/м;	2000
η – коэффициент Пуассона снега	0,3

В процессе компьютерного моделирования работы питателя ФРС при транспортировании снежной массы осуществлялось варьирование количества поступающих снежных частиц. Максимальное количество частиц, с которым может взаимодействовать элемент рабочего оборудования за один цикл для РСО,

при условии внедрения фрезы питателя в снежный массив на глубину не менее характерного радиуса частицы, может быть определено по формуле:

$$n_{max} = \frac{B_{\phi}}{2 \cdot r_{ci}} = \pi \frac{R_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta}{r_{ci}}, \quad (3.14)$$

где n_{max} - количество частиц радиусом, r_{ci} , которое полностью укладывается в половину ширины захвата питателя ФРС.

Например, для радиуса фрезы $R_{\phi} = 0,15$ м и угла захода $\theta = 20^{\circ}$, количество частиц с характерным радиусом $r_{ci} = 0,01$ м, будет равно $n_{max} = 17$.

Для случая плужного снегоочистителя:

$$n_{max} = \frac{B_{p.o.}}{2 \cdot r_{ci}}. \quad (3.15)$$

Количество частиц соответствует случаю непрерывного взаимодействия элемента рабочего оборудования со снежным массивом, или необходимому условию максимальной теоретической производительности. Таким образом, «емкость» рабочего оборудования РСО зависит от характерного размера снежных частиц, r_{ci} , которая изменяется гиперболически (3.14).

В дальнейших исследованиях характерный радиус частиц варьировался в диапазоне $r_{ci} = 0,005 \dots 0,04$ м, с шагом 0,005, при этом, согласно работе [66], указанный диапазон соответствует средним значениям радиуса частиц снега при выбросе из питателя. В таблице 3.3, представлено количество частиц, n_{ci} , соответствующее максимальной емкости рабочего оборудования для указанного выше варьируемого диапазона.

Исследование влияния количества частиц на параметры работы рабочего оборудования проводилось на примере снежных частиц с характерным радиусом $r_{ci} = 0,015$ м и количестве частиц $n_{ci} = 1, 2, 4, 8$.

Таблица. 3.3 - Количество частиц, которые могут поступить в питатель за один цикл работы элемента рабочего оборудования РСО

$r_{qi}, \text{ м}$	n_q
0,005	60
0,01	30
0,015	20
0,02	15
0,025	12
0,03	10

На рисунках 3.5-3.7, в качестве примера, представлены траектории движения одиночной частицы и группы частиц, с учетом их взаимодействия друг с другом, транспортируемые одним заходом фрезы в питателе ФРС.

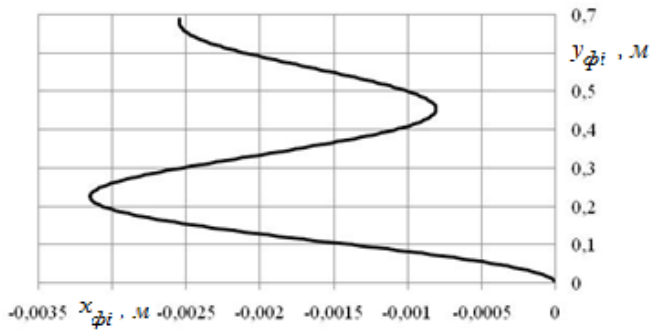


Рисунок 3.5 – Траектория движения одиночной частицы

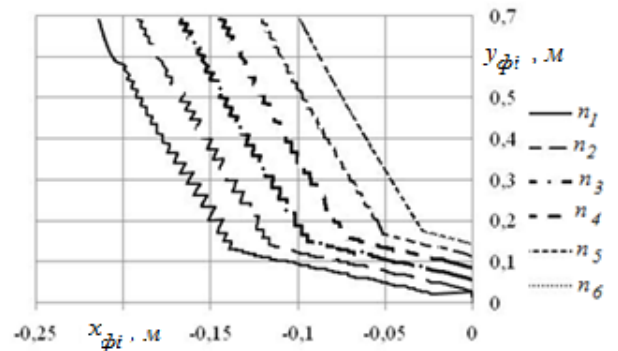


Рисунок 3.7 – Траектории движения шести частиц

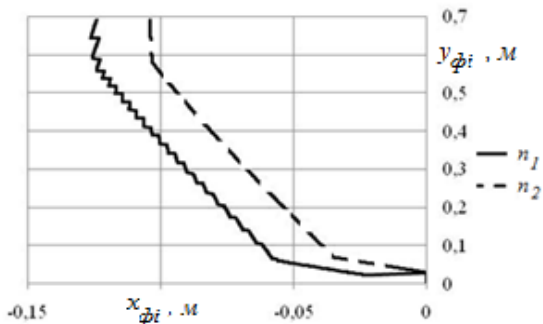


Рисунок 3.6 – Траектории движения двух частиц

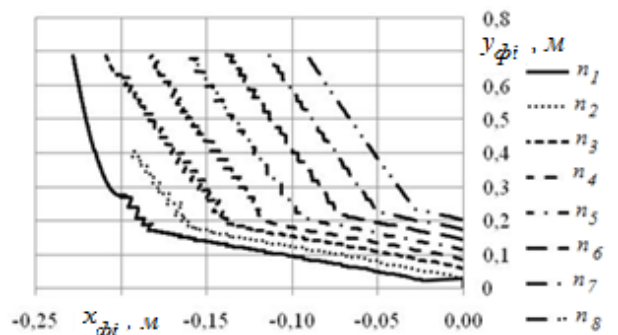


Рисунок 3.8 – Траектории движения восьми частиц

Из рисунков следует, что движение группы частиц происходит в условиях непрерывного взаимодействия друг с другом. При количестве частиц, $n_{ч}=8$, начинают наблюдаться процессы выхода частиц за геометрические пределы рабочего органа. Движение группы частиц обуславливает более высокое движение транспортируемой снежной массы относительно основания. Колебания траектории выше у частиц, которые поступили первыми в пространство рабочего органа.

На рисунках 3.9 – 3.12 представлено изменение кинетических энергий, K_i , отдельных частиц и кинетической энергии группы частиц, K , представляющей собой, сумму кинетических энергий отдельных частиц [130], в зависимости от времени работы элемента рабочего оборудования роторного снегоочистителя, на примере одного захода фрезы питателя РСО.

Из рисунков 3.10 и 3.12 хорошо виден ступенчатый характер изменения полной кинетической энергии, K , транспортируемой снежной массы в процессе захвата новых частиц. При этом изменения максимальных значений полной кинетической энергии, K_{max} , для группы частиц, практически одинаковы и не зависят от их количества. Относительный прирост составляет в среднем в 1,43, исключение составляет случай транспортирования изолированной частицы (рисунок 3.13).

Количество ступеней роста полной кинетической энергии, K_{max} , соответствует количеству частиц, $n_{ч}$, поступивших в пространство рабочего органа роторного снегоочистителя. Их ширина определяется характерным размером захватываемых частиц, $r_{чi}$, и угловой скоростью вращения рабочего оборудования, ω_{ϕ} , а высота зависит от поступательной скорости, $V_{пер}$, РСО и половины характерного размера, $r_{чi}$, частицы.

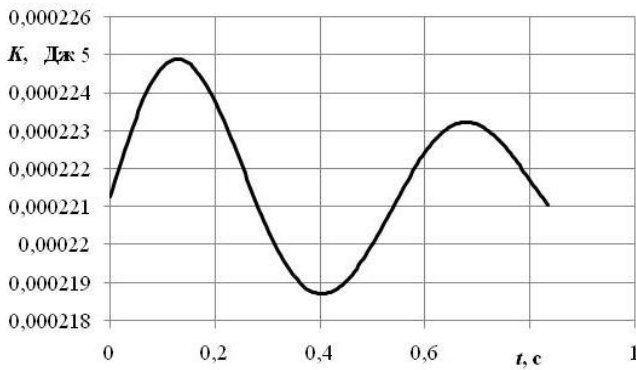


Рисунок 3.9 – Изменение кинетической энергии при транспортировании изолированной снежной частицы по времени

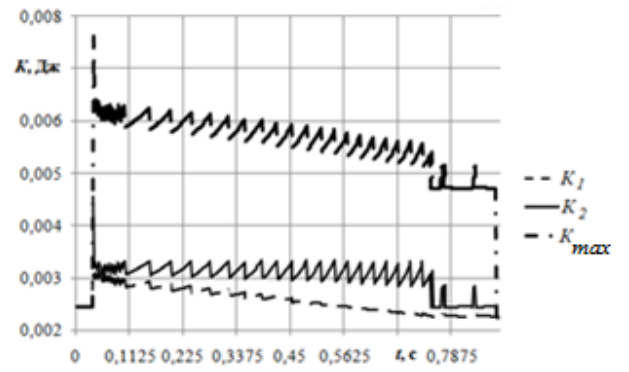


Рисунок 3.10 – Изменение кинетических энергий, K_i , транспортируемых двух снежных частиц, и полной кинетической энергии, K_{max} , по времени

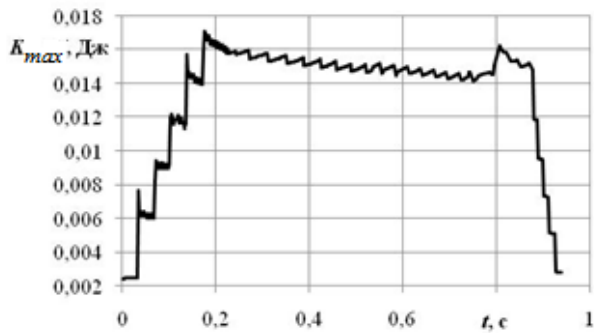


Рисунок 3.11 – Изменение полной кинетической энергии, K_{max} , транспортируемой снежной массы при, $n_i=6$, по времени

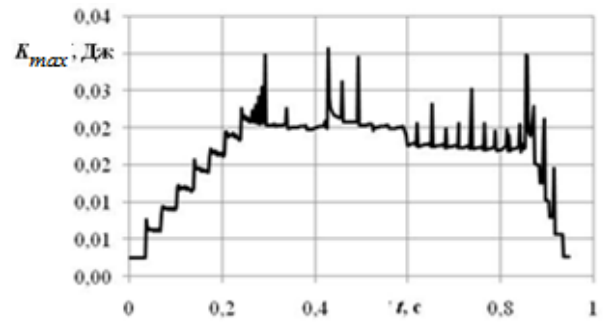


Рисунок 3.12 – Изменение полной кинетической энергии, K_{max} , транспортируемой снежной массы при, $n_i=8$, по времени

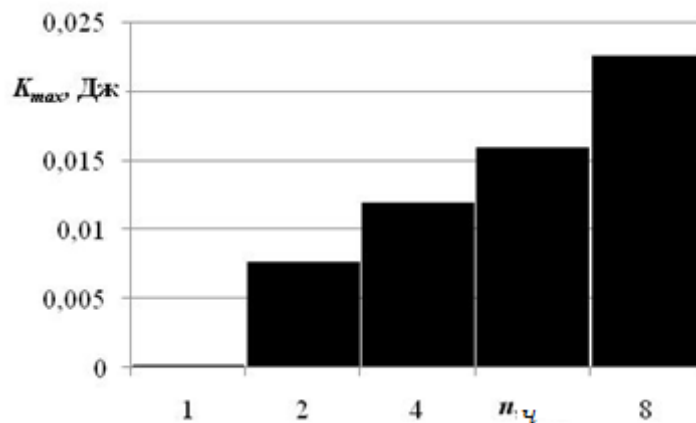


Рисунок 3.13 – Максимальные значения полной кинетической энергии, K_{max} , в зависимости от количества транспортируемых частиц

По окончании захвата частиц, наблюдается монотонный спад эволюционной кривой полной кинетической энергии, K , обусловленный действием сил внешнего трения. Угол наклона линии спада составляет примерно 9° , что может быть объяснено действием двух диссипативных сил трения, со стороны наложенных связей, на каждую частицу. Пилообразный характер мгновенных изменений полной кинетической энергии, является результатом взаимодействия частиц между собой в процессе их транспортирования.

Рассмотрим, какие изменения происходят, когда модуль Юнга, E , в уравнении, описывающем контактное взаимодействие частиц (2.9) равен нулю. На рисунках 3.14 - 3.16 представлены изменения траектории движения частиц в плоскости $O_\phi X_\phi Y_\phi$ и их кинетической, K , и полной кинетической энергии, K_{max} , в зависимости от времени, t , движения.

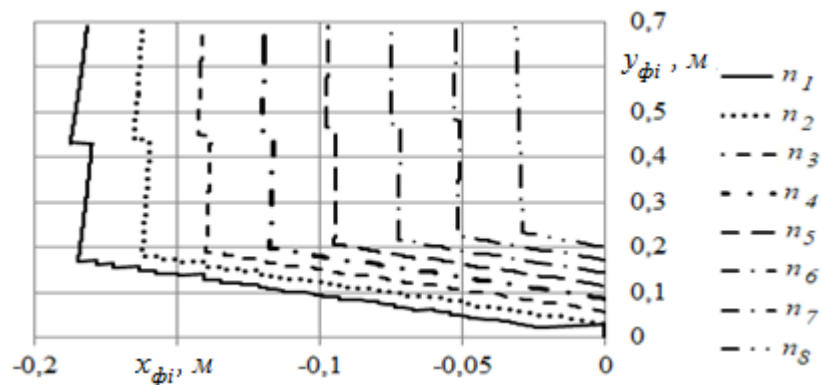


Рисунок 3.14 –Траектории движения при, $n_v=8$

Согласно [82], если к системе снежных частиц не приложены заданные ударные импульсы, т.к. сила их контактного взаимодействия равна нулю, то внезапное наложение идеальных связей уменьшает кинетическую энергию системы, K , что наблюдается на рисунке 3.15. Такой идеальной связью являются соседние частицы, исключаящие отскок и последующее выравнивание векторов скоростей группы частиц, что следует из рисунка 3.14, как при абсолютно неупругом взаимодействии. При этом изменение полной кинетической энергии, K_{max} , по всем частицам (рисунок 3.16), носит слабовыраженный характер, и практически не изменяется на их режиме транспортирования, когда отсутствует поступление новых частиц. С другой стороны определение коэффициента

восстановления скорости при ударе, по известным соотношениям [82, 97, 130], равно 1, что характерно для абсолютно упругого удара. Что объясняется изменением знака проекций векторов скоростей взаимодействующих частиц и последующим их выравниваем по модулю.

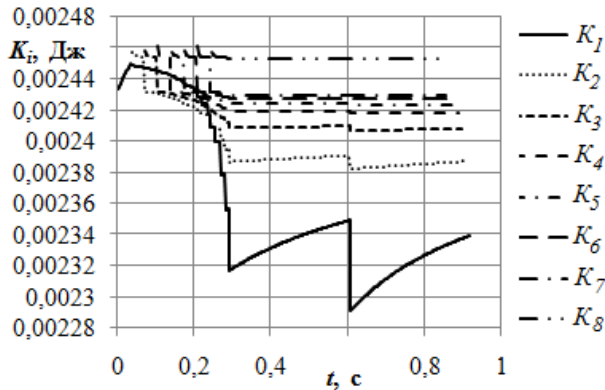


Рисунок 3.15 – Изменение кинетической энергии частиц, K_i , в зависимости от времени, t

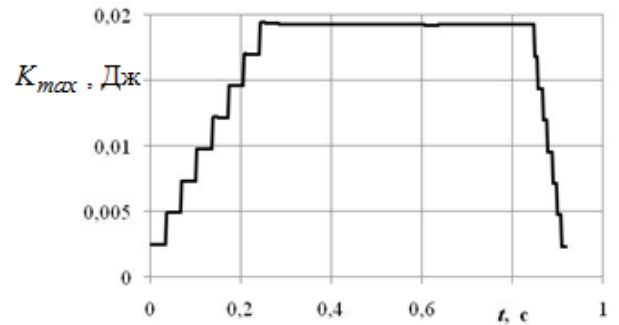


Рисунок 3.16 – Изменение полной кинетической энергии, K_{max} , транспортируемых частиц в зависимости от времени, t

На рисунках 3.17, ..., 3.20 представлены изменения затрачиваемой мощности, как одной из основных количественных мер эффективности процесса транспортирования снега рабочим органом РСО, для случая транспортирования одиночной частицы и группы частиц, соответственно.

Из рисунков 3.17, ..., 3.20 отчетливо прослеживается участок изменения суммарных затрат мощности, N_c , процесса захвата снежных частиц рабочим органом, при этом он является наиболее энергоемким, по сравнению с остальной частью представленных кривых. Необходимо отметить, что формально рассматриваемый участок в интервале времени до $t=0,3$ с не может быть интерпретирован, как участок «чистого» захвата снежных частиц, т.к. в суммировании участвуют затраты мощности на транспортирование предыдущих частиц.

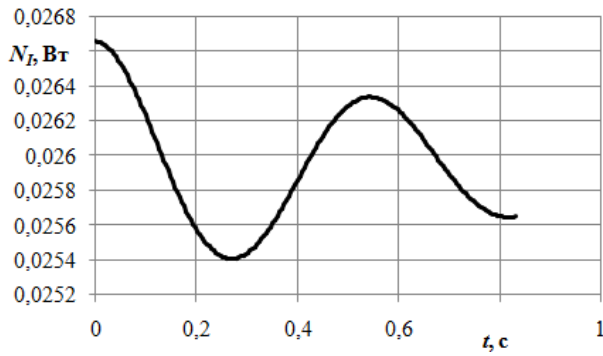


Рисунок 3.17 – Изменение затрачиваемой мощности на транспортирование изолированной снежной частицы, $n_q=1$, в зависимости от времени, t

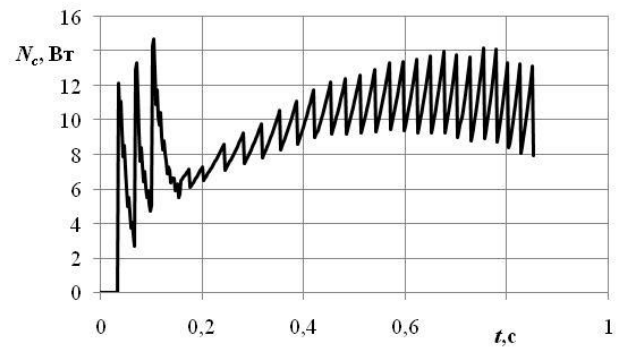


Рисунок 3.18 – Изменение суммарной затрачиваемой мощности, N_c , при транспортировании $n_q=4$ частиц в зависимости от времени, t

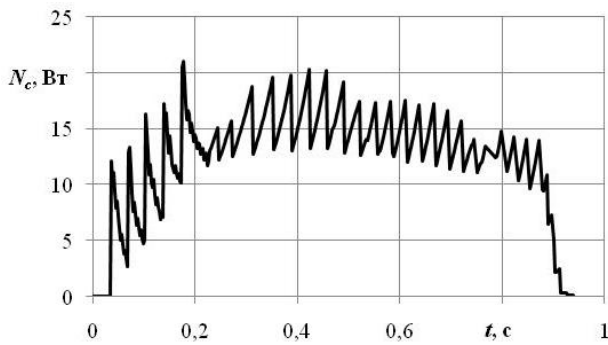


Рисунок 3.19 – Изменение суммарной затрачиваемой мощности, N_c , при транспортировании $n_q=6$ частиц в зависимости от времени, t

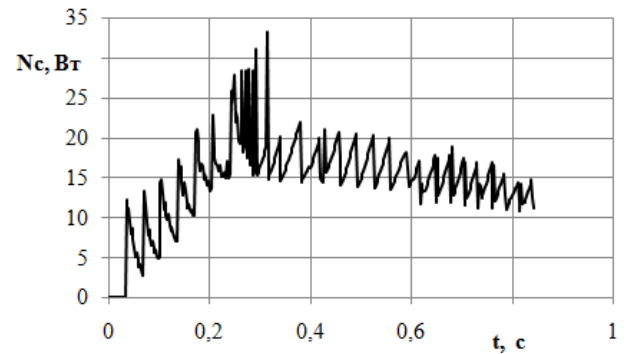


Рисунок 3.20 – Изменение суммарной затрачиваемой мощности, N_c , при транспортировании $n_q=8$ частиц в зависимости от времени, t

На рисунке 3.21 представлена полиномиальная аппроксимация максимальных суммарных значений затрат мощности, $N_{c \max}$, на участке захвата снежных частиц, выполненная в среде Matlab [86, 119, 149]. Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,991$. Аналитическое выражение полиномиальной аппроксимации представленной на рисунке 3.21 имеет вид:

$$N_{c \max} = 0,759 \cdot t^2 + 5,105 \cdot t + 17,52.$$

Аналогично были получены выражения полиномиальной аппроксимации максимальных, $N_{c \max}$, (3.16) (рисунок 3.22) и минимальных значений, $N_{c \min}$, (3.17) (рисунок 3.23) мощности для участка, на котором отсутствует поступление снежных частиц. Величины достоверности аппроксимации составили $R^2=0,8889$ и $R^2=0,8898$, соответственно.

$$N_{c \max} = -04,574 \cdot t^2 - 9,469 \cdot t + 26,03, \quad (3.16)$$

$$N_{c \min} = -6,763 \cdot t^2 - 1,38 \cdot t + 16,1. \quad (3.17)$$

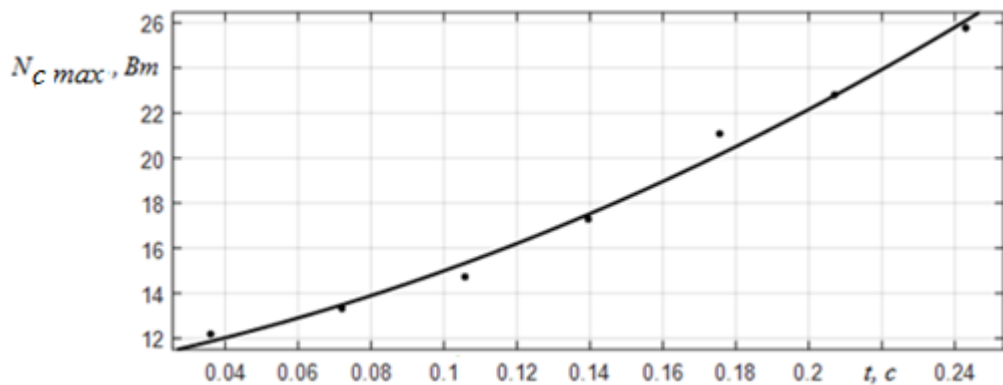


Рисунок 3.21 – Изменение максимальных суммарных значений затрачиваемой мощности, $N_{c \max}$, на участке захвата снежных частиц $n_q=8$ частиц в зависимости от времени, t

В случае определения затрат мощности на резание снежной массы питателем РСО по известному соотношению (см. таблица 1.1), при аналогичных исходных данных, величина затрачиваемой мощности, $N_{\phi 1}$, составляет 24,1 Вт.

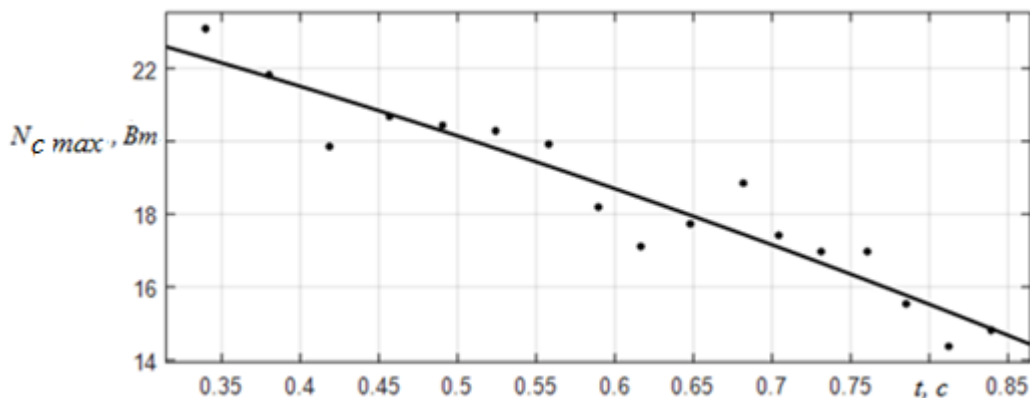


Рисунок 3.22 – Изменение максимальных суммарных значений затрачиваемой мощности, $N_{c \max}$, на участке транспортирования снежных частиц $n_q=8$ частиц в зависимости от времени, t

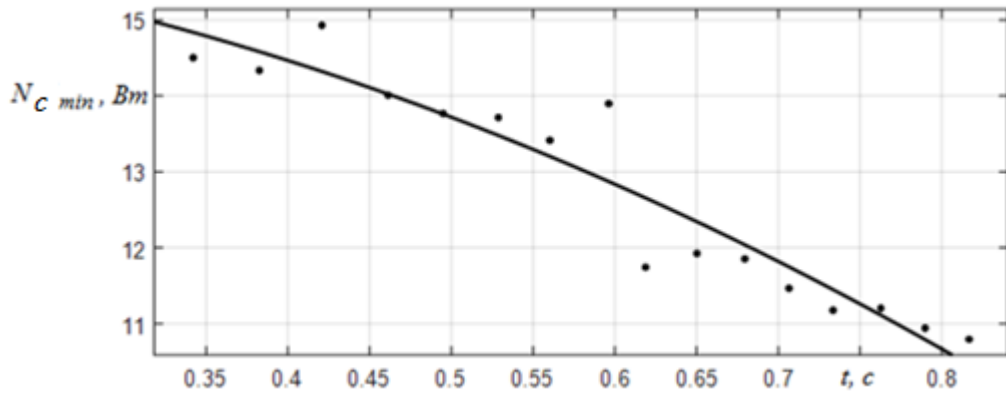


Рисунок 3.23 – Изменение минимальных суммарных значений затрачиваемой мощности, $N_{c \min}$, на участке транспортирования снежных частиц $n_q=8$ частиц в зависимости от времени, t

Важное практическое значение для создания РСО имеют значения сил нормальных реакций действующих на элементы их рабочих органов. На рисунках 3.24, ..., 3.26 представлены изменения значений суммарной силы нормальной реакции боковой поверхности захода ленты фрезы питателя РСО, $N_{c \phi i}$, в зависимости от положения ее участка, непосредственно транспортирующего снежную массу, вдоль оси вращения фрезы, u_ϕ .

Изменения значений суммарной силы нормальной реакции поверхности основания питателя РСО, $N_{c \psi i}$, в зависимости от координаты по оси $O_\phi Y_\phi$, и количества транспортируемых частиц, n_q , представлено на рисунках 3.27, ..., 3.30.

Для обеспечения непосредственного перехода к определению конструктивных параметров элементов рабочего оборудования, необходимы соотношения, определяющие текущие величины нагрузок от действующих сил нормальных реакций транспортируемых снежных частиц на всем интервале их движения. Таким образом, кроме временного осреднения, необходимо провести пространственное осреднение значений сил нормальных реакций.

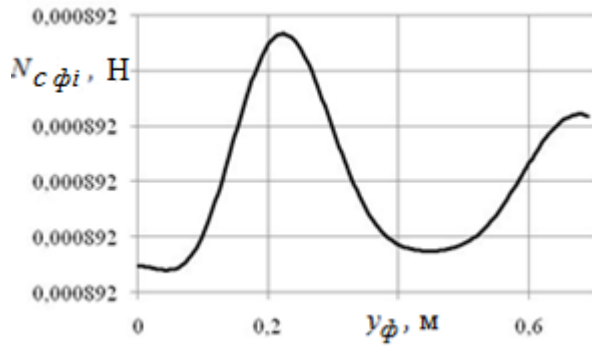


Рисунок 3.24 – Изменение значений суммарной силы нормальной реакции боковой поверхности фрезы питателя, $N_{c\phi i}$, при транспортировании изолированной снежной частицы в зависимости от ее положения вдоль оси вращения фрезы, y_{ϕ}

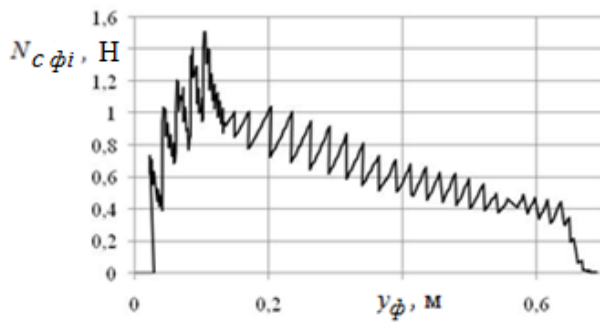


Рисунок 3.26 – Изменение значений суммарной силы нормальной реакции боковой поверхности фрезы питателя, $N_{c\phi i}$, при транспортировании группы снежных частиц, $n_i=6$, в зависимости от ее положения вдоль оси вращения фрезы, y_{ϕ}

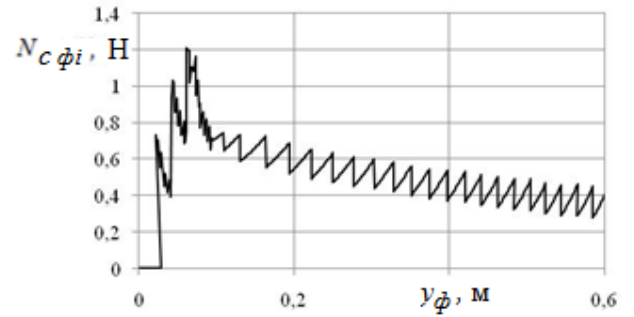


Рисунок 3.25 – Изменение значений суммарной силы нормальной реакции боковой поверхности фрезы питателя, $N_{c\phi i}$, при транспортировании группы снежных частиц, $n_i=4$, в зависимости от ее положения вдоль оси вращения фрезы, y_{ϕ}

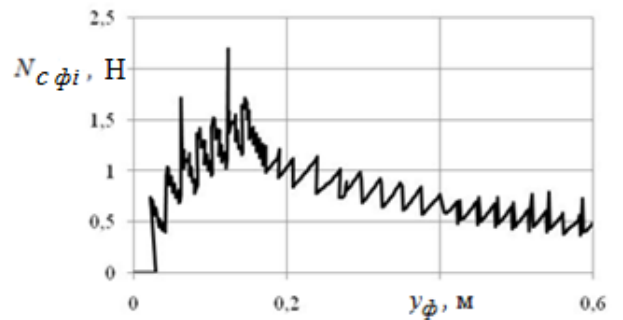


Рисунок 3.27 – Изменение значений суммарной силы нормальной реакции боковой поверхности фрезы питателя, $N_{c\phi i}$, при транспортировании группы снежных частиц, $n_i=8$, в зависимости от ее положения вдоль оси вращения фрезы, y_{ϕ}

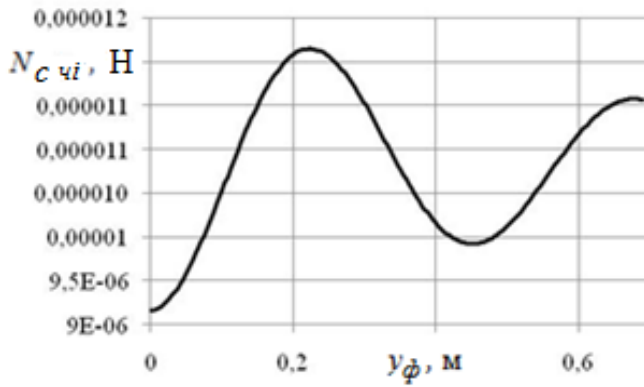


Рисунок 3.28 – Изменение значений суммарной силы нормальной реакции основания питателя, $N_{c\ \dot{c}i}$, при транспортировании изолированной снежной частицы в зависимости от координаты по оси $O_{\phi}Y_{\phi}$

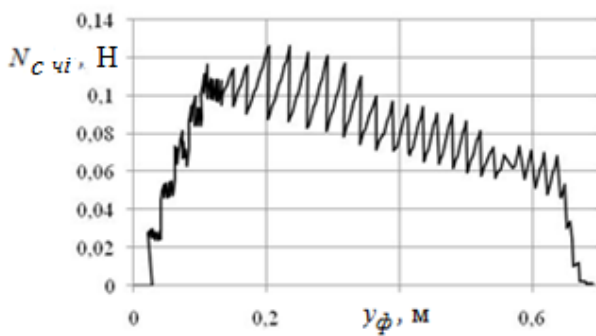


Рисунок 3.30 – Изменение значений суммарной силы нормальной реакции основания питателя, $N_{c\ \dot{c}i}$, при транспортировании группы снежных частиц, $n_q=6$, в зависимости от координаты по оси $O_{\phi}Y_{\phi}$,

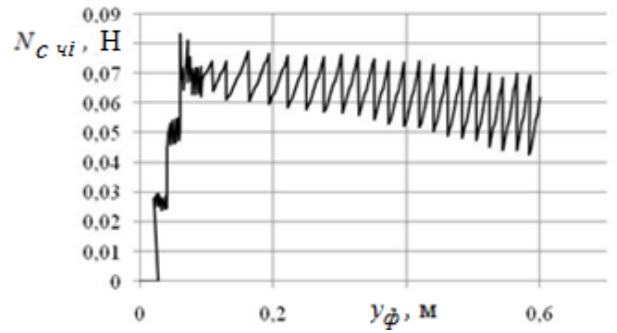


Рисунок 3.29 – Изменение значений суммарной силы нормальной реакции основания питателя, $N_{c\ \dot{c}i}$, при транспортировании группы снежных частиц, $n_q=4$, в зависимости от координаты по оси $O_{\phi}Y_{\phi}$

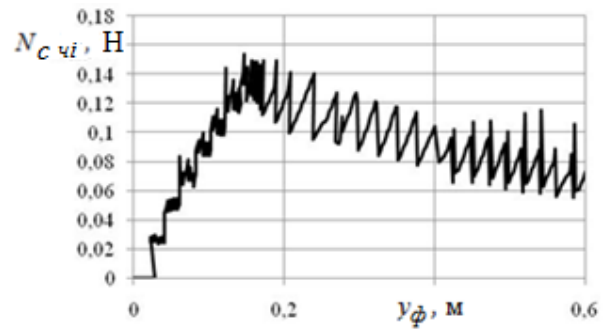


Рисунок 3.31 – Изменение значений суммарной силы нормальной реакции основания питателя, $N_{c\ \dot{c}i}$, при транспортировании группы снежных частиц, $n_q=8$, в зависимости от координаты по оси $O_{\phi}Y_{\phi}$,

Для этого построим проекцию цилиндрической поверхности питателя на плоскость, $O_{\phi}X_{\phi}Y_{\phi}$, на которой проведем разбиение области, где наблюдается взаимодействие транспортируемых частиц с рабочей поверхностью основания питателя.

Внутри каждой области осуществим пространственное осреднение значений действующих сил нормальных реакций, $N_{nc\ \dot{c}i}$, и таким образом получим поверхность, определяющую нагрузку на элемент рабочего оборудования в каждый момент времени.

Границами области действия сил на поверхности питателя, в принятой системе координат, $O_\phi X_\phi Y_\phi$, являются:

$$-\frac{\pi}{2}R_\phi \leq x_\phi \leq 0,$$

$$0 \leq y_\phi \leq \frac{B}{2}.$$

Размер ячейки сетки, принимаем равным характерному размеру, r_{ci} , транспортируемой снежной частицы. На рисунках 3.32 и 3.33 представлены результаты пространственного осреднения значений сил нормальных реакций на примере ленты фрезы для, $n_q=6$ и, $n_q=8$.

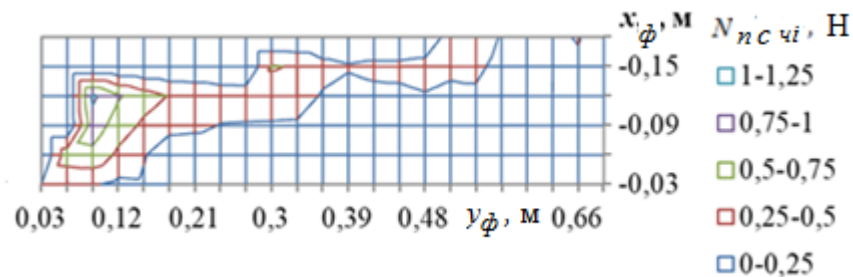


Рисунок 3.32 – Осредненные значения силы нормальной реакции задней стенки питателя, $N_{nc\ \dot{c}i}$, при транспортировании группы снежных частиц, $n_q=6$, в плоскости $O_\phi X_\phi Y_\phi$

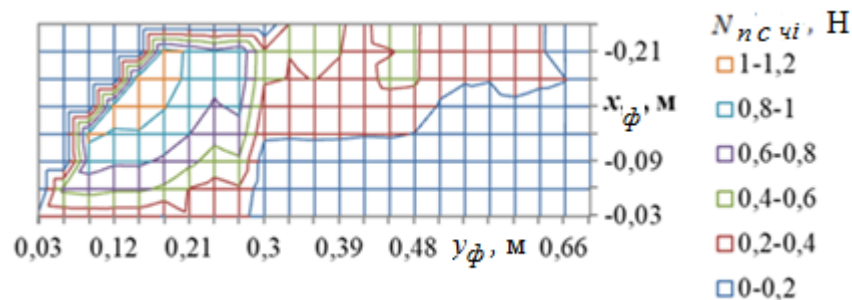


Рисунок 3.33 – Осредненные значения силы нормальной реакции задней стенки питателя, $N_{nc\ \dot{c}i}$, при транспортировании группы снежных частиц, $n_q=8$, в плоскости $O_\phi X_\phi Y_\phi$

На представленных изображениях (см рисунки 3.32, 3.33) хорошо прослеживаются участки захвата снежных частиц и их транспортирований. Виден дрейф максимальных значений силы, N_{ci} , обусловленный подъемом частиц по поверхности основания, в процессе их транспортирования. «Пилообразный» характер изменения величины силы, N_{ci} , (см. рисунок 3.32) отсутствует, что говорит о том, что в ячейках принятого размера в каждый момент времени на рабочую плоскость действует несколько частиц, а их количество, n_c , не достаточно для их активного взаимодействия.

Произведем оценку влияния количества рабочих элементов в рабочем органе на примере числа заходов, n_z , фрезы питателя РСО. Результаты вычислений суммарной мощности, N_c , для случая транспортирования изолированной частицы радиусом, $r_q=0,01$ м, в питателе РСО, представлены на рисунке 3.34.

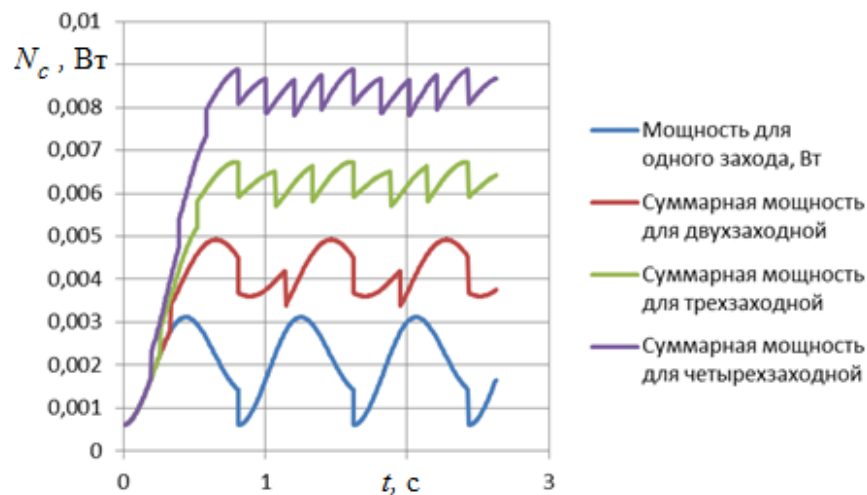


Рисунок 3.34 – Изменение суммарной мощности, N_c , фрезы питателя по времени, t , при транспортировании изолированной частицы для различного числа заходов фрезы, n_z

Изменение осредненных по всему интервалу времени значений мощностей, N_{cp} , для фрез с различным числом заходов, n_z , для случая транспортирования изолированной и двух частиц представлены на рисунке 3.35.

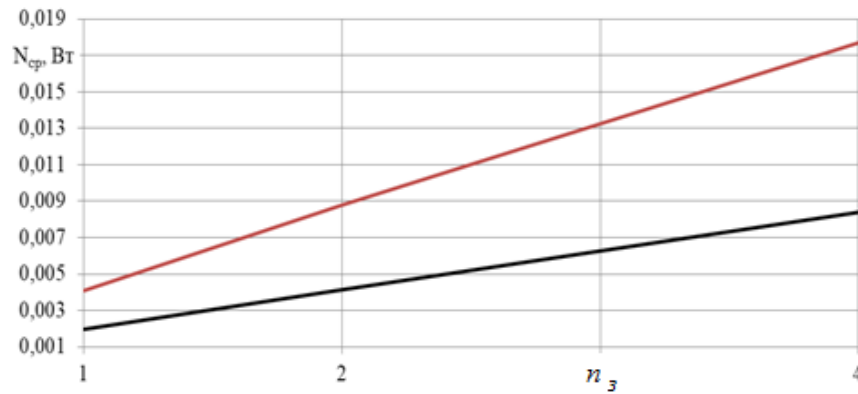


Рисунок 3.35- Изменение средних значений мощностей, N_{cp} , для фрезы с различным числом, $n_з$, заходов: черный – изолированная частица; красный – $n_q=2$

Изменение производительности, Π , от числа заходов, $n_з$, и количества транспортируемых частиц, n_q , представлено на рисунке 3.36.

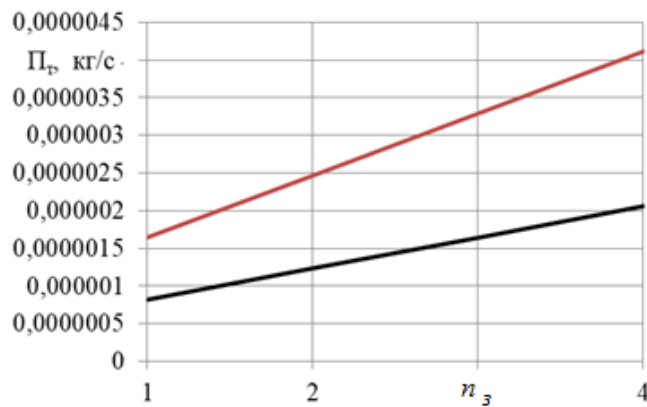


Рисунок 3.36 - Изменение производительности, Π , для фрез с различным числом, $n_з$, заходов и количеством транспортируемых частиц : черный – изолированная частица; красный – $n_q = 2$

Таким образом, на примере типового ФРС продемонстрированы основные инструменты получения численных значений количественных показателей эффективности рабочего оборудования PCO.

3.3. Теоретическое исследование влияния характерного размера транспортируемых снежных частиц на показатели эффективности работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей

Рассмотрим влияние характерных размеров транспортируемых частиц, r_{ci} , на показатели эффективности рабочего оборудования РСО. Исходные данные соответствуют данным представленным в таблице 3.1 и являются фиксированными параметрами, за исключением:

- радиус частиц варьировался в диапазоне, $r_{ci} = 0,005 \dots 0,04$ м, с шагом 0,005. В работе [66] указывается, что средним значением радиуса частиц снега при выбросе из питателя, являются значения в указанном диапазоне, в работе [140] также описывается распределения частиц в указанном диапазоне;

- число заходов фрезы, $n_3 = 3$.

В процессе вычислений определялись мгновенные значения, координат, проекций векторов скоростей транспортируемых частиц, значений сил нормальных реакций опорной поверхности, N_{ci} , и боковой поверхности, $N_{\phi i}$, мощности затрачиваемой на транспортирование каждой снежной частицы, N_i , за все время вычислительного цикла. В результате расчетов получаются большие массивы данных, которые непрерывно изменяются. Для выявления закономерностей и характерных особенностей работы оборудования и поведения транспортируемой снежной массы, для каждого набора значений проводилось определение базовых статистических характеристик в программе Statistica [1, 33, 34], а также пространственное и временное осреднение по схемам, описанным в п. 3.1, 3.2. На рисунках 3.37 - 3.42 изображены картограммы средних значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc\ ci}$, и боковой поверхности, $N_{nc\ \phi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{ci}=0,03, 0,02$ и $0,015$ м, соответственно. Данные картограммы построены по результатам пространственного осреднения результатов вычислений. На рисунках 3.43 - 3.48 представлены суммарные значения сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{c\ ci}$, и боковой поверхности, $N_{c\ \phi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{ci}=0,03$ м и $0,015$ м,

соответственно, осредненные по времени, t . Интервал осреднения по времени, t , соответствовал одному полному обороту фрезы, а также среднее значение, $N_{ср\ \psi_i}$, $N_{ср\ \phi_i}$, по всему рассматриваемому интервалу времени.

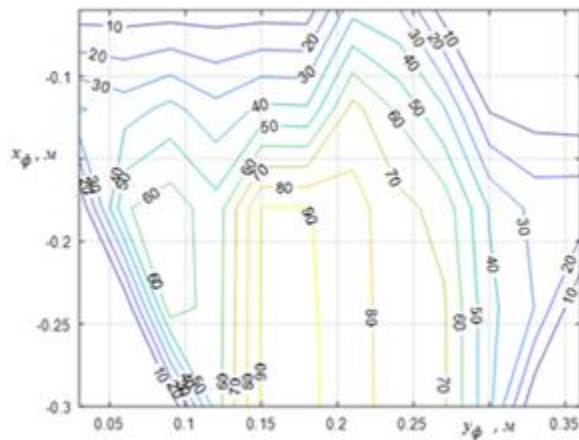


Рисунок 3.37 – Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc\ \psi_i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\psi_i}=0,03$ м

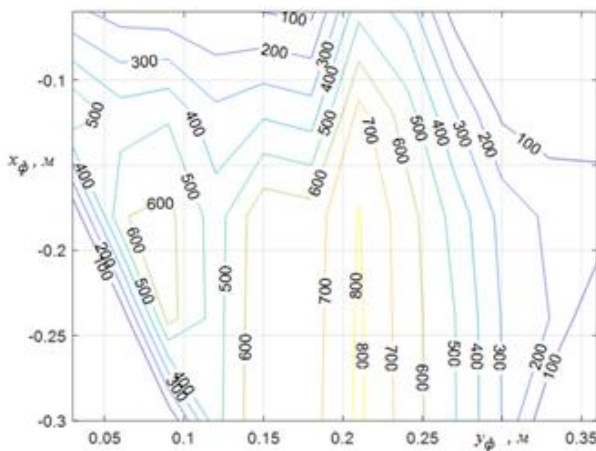


Рисунок 3.38 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc\ \phi_i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\psi_i}=0,03$ м

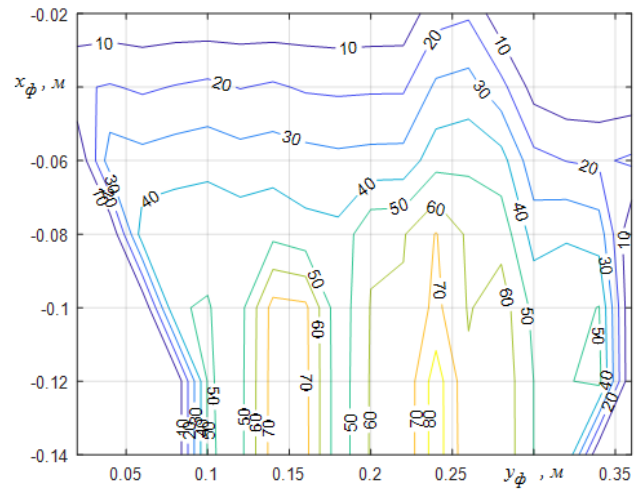


Рисунок 3.39 – Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc\ \psi_i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\psi_i}=0,02$ м

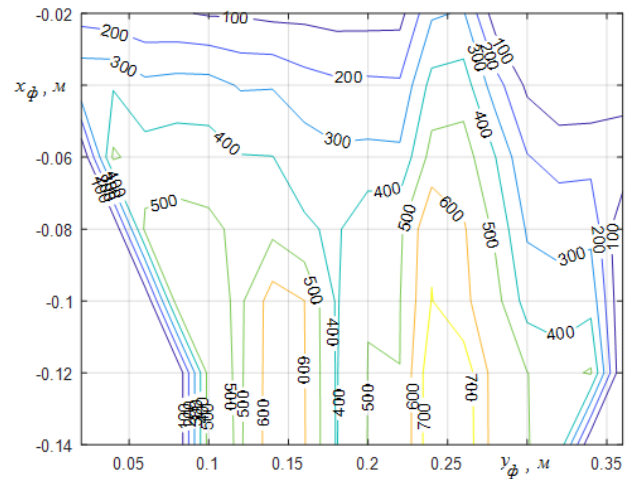


Рисунок 3.40 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc\ \phi_i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\psi_i}=0,02$ м

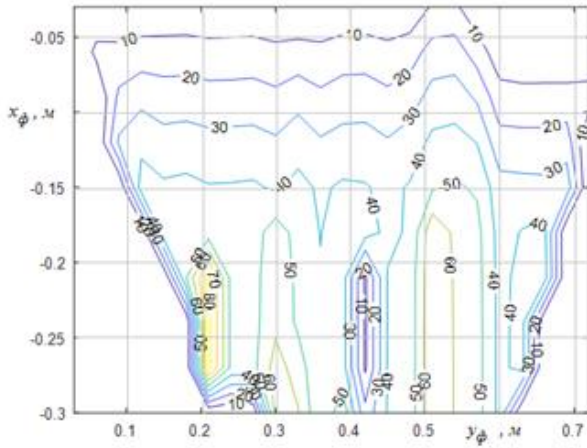


Рисунок 3.41 – Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc \phi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i}=0,015$ м

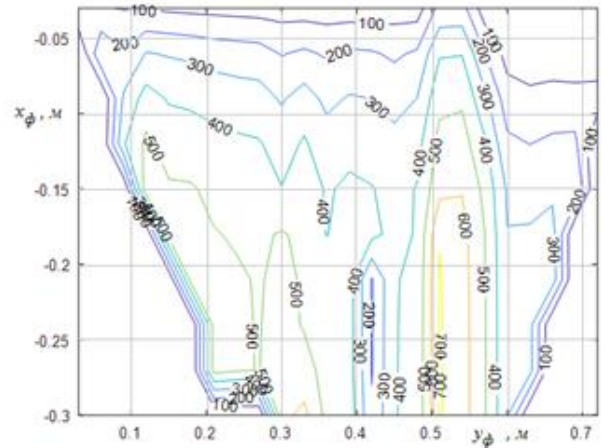


Рисунок 3.42 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc \phi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i}=0,015$ м

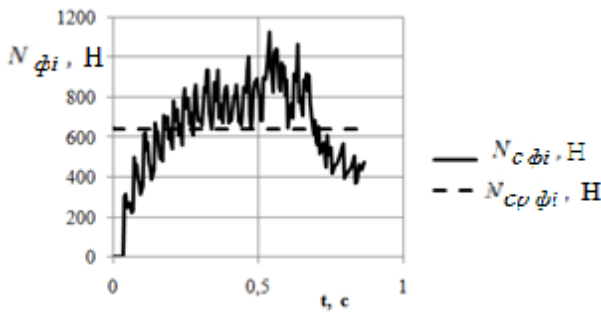


Рисунок 3.43 – Суммарные значения сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{c \phi i}$, и их среднего значения, $N_{cp \phi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i}=0,015$ м

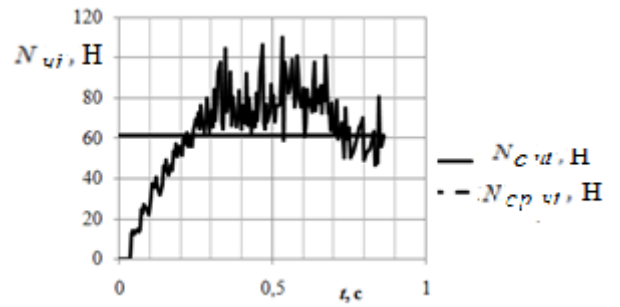


Рисунок 3.45 – Суммарные значения сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{c \chi i}$, и их среднего значения, $N_{cp \chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i}=0,015$ м

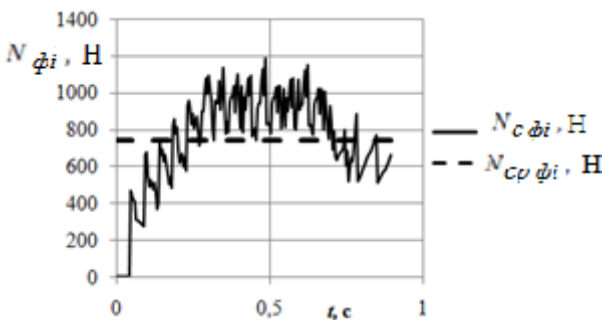


Рисунок 3.44 – Суммарные значения сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{c \phi i}$, и их среднего значения, $N_{cp \phi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i}=0,02$ м

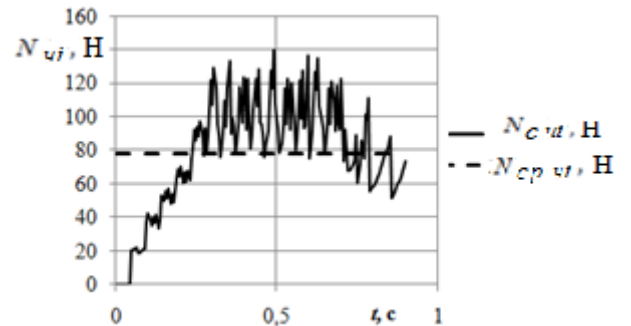


Рисунок 3.46 – Суммарные значения сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{c \chi i}$, и их среднего значения, $N_{cp \chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i}=0,02$ м

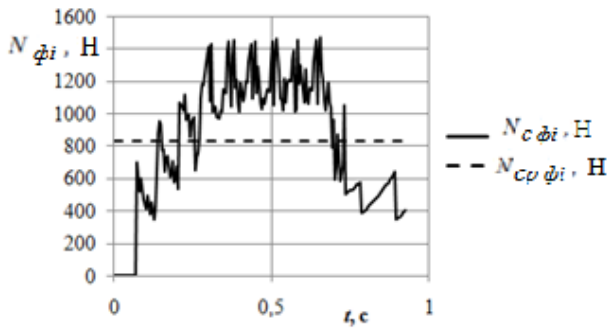


Рисунок 3.47 – Суммарные значения сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{c \phi i}$, и их среднего значения, $N_{cp \phi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\phi i}=0,03$ м

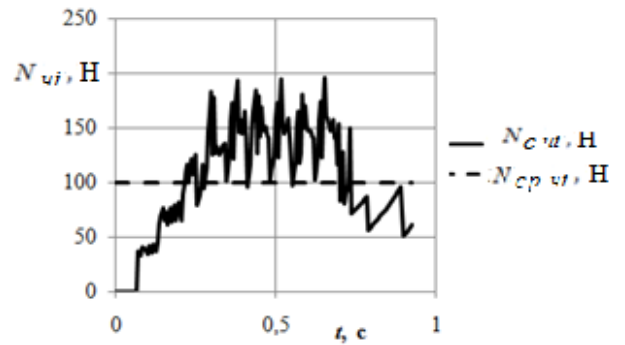


Рисунок 3.48 – Суммарные значения сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{c \psi i}$, и их среднего значения, $N_{cp \psi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\psi i}=0,03$ м

Сравнение осредненных значений по пространству (см. рисунки 3.37, ..., 3.42) и средних суммарных значений по времени (см. рисунки 3.43, ..., 3.48) как для опорной, так и для боковой поверхностей рабочего оборудования РСО, демонстрируют следующую закономерность:

$$N_{cp \psi i} \approx N_{nc \psi i}^{max},$$

$$N_{cp \phi i} \approx N_{nc \phi i}^{max}.$$

Для значений сил нормальной реакции фрезы, $N_{nc \phi i}$, максимальное относительное превышение составило 8,6%, для силы нормальной реакции опорной поверхности, $N_{nc \psi i}$ – 11,8%, при транспортировании частиц характерного размера, $r_{\psi i}=0,015$ м. При этом просматривается тенденция – с уменьшением характерного размера транспортируемых частиц отклонение растет. Исходя из этого, следует ожидать, что при увеличении точности осреднения и учета всех расчетных значений, равенства осредненных по времени средних значений, $N_{cp \phi i}$, $N_{cp \psi i}$, и максимальных значений, полученных в результате осреднения по пространству, $N_{nc \phi i}^{max}$, $N_{nc \psi i}^{max}$, соответственно.

Так же необходимо отметить смещение максимумов сил нормальных реакций опорной поверхности и боковой поверхности рабочего органа относительно друг друга. Из графиков следует, что наибольшую нагрузку создают вышележащие снежные частицы, транспортируемой снежной массы.

Установлено, что при $r_{ci} > 0,032$ м, верхние частицы выходят за пределы питателя.

Одним из основных выводов, по описанным выше результатам, является то, что осреднение по пространству является актуальным для инженерных расчетов элементов рабочего оборудования, так как оно задает распределение значений действующих сил, однако в процессе осреднения по пространству происходит сглаживание пиковых значений. Пиковые значения действующих сил получаются в результате непосредственного расчета по времени, t , и на их значения не влияет количество заходов ленты фрезы, n_3 , таким образом можно считать, что каждый заход работает независимо друг от друга.

На рисунках 3.49 и 3.50 представлены зависимости максимальных средних значений сил нормальных реакций боковой, $N_{nc\ \phi i}^{max}$, и опорной поверхности, $N_{nc\ \psi i}^{max}$ питателя РСО.

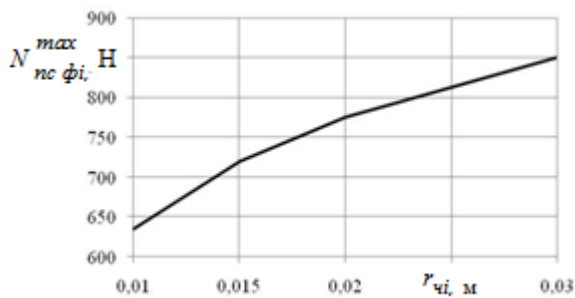


Рисунок 3.49 – Зависимость максимального значения силы нормальной реакции боковой поверхности фрезы питателя, $N_{nc\ \phi i}^{max}$, от характерного размера транспортируемых частиц, r_{ci}

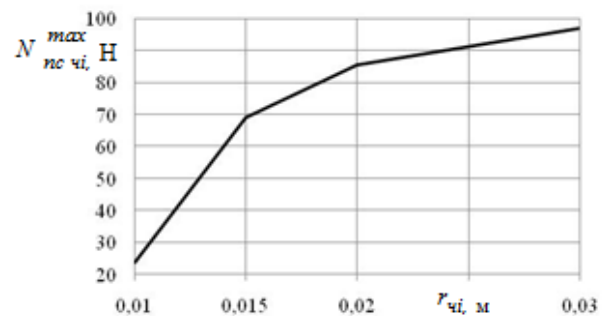


Рисунок 3.50 – Зависимость максимального значения силы нормальной реакции опорной поверхности питателя, $N_{nc\ \psi i}^{max}$, от характерного размера транспортируемых частиц, r_{ci}

Влияние размера транспортируемых частиц, проявляется в увеличении значений сил нормальных реакций, действующих как на опорную поверхность, так и на боковую поверхность, при увеличении характерного размера частиц, r_{ci} .

На рисунках 3.51 – 3.53 представлены изменения суммарной мощности, N_c , затрачиваемой на транспортирование снежных частиц в питателе РСО с

характерными размерами снежных частиц, $r_{qi} = 0,015, 0,02, 0,03$ м, соответственно, для одного цикла однозаходной фрезы.

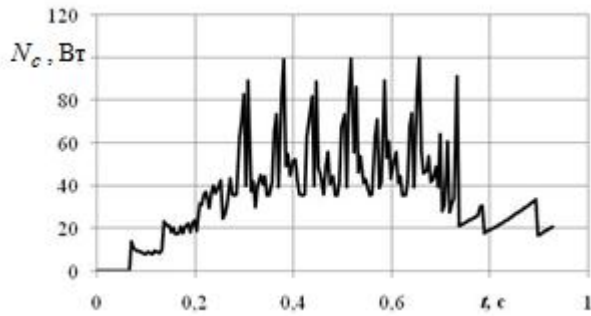


Рисунок 3.51 – Суммарные значения затрачиваемой мощности, N_c , на транспортирование группы снежных частиц, $r_{qi} = 0,03$ м, от времени, t

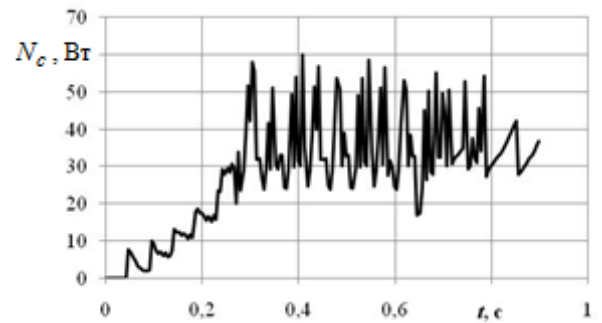


Рисунок 3.52 – Суммарные значения затрачиваемой мощности, N_c , на транспортирование группы снежных частиц, $r_{qi} = 0,02$ м, от времени, t

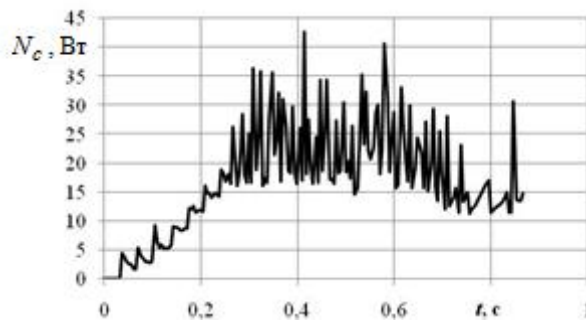


Рисунок 3.53– Суммарные значения затрачиваемой мощности, N_c , на транспортирование группы снежных частиц, $r_{qi} = 0,015$ м, от времени, t

На рисунке 3.54 представлена картограмма изменения суммарной мощности, N_c , в процессе транспортирования снежных частиц в зависимости от их характерного размера частиц, r_{qi} , за время, t , одного полного цикла, однозаходной фрезы.

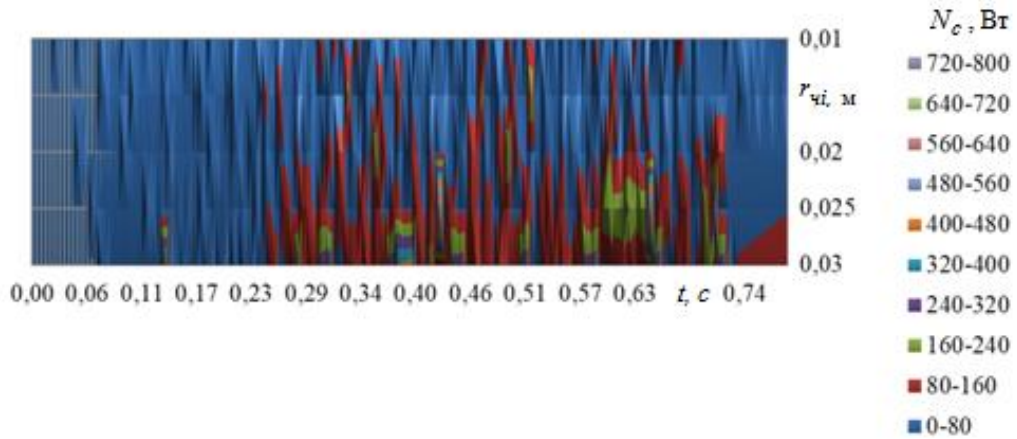


Рис. 3.54 - Изменение суммарной мощности, N_c , в процессе транспортирования снежных частиц питателе ФРС в зависимости от характерного размера транспортируемых частиц, $r_{\chi i}$ (вид сверху).

На рисунках 3.55, 3.56 и 3.57 представлено изменение суммарных затрат мощности, N_c , в зависимости от времени, t , и средних суммарных затрат мощности, N_{cp} , для трехзаходной фрезы, с углом захода ленты фрезы $\theta=20^0$ и угловой скорости $\omega_\phi=8$ рад/с, при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{\chi i}=0,015, 0,02, 0,03$ м, соответственно, без учета переходных процессов.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что увеличение характерного размера, $r_{\chi i}$, транспортируемых частиц снежной массы приводит к увеличению как средних, N_{cp} , так и максимальных значений, N_{max} , мощности. В таблице 3.4 представлены базовые статистические характеристики затрат мощности, N_c , в зависимости от числа заходов, n_z , и характерного размера частиц, $r_{\chi i}$, транспортируемой снежной массы.

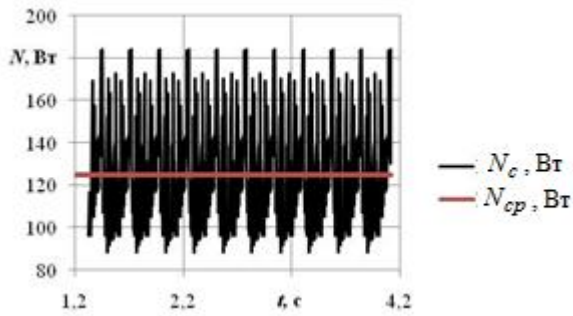


Рисунок 3.55 – Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для трехзаходной фрезы при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{\chi i} = 0,03$ м, в зависимости от времени

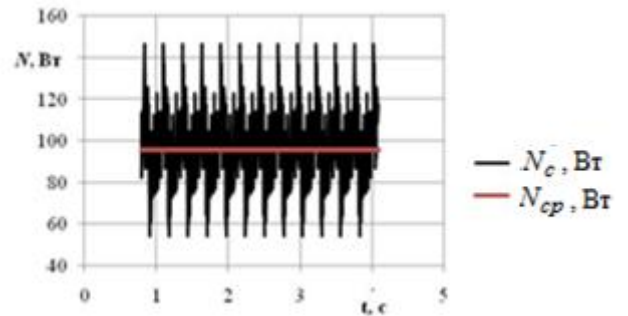


Рисунок 3.56 – Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для трехзаходной фрезы при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{\chi i} = 0,02$ м, в зависимости от времени

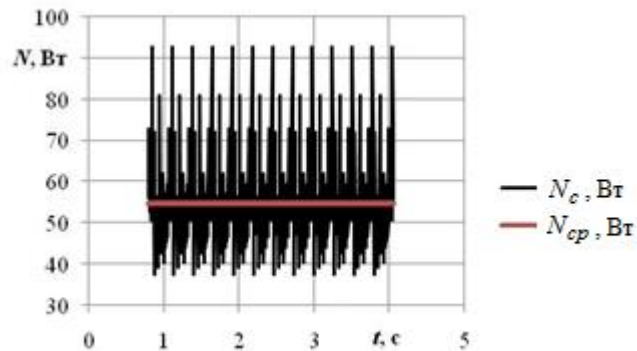


Рисунок 3.57 – Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для трехзаходной фрезы при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{\chi i} = 0,015$ м, в зависимости от времени

Продолжительность переходного процесса, t_n , в питателе РСО определяется интервалом времени, после которого в затратах мощности, N , на транспортирование снежной массы фрезой наблюдаются установившиеся значения их изменений. При работе фрезы питателя, после прохождения переходного процесса, установившиеся значения изменений потребляемой мощности, N , носят периодический характер (рисунок 3.58). Продолжительность переходного периода, t_n , для фрезы питателя РСО может быть определена из соотношения [114]:

$$t_n = \frac{2 \cdot \pi}{n_3 \cdot \omega_\phi} \quad (3.18)$$

На рисунке 3.59 представлено изменение продолжительности переходного периода, t_n , фрезы питателя РСО в зависимости от числа заходов фрезы, n_3 , и ее угловой скорости вращения, ω_ϕ .

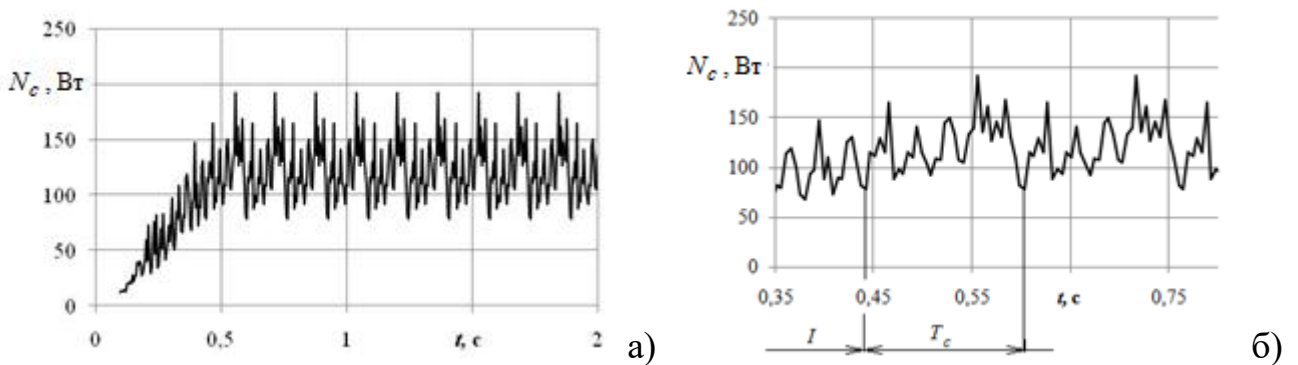


Рисунок 3.58 – Изменение суммарных затрат мощности, N_c , во времени, t , при транспортировании снежных частиц с характерным размером, $r_{ci}=0,015$ м, фрезой с углом захода, $\theta=20^\circ$ и угловой скоростью, $\omega_\phi=12$ рад/с: а) общий вид изменений, N_c ; б) изменения, N_c , в интервале времени t от 0,35 до 0,75 с, где I – переходный процесс, T_c – период, характеризующий начало периодического процесса, изменения суммарных затрат мощности, N_c

Выражение полиномиальной аппроксимации суммарных средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от характерного размера частиц, r_c , и числа заходов, n_3 , имеет вид:

$$N_{cp} = 122,1 + 39,51 \cdot n_3 + 41,98 \cdot r_{ci} - 15,03 \cdot n_3^2 + 16,24 \cdot n_3 \cdot r_{ci} - 8,68 \cdot r_c^2 - 8,27 \cdot n_3^2 \cdot r_{ci} - 2,4 \cdot n_3 \cdot r_c^2 + 5,72 \cdot r_{ci}^3 \quad (3.19)$$

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

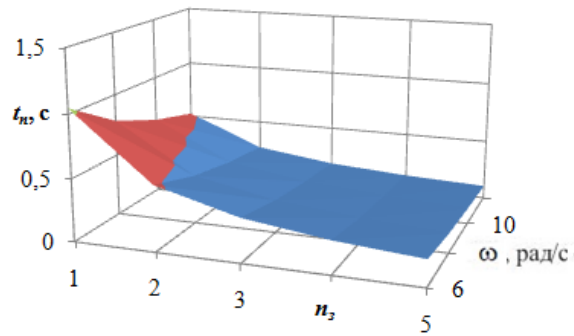


Рисунок 3.59 – Продолжительность переходного периода, t_n , фрезы питателя роторного снегоочистителя в зависимости от числа заходов фрезы, n_z , и ее угловой скорости вращения, ω_ϕ

Необходимо отметить, что выборки суммарных значений потребляемой мощности по группам транспортируемых частиц, используемых для осреднения потребляемой мощности на стационарном режиме, достаточно хорошо описываются нормальным законом распределения. На рисунках 3.60, 3.61 представлены примеры гистограмм частот и кривых ожидаемых законов распределения.

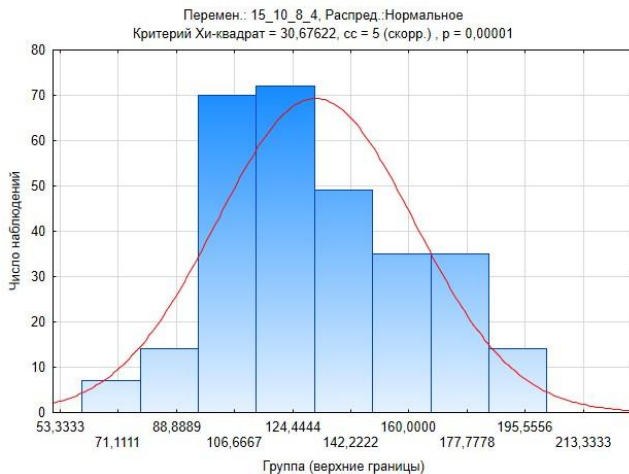


Рисунок 3.60 – Гистограмма частот и кривая ожидаемого закона распределения суммарных затрат мощности, N_c , для четырехзаходной фрезы при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,015$ м

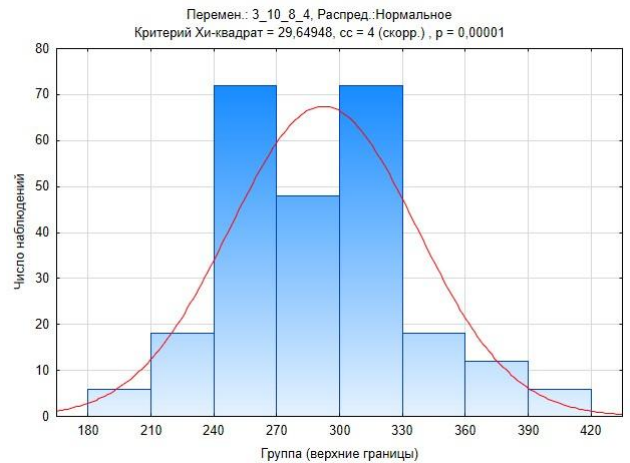


Рисунок 3.61 – Гистограмма частот и кривая ожидаемого закона распределения суммарных затрат мощности, N_c , для четырехзаходной фрезы при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м

Таблица 3.4 - Базовые статистические характеристики затрат мощности, N_c , в зависимости от числа заходов, n_j , и характерного размера частиц, $r_{\text{ч.и}}$, транспортируемой снежной массы

размер частиц, м	число заходов	среднее, Вт	среднеквадратическое, Вт	несмещенная асимметрия, Вт	несмещенный эксцесс, Вт	медиана, Вт	размах, Вт	максимальное значение, Вт	минимальное значение, Вт
0,03	1	53,599	17,9388	1,0681	3,1236	47,5359	64,2182	99,6147	35,3965
	3	124,67	26,3945	0,5678	2,278	120,729	95,2515	183,7224	88,4709
	4	166,096	28,8815	0,2539	2,3089	165,508	123,355	238,7708	115,4162
	5	204,855	29,8984	0,2843	3,486	203,928	142,989	285,4902	142,5013
	1	35,8675	10,8821	0,9245	2,5623	31,7609	36,2386	59,8029	23,5643
0,02	3	95,4297	19,3659	0,236	2,8339	92,891	92,4777	146,3687	53,8909
	4	126,958	20,4578	0,6385	2,8556	124,376	82,3679	174,3218	91,9538
	5	156,353	19,5314	0,5161	3,3543	153,829	94,1433	209,1858	115,0527
	1	23,6744	7,0581	0,7727	2,665	2,3419	28,1102	42,6228	14,5126
	3	54,6603	10,8037	1,2435	4,7201	51,6959	55,268	92,7213	37,4532
0,015	4	72,7882	11,5058	1,1064	4,9096	70,9672	57,4061	110,4574	53,0513
	5	89,8705	12,6384	0,4183	3,112	90,7376	56,1513	123,8767	67,7254

На рисунке 3.62 представлена поверхность описываемая уравнением (3.19) с точками значений суммарных средних затрат мощности, N_{cp} , по которым проводилась полиномиальная аппроксимация.

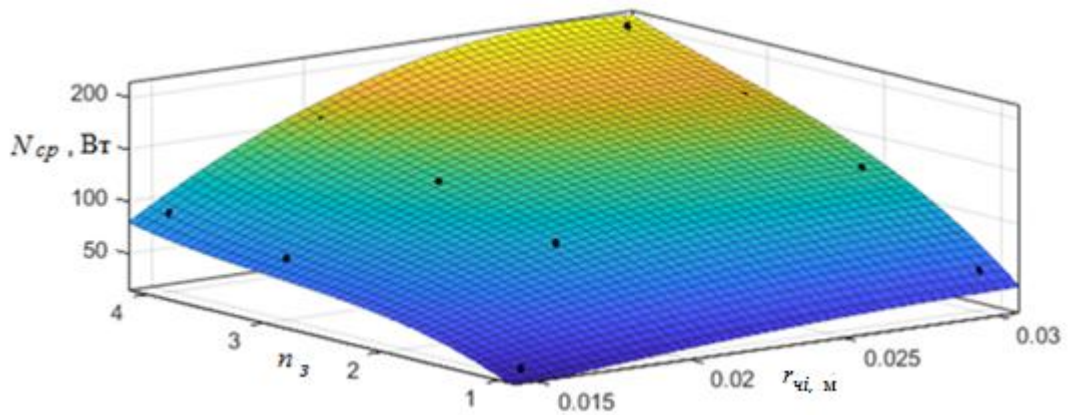


Рисунок 3.62 – Суммарные средние затраты мощности, N_{cp} , в зависимости от числа заходов фрезы, n_z , и характерного размера частиц, $r_{\chi i}$, транспортируемой снежной массы

Суммарные средние затраты мощности, N_{cp} , изменяются непропорционально характерным размерам частиц. Увеличение характерного размера частиц, $r_{\chi i}$, транспортируемой снежной массы приводит к росту потребляемой мощности фрезой питателя ФРС. Аналогичная тенденция наблюдается и в случае увеличения числа заходов, n_z .

Однако, наряду с потребляемой мощностью, N , как указывалось выше, необходимо учитывать еще производительность, Π , рабочего оборудования РСО.

Выражение полиномиальной аппроксимации суммарных средних значений производительности, Π_{cp} , в зависимости от характерного размера частиц, $r_{\chi i}$, и числа заходов, n_z , имеет вид:

$$\begin{aligned} \Pi_{cp} = & 2,307 - 1,875 \cdot n_z + 0,889 \cdot r_{\chi i} + 0,682 \cdot n_z^2 - 1,09 \cdot n_z \cdot r_{\chi i} - 0,504 \cdot r_{\chi i}^2 + \\ & + 0,632 \cdot n_z^2 \cdot r_{\chi i} - 0,298 \cdot n_z \cdot r_{\chi i}^2 - 0,048 \cdot r_{\chi i}^3 \end{aligned} \quad (3.20)$$

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

Поверхность, описываемая уравнением (3.20) с точками значений суммарной средней производительности, по которым проводилась полиномиальная аппроксимация представлена на рисунке 3.63.

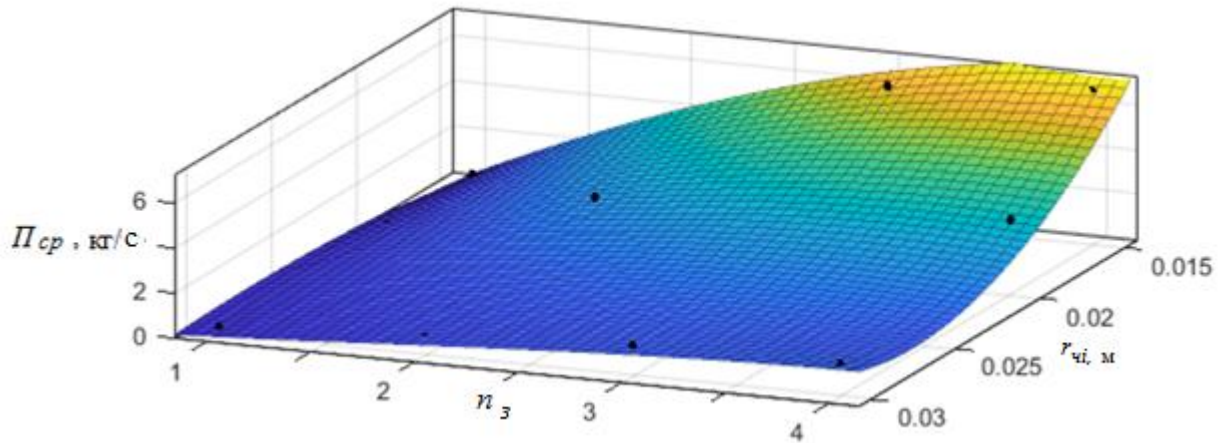


Рисунок 3.63– Суммарная средняя производительность, P_{cp} , в зависимости от числа заходов фрезы, n_z , и характерного размера частиц, $r_{чi}$, транспортируемой снежной массы

Был проведен сравнительный анализ выражения суммарных средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от характерного размера частиц, $r_{чi}$, и числа заходов, n_z , (3.19) и затрат мощности, кВт, на вырезание и транспортирование снега в питателе ФРС по существующей методике (см. таблица 1.1), при заданной производительности, конструктивных и технологических параметрах РСО, представленных в таблице 3.1. Относительное расхождение, e , отн. ед., в полученных результатах представлено на рисунке 3.64.

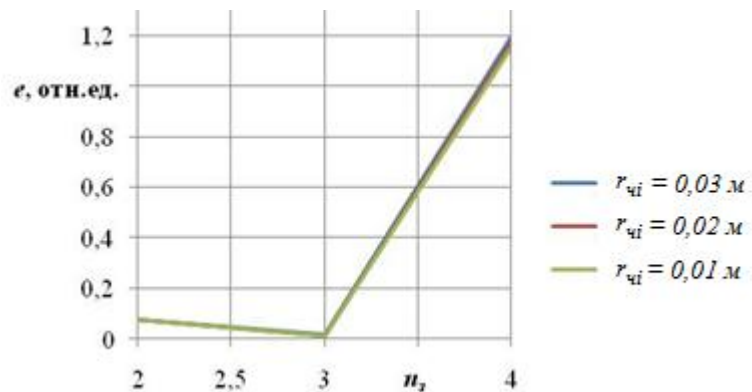


Рисунок 3.64 – Относительное расхождение результатов вычисления необходимой мощности для транспортирования снежной массы в питателе ФРС вычисленное по формуле (3.18) и существующей методике (см. таблица 1.1)

При значениях числа заходов фрезы питателя равных $n_z=2$ и 3 относительная погрешность, e , не превышает 10%. При $n_z=4$ значения, вычисленные по (3.19)

дают заниженные значения по сравнению с теми, которые получаются при использовании выражений, предложенных предыдущими исследователями.

Увеличение характерного размера частиц, r_{ci} , транспортируемой снежной массы приводит к снижению производительности, $П_{cp}$, с увеличением числа заходов, n_3 . В свою очередь, увеличение числа заходов, n_3 , элементов рабочего оборудования обеспечивает монотонное возрастание производительности, $П_{cp}$, однако данный факт требует дополнительных исследований.

Необходимо отметить, что при сравнении общих форм поверхностей, изображенных на рисунках 3.62 и 3.63, наблюдается область не идентичного их поведения, следовательно, используя критерий, описанный в работах [18, 21, 66], можно выделить область максимальной эффективности, с точки зрения энергозатрат к общей производительности рабочего органа. На рисунке 3.65 представлена картограмма зависимости удельных энергозатрат, NP , от характерного размера частиц, r_{ci} , и числа заходов фрезы, n_3 , из которой следует, что наиболее эффективно работает фреза питателя на крупных частицах, $r_{ci} > 0,02$ м, при этом наблюдается область наиболее эффективного числа заходов фрезы. Так при характерном размере частиц, транспортируемой снежной массы, $r_{ci} > 0,02$ м, число заходов, n_3 , обеспечивающих минимум удельной энергоемкости, составляет от 3 до 5.

Влияние характерного размера снежных частиц, r_{ci} , на изменения параметров транспортируемой снежной массы в области загрузочного окна характеризуется координатами положения снежных частиц, их скоростями.

Изменение средней координаты, x_{cp} , по координатам всех транспортируемых частиц, x_{fi} , в области загрузочного окна по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от характерного размера частиц, r_{ci} , транспортируемой снежной массы представлено на рисунке 3.66.

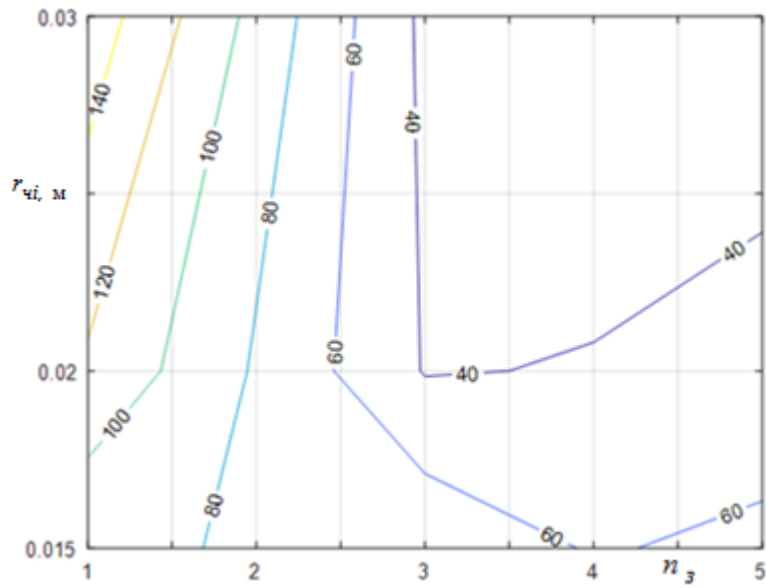


Рисунок 3.65 – Картограмма удельных энергозатрат, NP , в зависимости от размера частиц, $r_{\chi i}$, транспортируемой снежной массы и числа заходов фрезы, n_z

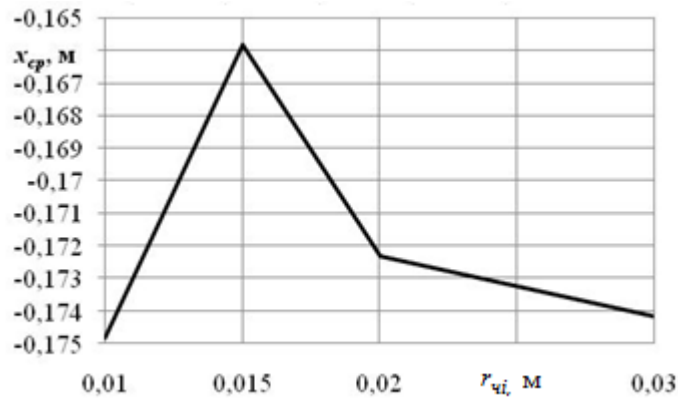


Рисунок 3.66 – Изменение средней координаты, x_{cp} , по координатам всех транспортируемых частиц, x_i , в области загрузочного окна по оси $O_{\phi}X_{\phi}$ в зависимости от характерного размера частиц, $r_{\chi i}$

Из рисунка 3.66 следует, что существует область максимального подъема транспортируемой снежной массы при характерных размерах снежных частиц, $r_{\chi i}$, в диапазоне от 0,012 до 0,02 м.

На рисунках 3.67, 3.68, 3.69 представлены изменения проекций векторов скоростей, v_x , v_y , снежных частиц в области загрузочного окна на оси $O_{\phi}X_{\phi}$ и $O_{\phi}Y_{\phi}$, соответственно, а также величин абсолютных скоростей снежных частиц, v_{abs} , в зависимости от координаты по оси $O_{\phi}X_{\phi}$, при различных характерных размерах снежных частиц, $r_{\chi i}$.

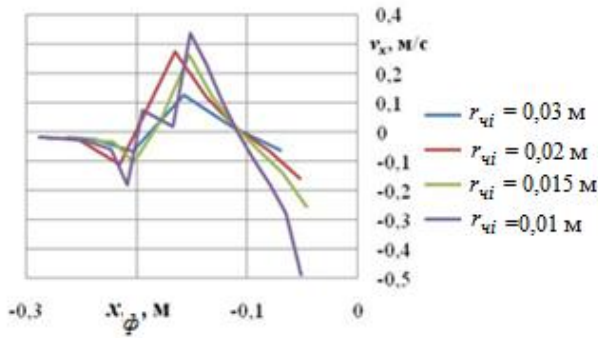


Рисунок 3.67– Изменение величины проекции векторов скоростей снежных частиц, v_x , по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от характерного размера снежных частиц, r_{χ_i}

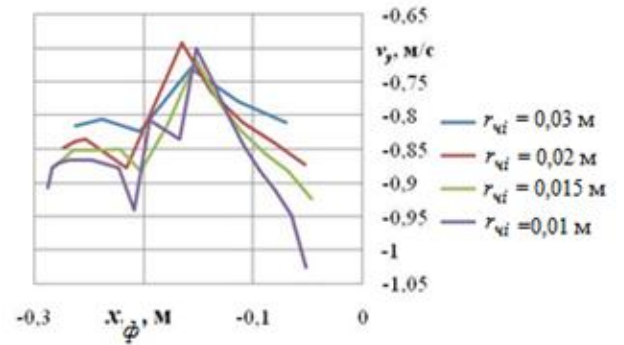


Рисунок 3.68– Изменение величины проекции векторов скоростей снежных частиц, v_y , по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от характерного размера снежных частиц, r_{χ_i}

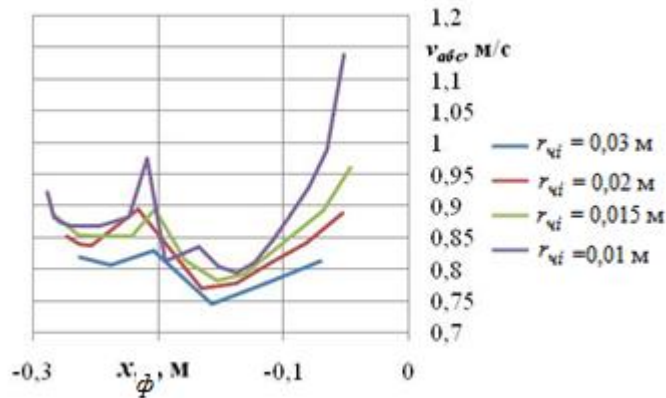


Рисунок 3.69– Изменение величины абсолютных скоростей снежных частиц, v_{abs} , по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от характерного размера снежных частиц, r_{χ_i}

На рисунках 3.67, 3.68, 3.69 прослеживается тенденция: с уменьшением характерного размера частиц, r_{χ_i} , распределение значений проекций скоростей становится более неравномерным, как по v_x , так и по v_{abs} . В средней части транспортируемой снежной массы от 0,1..., 0,2 м по оси $O_\phi X_\phi$, наблюдается спуск частиц снежной массы, обусловленный положительными значениями проекций векторов скоростей на ось $O_\phi X_\phi$, этих частиц, так же величина абсолютной скорости снежных частиц растет. Превышение составляет примерно 7% в верхней части питателя, в нижней оно уже около 11%. В нижней части отвала питателя, фиксируется торможение транспортируемого снежного потока, связанное с трением снежных частиц о разрабатываемый снежный массив.

В результате полиномиальной аппроксимации средних значений проекций векторов скоростей на ось $O_\phi X_\phi$, $v_{x\text{ ср}}$, в зависимости от характерного размера снежных частиц, $r_{\text{чi}}$, получено уравнение описывающее изменение среднего по потоку значения проекций векторов скоростей, v_x , на ось $O_\phi X_\phi$, (рисунок 3.70):

$$v_{x\text{ ср}} = -190,3 \cdot r_{\text{ч}}^2 + 9,314 \cdot r_{\text{ч}} - 0,112. \quad (3.21)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,893$. Изменение носит квадратичный характер.

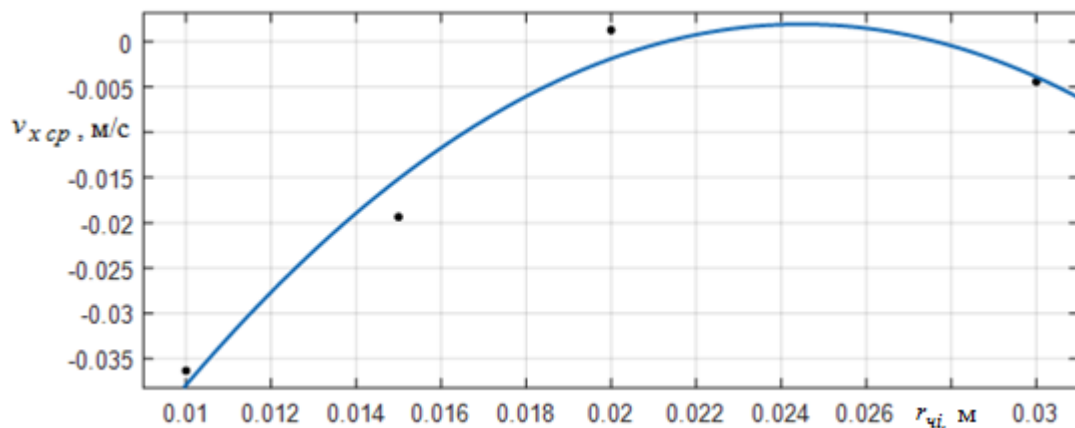


Рисунок 3.70– Полиномиальная аппроксимация средних значений проекций векторов скоростей на ось $O_\phi X_\phi$, $v_{x\text{ ср}}$, в зависимости от характерного размера снежных частиц, $r_{\text{чi}}$,

Уравнение, полученное в результате полиномиальной аппроксимации, изменения средней кинетической энергии, $K_{\text{ср}}$, транспортируемого снежного потока в зависимости от характерного размера транспортируемых частиц, $r_{\text{чi}}$, имеет вид:

$$K_{\text{ср}} = 87,04 \cdot r_{\text{чi}}^2 + 1,231 \cdot r_{\text{чi}} - 0,0068. \quad (3.22)$$

На рисунке 3.71 представлена зависимость средней кинетической энергии транспортируемых снежных частиц в области загрузочного окна, $K_{\text{ср}}$, от характерного размера частиц, $r_{\text{чi}}$.

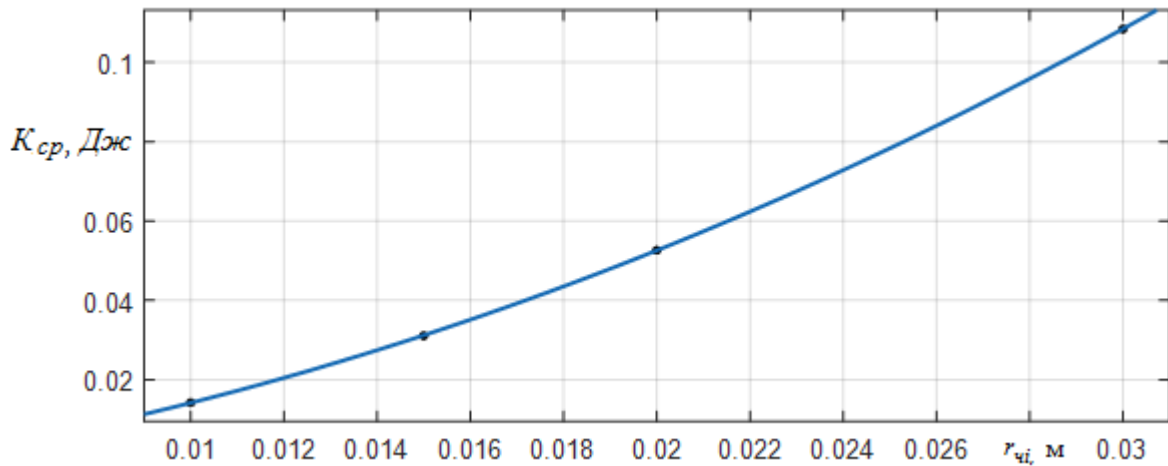


Рисунок 3.71– Зависимость средней кинетической энергии транспортируемых снежных частиц в области загрузочного окна, K_{cp} , от характерного размера частиц, r_{χ_i} ,

Из рисунка 3.71 следует рост кинетической энергии, K_{cp} , транспортируемой снежной массы с увеличением характерного размера снежных частиц, r_{χ_i} , что обусловлено существенным влиянием массы, m , самих снежных частиц, которая возрастает с увеличением размера транспортируемых частиц. Описанная тенденция может являться одной из причин обеспечивающей большую дальность отброса снежной массы по сравнению с частицами малых характерных размеров, r_{χ_i} : рост размера частиц, обеспечивает большую массу, m , и кинетическую энергию, K_{cp} , транспортируемой снежной массы, что позволяет за счет большей средней кинетической энергии, K_{cp} , обеспечить большую дальность отброса, L .

Анализ энергетических соотношений показывает, что следует ожидать уменьшения полной энергии потока для частиц в диапазоне $r_{\chi_i} = 0,02 \dots 0,025$ м, что обусловлено уменьшением потенциальной энергии снежного потока в питателе, за счет уменьшения его средней высоты относительно оси вращения фрезы питателя.

Так же увеличение размеров транспортируемых частиц, r_{χ_i} , приводит к уменьшению средней, $v_{абс, ср}$, по всей группе снежных частиц.

3.4. Теоретические исследования влияния угла захода ленты фрезы на показатели эффективности работы рабочего оборудования роторных снегоочистителей

В соответствие с классификациями [66, 111] маломощные ФРС имеют ширину захвата питателя, B , определяемую по формуле [66] (см. таблица 1.1).

Сложившаяся практика производства фрез питателей РСО использует значение угла захода ленты фрезы в диапазоне $\theta=25\dots30^0$, что для одношаговых фрез маломощных ФРС обеспечивает наименьшее время нахождения вырезанной снежной массы в питателе [17, 43, 66].

В работе [51] дается описание патентов [США № 2751697, Австрия № 206464] на фрезу с переменным углом захода, θ , однако указывается о технологических сложностях такой формы фрезы и об энергетической не оптимальности совмещения процессов резания и транспортирования вырезанной снежной массы в область загрузочного окна метательного аппарата, тем самым постулируя факт наличия оптимального угла захода, θ , для каждого из перечисленных процессов [17]. Затраты мощности на вырезание снежной массы из снежного массива, $N_{\phi 1}$, и ее транспортирование, $N_{\phi 2}$, могут быть определены из выражений, представленных в таблице 1.1 [66].

В работах [33, 43] был проведен сравнительный анализ затрат мощностей, получаемых при использовании указанных уравнений, в зависимости от шага шнека, $T_{ш}$, при фиксированном значении радиуса шнека, $R_{ш}$ [17]. Так производительность, Π , и затраты мощностей $N_{ш1}$, $N_{ш2}$, в зависимости от шага шнека, $T_{ш}$, в интервале 0,23...0,3 м, при радиусе шнека, $R_{ш} = 0,15$ м, имеют вид, изображенный на рисунке 3.72.

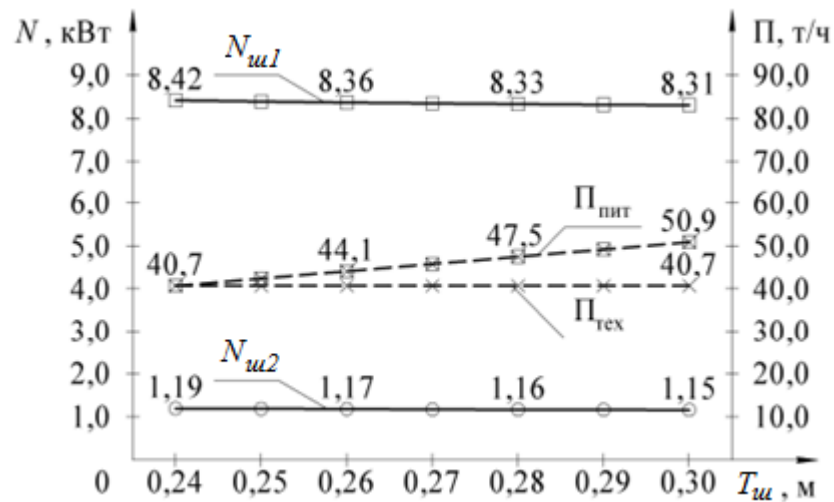


Рисунок 3.72– Зависимости затрат мощностей $N_{ш1}$, $N_{ш2}$, и производительности питателя, $П$, от шага шнека, $T_{ш}$,

В результате было установлено, что величина мощности резания является доминирующей относительно затрат мощности на транспортирование вырезанной снежной массы. Из рисунка 3.72 следует, что с увеличением шага шнека, $T_{ш}$, суммарные затраты мощности на привод шнекового питателя монотонно уменьшаются, и для малогабаритных шнеко-роторных снегоочистителей, оптимальным значением шага шнека будет являться $T_{ш} = 2 \cdot R_{ш}$ [17, 43]. Однако определение поведения многопараметрической функции посредством прямых вычислений является нерациональным и не охватывает всего возможного многообразия значений исследуемой функции.

В работе [131] представлены зависимости влияния шага и высоты ленты шнекового барабана, используемых для тушения лесных пожаров и являющихся аналогичными барабанным фрезам ФРС, на производительность и затраты мощности работы такого рабочего органа, при фиксированных кинематических характеристиках шнековых рабочих органов, из которых следует наличие экстремумов таких функциональных параметров как производительность, так и затраты мощности. При этом использовался метод дискретных элементов [155]. Необходимо отметить, что данный метод так же применяется в исследованиях, где требуется моделирование снега, благодаря своей наглядности и простоты аналитических выражений [17].

Регрессионные уравнения, связывающие затрачиваемую мощность, N , кВт, и производительность, Π , кг/с, от глубины винтового канала, h_k , см, и шага, s , см, полученные в результате имитационного моделирования на ЭВМ, методом дискретных элементов имеют вид [145]:

$$\Pi(h_k, s) = -0,115 \cdot h_k^2 - 0,018 \cdot s^2 - 3,676 \cdot 10^{-3} h_k \cdot s + 3,496 \cdot h_k - 0,473, \quad (3.23)$$

$$N(h_k, s) = 0,083 \cdot h_k^2 + 8,074 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 2,941 \cdot 10^{-3} h_k \cdot s - 0,064 \cdot h_k - 0,539 \cdot s + 14,03 \quad (3.24)$$

Визуализация множества решений описываемых уравнениями (3.23), (3.24), согласно [145] показаны на рисунке 3.73.

Оптимальное значение угла наклона винтовой линии последнего витка шнека волчка-измельчителя к его оси находится в зависимости от производительности, которая является аргументом обратной тригонометрической функции, что позволяет сделать вывод о монотонности изменения возможных значений производительности. При этом теоретические исследования определения характеристик рабочего такого процесса выделяют следующие основные характеристики рабочей среды: коэффициент Пуассона; коэффициент трения [36]. Что касается определения характеристик экструдеров, то здесь теоретические исследования проводятся с использованием законов механики сплошной среды, а мощность, потребляемая приводом шнековой мешалки, находится в кубической зависимости от угловой скорости вращения и в пятой степени от диаметра шнековой мешалки [17, 156].

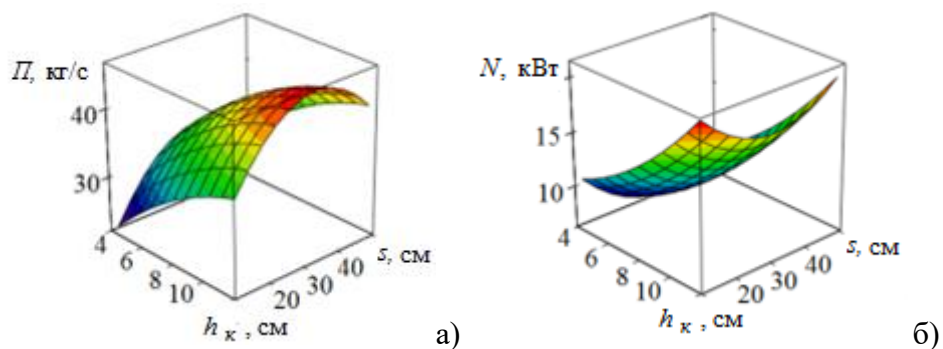


Рисунок 3.73 - Графики влияния глубины винтового канала h_k и шага винта s винтового барабана на: а) производительность почвоуборочной машины Π ; б) мощность N , потребляемую почвоуловительной машиной при лесных пожарах

Выявления закономерностей влияния конструктивных параметров фрезы питателя для всего многообразия состояний снега на производительность, Π , и потребляемую мощность фрезой в процессе транспортирования вырезанной снежной массы в область загрузочного окна [17], позволит в полной мере оценить эффективность работы ФРС. Поэтому целесообразно рассмотреть весь возможный диапазон решений выражений затрат мощности на вырезание снежной массы из снежного массива, $N_{\phi 1}$, и ее транспортирование, $N_{\phi 2}$, представленных в таблице 1.1.

После ряда преобразований выражения затрат мощности на вырезание снежной массы из снежного массива, $N_{\phi 1}$, и ее транспортирование, $N_{\phi 2}$, для двухзаходной фрезы примут вид, с учетом того, что $\operatorname{tg} \theta \neq 0$:

$$N_{\phi 1} = \frac{4 \cdot 10^6 \cdot \pi^2 \cdot k_{\text{рез}} \cdot B \cdot R_{\phi}^2 \cdot V_{\text{пер}}}{\omega_{\phi} \cdot \cos \theta} \cdot 10^{-3} \cdot \left(R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} - \frac{\pi \cdot V_{\text{пер}}}{n_3} \right) \cdot \operatorname{tg}(\theta + \delta_{\text{сн}}), \quad (3.25)$$

$$N_{\phi 2} = 4 \cdot \pi \cdot 1,39 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_{\phi}^2 \cdot R_{\phi}^2 \cdot \Pi_{\text{мех}} \cdot (f_{\phi} + f_c) \cdot \operatorname{tg}(\theta + \delta_{\text{сн}}), \quad (3.26)$$

где f_c – коэффициент внутреннего трения снега; $\delta_{\text{сн}}$ – угол внешнего трения снега.

При подстановке значений параметров, представленных в таблице 3.1, при $V_{\text{пер}} = 0,55$ м/с, получим более компактный вид:

$$N_{\phi 1} = 2,712 \cdot 10^3 \cdot k_{\text{рез}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \theta}{\cos \theta} \cdot \operatorname{tg}(\theta + \delta_{\text{сн}}),$$

$$N_{\phi 2} = 20,29 \cdot 10^{-3} \cdot \Pi_{\text{мех}} \operatorname{tg}(\theta + \delta_{\text{сн}}).$$

Проведем исследование функций (3.25) и (3.26) на предмет наличия экстремумов. Для этого необходимо найти производные, по θ , и определить критические точки, указанных функций [17, 85].

Производные функции (3.25) и (3.26), соответственно, имеют вид [17]:

$$\frac{dN_{\phi 1}}{d\theta} = 2,712 \cdot 10^3 \cdot k_{\text{рез}} \cdot \left(\sin(2 \cdot \theta + 2 \cdot \delta_{\text{сн}}) + \frac{\sin 2\theta}{1 + \sin^2 \theta} \right);$$

$$\frac{dN_{\phi 2}}{d\theta} = \frac{20,29 \cdot 10^{-8} \Pi_{\text{мех}}}{\cos^2(\theta + \delta_{\text{сн}})} + 20,29 \cdot 10^{-3} \operatorname{tg}(\theta + \delta_{\text{сн}}) \cdot \frac{d\Pi_{\text{мех}}}{d\theta}.$$

Точки локальных экстремумов для (3.26), (3.25) определяются из выражений, при условии, что техническая производительность задана постоянной величиной [17]:

$$2,712 \cdot 10^3 k_{\text{pez}} \left(\sin(2\theta + 2\delta_{\text{сн}}) + \frac{\sin 2\theta}{1 + \sin^2 \theta} \right) = 0;$$

$$\frac{20,29 \cdot 10^{-8} \Pi_{\text{mex}}}{\cos^2(\theta + \delta_{\text{сн}})} = 0.$$

Локальный экстремум функции (3.26) находится в точке [17]:

$$\cos^2(\theta + \delta_{\text{сн}}) = 0,$$

решением данного уравнения является:

$$\theta = \frac{\pi}{2} \cdot n - \delta_{\text{сн}}, \text{ где } n \in 1, 2, 3, \dots$$

Для поиска точки локального экстремума функции (3.25) необходимо решить уравнение [17]:

$$\sin(2 \cdot \theta + 2 \cdot \delta_{\text{сн}}) + \frac{\sin 2\theta}{1 + \sin^2 \theta} = 0,$$

Данное уравнение является трансцендентным. В результате приближенных вычислений, у выражения (3.25) была найдена критическая точка, совпадающая с точкой локального экстремума выражения (3.25). На рисунке 3.74 представлено графическое решение уравнения нахождения точки локального экстремума функции (3.25). Решение данного уравнения записывается в аналогичном виде [17]:

$$\theta = \frac{\pi}{2} \cdot n - \delta_{\text{сн}}, \text{ где } n \in 1, 2, 3, \dots$$

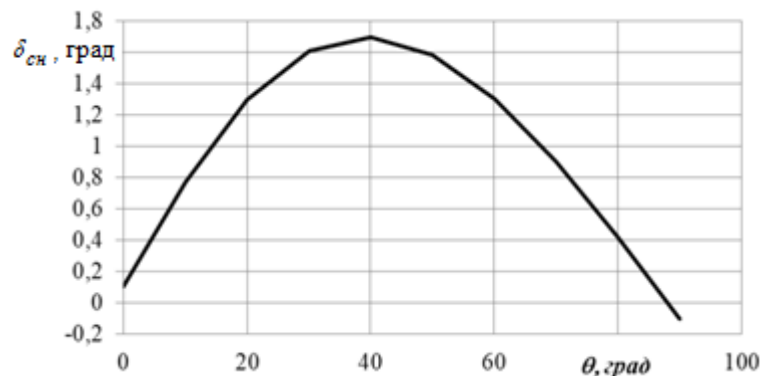


Рис.3.74 - Графическое решение уравнения поиска локального экстремума функции (3.25)

Точка локального экстремума функции (3.26) и (3.25) совпадают, из чего можно сделать вывод о монотонном изменении производительности и затрат мощности на транспортирование снежной массы во всем диапазоне значений углов захода ленты фрезы, которые реализованы в существующих конструкциях фрез питателей ФРС [17].

В работе [5] даны уравнения движения снежной частицы в питателе ФРС. Рассмотрим, как влияет угол захода ленты фрезы, θ , на направление действия сил нормальных реакций элементов фрезы, $N_{\phi i}$, питателя РСО. Из представленных уравнений получаем условия, при которых происходит изменение направления действия силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{\phi i}$, при транспортировании снежной частицы [17]:

$$\sin\theta - f_{\phi} \cos\theta = 0, \quad (3.27)$$

$$\cos\theta + f_{\phi} \sin\theta = 0. \quad (3.28)$$

Решение, при котором происходит изменение направление действия силы нормальной реакции ленты фрезы в уравнениях движения тривиально и имеет вид [17]:

$$\theta = \operatorname{arctg}(f_{\phi} + \pi n/2),$$

$$\theta = \operatorname{arcctg}(-f_{\phi} + \pi n/2),$$

где $n \in 1, 2, 3, \dots$

Существующие ФРС имеют угол захода больший, чем результат решения уравнения (3.27) и (3.28) и угол захода постоянный по всей ширине питателя, что свидетельствует о том, что практически во всем диапазоне углов захода, направление действия силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{\phi i}$, не меняет своего направления, в случае безотрывного движения по ленте фрезы и по поверхности отвала снежной частицы, как отдельного крупнокускового образования, так и при ее представлении материальной частицей [17].

На рисунке 3.75 представлены траектории движения снежной частицы в питателе ФРС полученные в результате численного решения уравнений [18], при

исходных данных, представленных в таблице 3.1. Условно можно выделить пять видов траекторий движения снежной частицы в зависимости от угла захода.

Из графиков траекторий наглядно видно, что для одношаговых фрез шаг фрезы равный двум радиусам фрезы эффективен при углах захода, θ , более 20° . Кроме этого, использование относительно больших углов захода обеспечивают более высокий подъем снежной частицы по отвалу питателя ФРС, что дает возможность повысить расположение загрузочного окна питателя ФРС в вертикальной плоскости (рисунок 3.75). При малых углах захода, θ , эффективны многошаговые фрезы, так как наблюдается выравнивание траектории, что характерно для шнека, а использование переменной ширины ленты фрезы – максимальную загрузку. Более высокое расположение загрузочного окна по вертикали, сокращает расстояние, которое необходимо преодолеть снежным частицам, прежде чем они будут захвачены лопастью ротора МА, что позволяет увеличить площадь проходного сечения в области загрузочного окна (рисунок 3.76) и минимизировать величину «застойной» области загрузочного окна, представленную на рисунке 3.77.

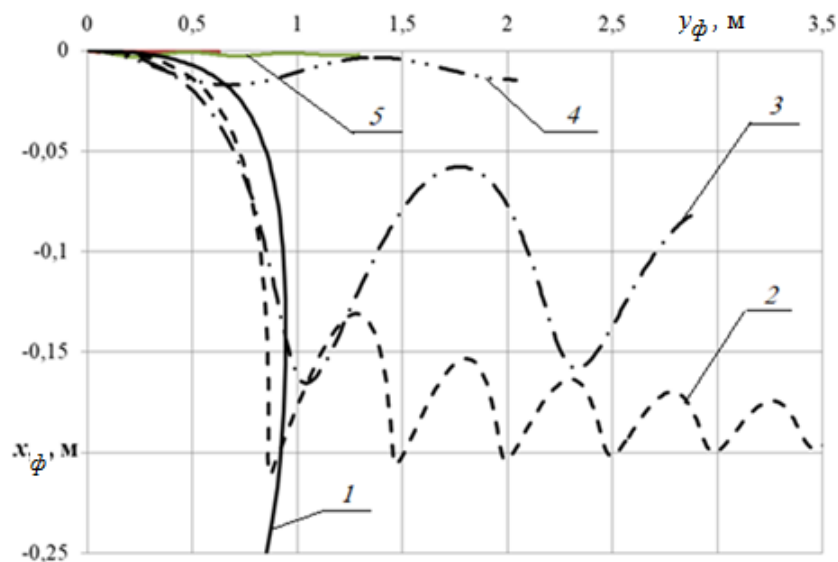


Рис. 3.75 - Траектории движения снежной частицы в питателе РСФ в плоскости $O_\phi X_\phi Y_\phi$ в зависимости от угла захода, θ , где 1 – $\theta=60^\circ$, 2 – $\theta=50^\circ$, 3 – $\theta=40^\circ$, 4 – $\theta=30^\circ$, 5 – $\theta=20^\circ$.



Рисунок 3.76 – РСО со смещенным в вертикальной плоскости МА. Вид сбоку



Рисунок 3.77 - Уменьшение проходного сечения загрузочного окна, обусловленное накоплением снежной массы, не захваченной лопастью ротора МА.

На рисунке 3.78 представлены зависимости $N_{\phi i}$ от $N_{\psi i}$ для одного захода ленты фрезы при транспортировании изолированной снежной частицы характерного размера, $r_{\psi i} = 0,03$ м при различных углах захода, θ .

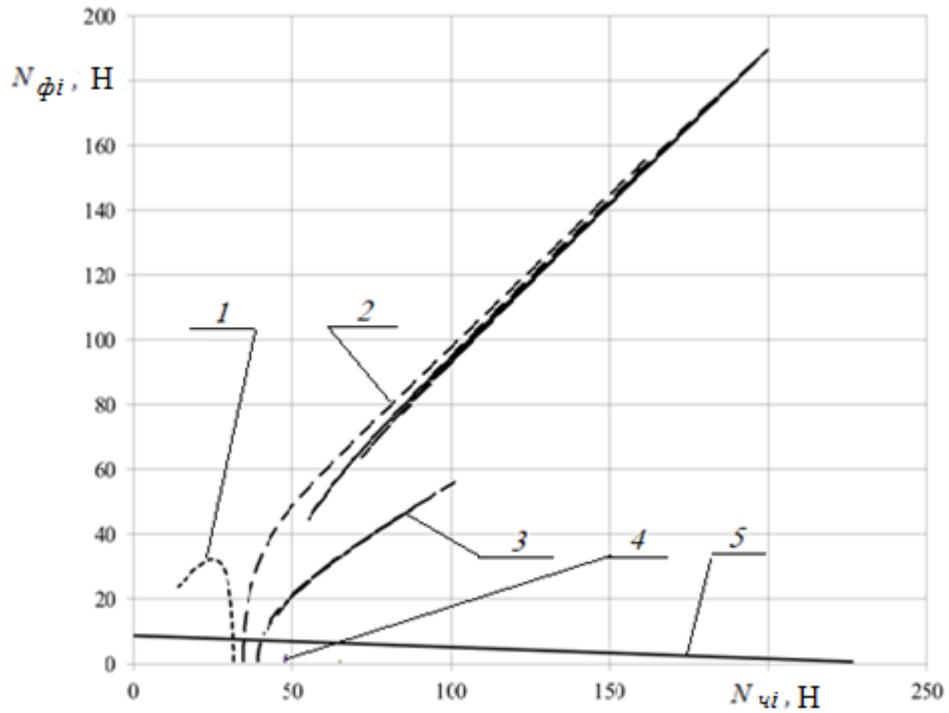


Рисунок 3.78 - Зависимость $N_{\phi i}$ от $N_{\chi i}$, где 1 – $\theta=60^\circ$, 2 – $\theta=50^\circ$, 3 – $\theta=40^\circ$, 4 – $\theta=30^\circ$, 5 – $\theta=7^\circ$.

Расчет средних затрат мощности фрезы на транспортирование изолированной снежной частицы, N_{cp} , на всем участке движения, по формуле [18] показал наличие области с их минимальными значениями. Этот диапазон находится в интервале $\theta=20\dots50^\circ$ (рисунок 3.79).

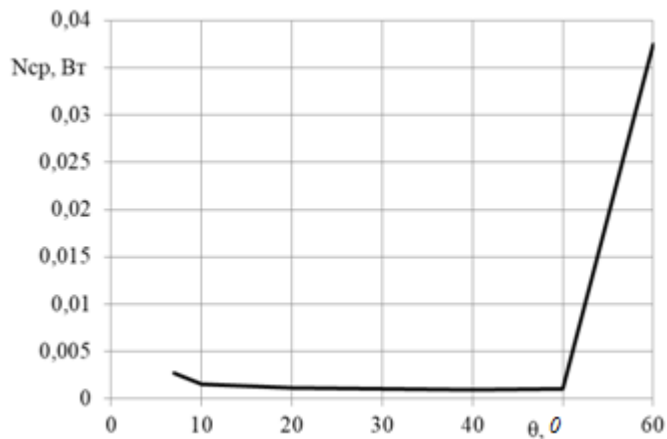


Рисунок 3.79 - Средние значения мощности, N_{cp} , затраченные фрезой питателя ФРС при перемещении изолированной снежной частицы, в зависимости от угла захода ленты фрезы.

Рассмотрим как изменяется производительность, Π , и затраты мощности на транспортирование снежной массы фрезой питателя РС0 при ее представлении

группой взаимодействующих между собой снежных частиц. Конструктивные и технологические параметры фрезы питателя РСО, при которых производились вычисления, представлены в таблице 3.1. Загрузка питателя моделировалась непрерывным поступлением частиц за полный оборот фрезы питателя. Характерный размер частиц варьировался в диапазоне, $r_{ci}=0,005\dots 0,03$ м с шагом 0,005 м. Угол захода фрезы, θ , изменялся от 10^0 до 50^0 с шагом варьирования 10^0 [17].

Согласно [36, 43, 66], исследования проводились для участка фрезы с шагом равным:

$$T_{\phi} = 1,1\dots 7,5 \cdot R_{\phi}.$$

Картограммы значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{chi c}$, и боковой поверхности, $N_{fi c}$, в плоскости $O_{\phi}X_{\phi}Y_{\phi}$, для снежной массы с частицами с характерным размером, $r_{ci}=0,03$ м, для углов захода рабочей поверхности $\theta=10, 50^0$, и угловой скорости $\omega_{\phi}= 8$ рад/с, представлены на рисунках 3.80 - 3.83.

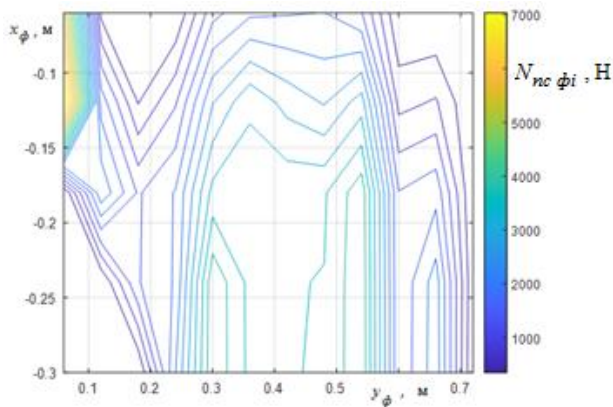


Рисунок 3.80 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc fi}$, для частиц с характерным размером, $r_{чи} =0,03$ м, при угле захода, $\theta=10^0$

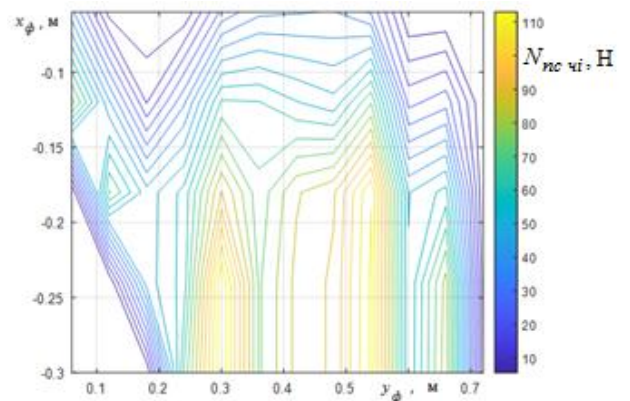


Рисунок 3.82– Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc chi}$, для частиц с характерными размерами, $r_{чи}=0,03$ м, при угле захода, $\theta=10^0$

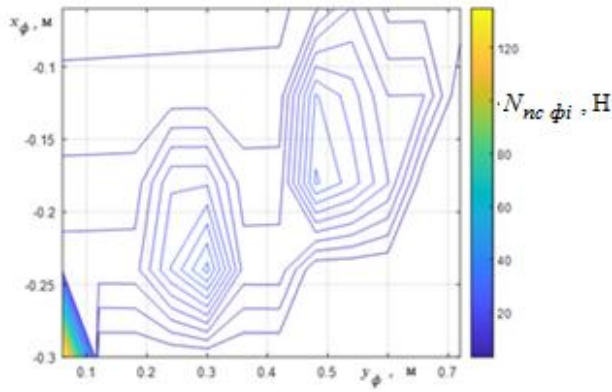


Рисунок 3.81 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc\phi i}$, для частиц с характерным размером, $r_{чи} = 0,03$ м, при угле захода, $\theta = 50^{\circ}$

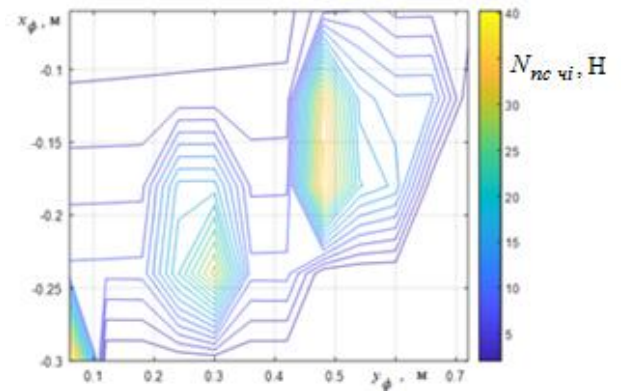


Рисунок 3.83– Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc\chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{чи} = 0,03$ м, при угле захода, $\theta = 50^{\circ}$

При углах захода $\theta > 40^{\circ}$, наблюдаются изолированные области действия больших значений сил нормальных реакций, как на сдвигающую поверхность, так и на опорную поверхность рабочего органа. Эти области условно располагаются на диагональной линии горизонтальной плоскости (рисунки 3.81, 3.83). Что касается $\theta < 20^{\circ}$, то области высоких значений сил нормальных реакций удлиняются в направлении оси $O_{\phi}X_{\phi}$ и охватывают две трети проекции плоскости опорной и сдвигающей плоскостей.

Изменение во времени суммы мгновенных текущих значений затрачиваемых мощностей, N_c , на перемещение группы частиц характерного радиуса, $r_{чи} = 0,03$, м, в зависимости от их угла захода, θ , при угловой скорости $\omega_{\phi} = 8$ рад/с [17], представлено на рисунке 3.84.

Так же на рисунке 3.85 представлены значения мгновенных текущих значений затрачиваемых мощностей на перемещение группы частиц характерного радиуса, $r_{ч} = 0,025$, м, для углов захода $\theta = 20$ и 30° [17], и угловой скорости $\omega_{\phi} = 8$ рад/с.

На рисунках 3.86 - 3.94 представлено изменение во времени, t , суммарных, N_c , и средних суммарных затрат мощности, N_{cp} , для фрез с углами заходов $\theta = 10, 20, 50^{\circ}$

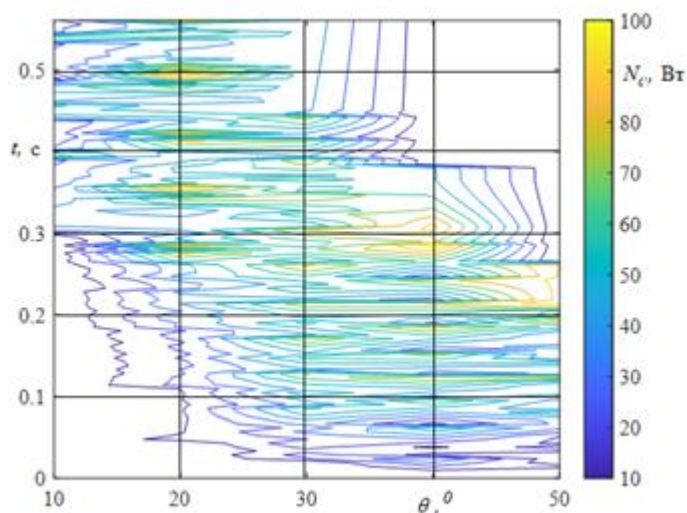


Рисунок 3.84 - Изменение суммарной мощности, N_c , во времени, t , в процессе транспортирования снежных частиц питателем РСО в зависимости от угла захода ленты фрезы θ .

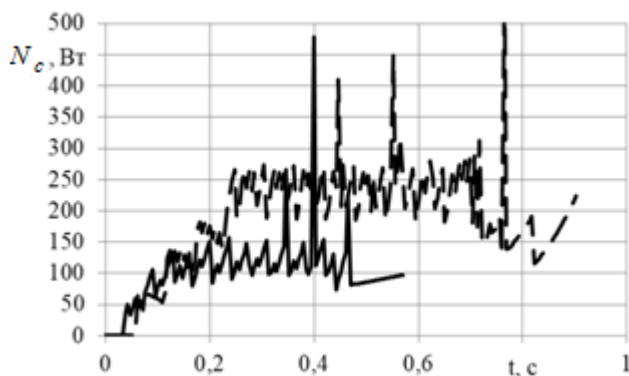


Рисунок 3.85 -Изменение суммарной мощности, N_c , в процессе транспортирования снежных частиц в питателе РСО в зависимости от времени при $r_{ci} = 0,025$ м и $\theta=30^0$ (сплошная линия), при $\theta=20^0$ (пунктирная линия)

и числом заходов, $n_z = 3, 4, 5$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м, соответственно, без учета переходных процессов. Из них следует, что увеличение угла захода ленты фрезы, θ , приводит к ярко выраженному нелинейному снижению как средних, так и максимальных значений мощности, при малом числе захода ленты фрезы, n_z , наблюдается рост мощности в пределах, $\theta = 20^0$. В таблице 3.5 представлены базовые статистические характеристики затрат мощности в зависимости от числа заходов, n_z , и характерного размера частиц, r_{ci} , транспортируемой снежной массы.

Выражение полиномиальной аппроксимации суммарных средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от θ и n_z , имеет вид:

$$N_{cp} = -15,36 + 250,7 \cdot n_3 - 21,62 \cdot \theta - 22,84 \cdot n_3^2 - 14,22 \cdot n_3 \cdot \theta + 1,85 \cdot \theta^2 + \\ + 1,34 \cdot n_3^3 + 1,05 \cdot \theta \cdot n_3^2 + 0,281 \cdot n_3 \cdot \theta^2 - 0,048 \cdot \theta^3 - 0,053 \cdot n_3^3 \cdot \theta - \\ - 0,006 \cdot n_3^2 \cdot \theta^2 - 0,002 \cdot n_3 \cdot \theta^3 + 0,0004 \cdot \theta^4 \quad (3.29)$$

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

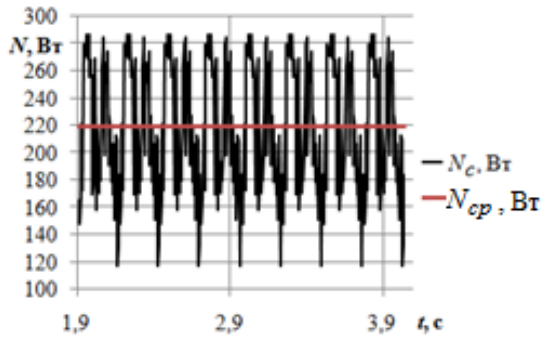


Рисунок 3.86– Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для фрезы с $n_3 = 3$, с углом захода $\theta = 10^0$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м, в зависимости от времени, t

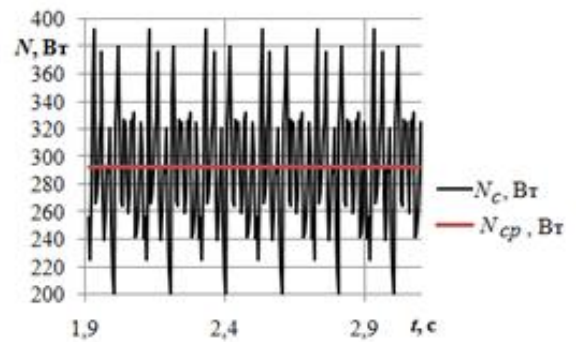


Рисунок 3.87– Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для фрезы с $n_3 = 4$, с углом захода $\theta = 10^0$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м, в зависимости от времени, t

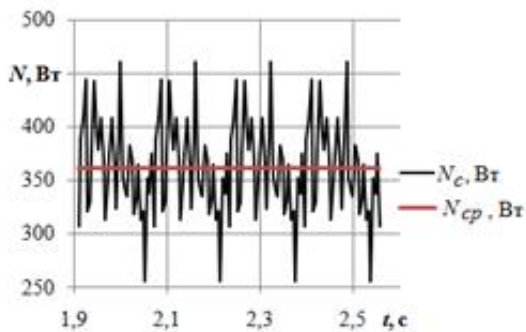


Рисунок 3.88 – Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для фрезы с $n_3 = 5$, с углом захода $\theta = 10^0$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м, в зависимости от времени, t

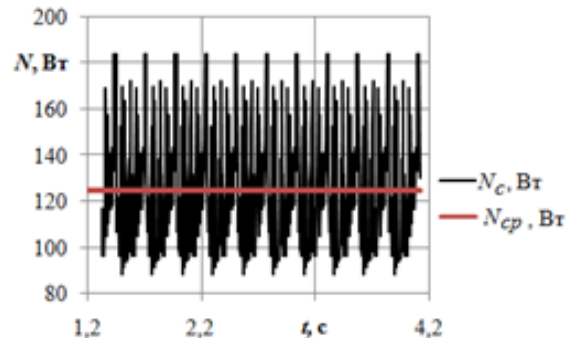


Рисунок 3.89 – Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для фрезы с $n_3 = 3$, с углом захода $\theta = 20^0$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м, в зависимости от времени, t

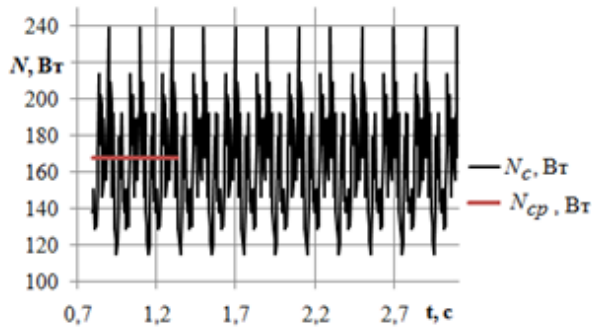


Рисунок 3.90 – Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для фрезы с $n_z = 4$, с углом захода $\theta = 20^\circ$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м, в зависимости от времени, t

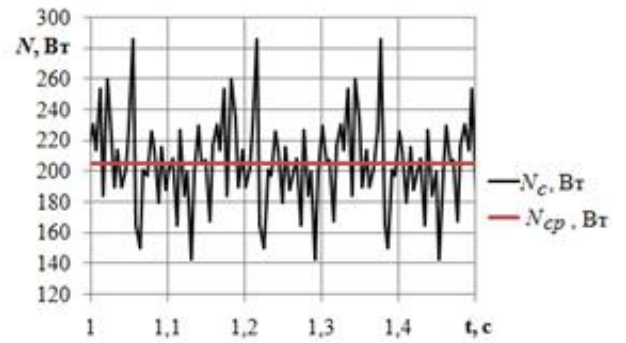


Рисунок 3.91 – Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для фрезы с $n_z = 5$, с углом захода $\theta = 20^\circ$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м, в зависимости от времени, t

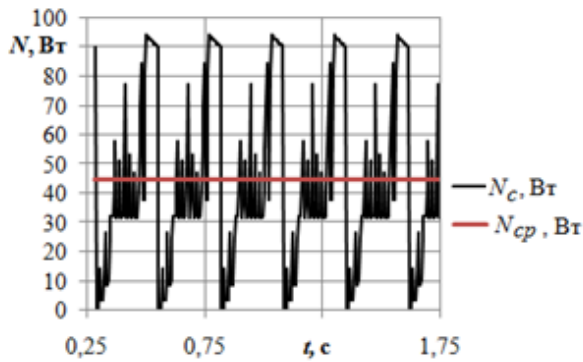


Рисунок 3.92 – Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для фрезы с $n_z = 3$, с углом захода $\theta = 50^\circ$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м, в зависимости от времени, t

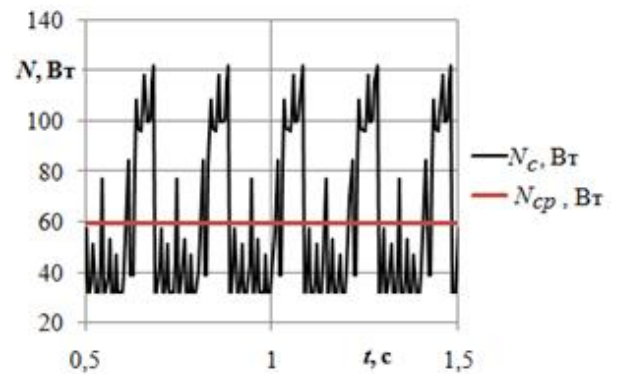


Рисунок 3.93 – Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для фрезы с $n_z = 4$, с углом захода $\theta = 50^\circ$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м, в зависимости от времени, t

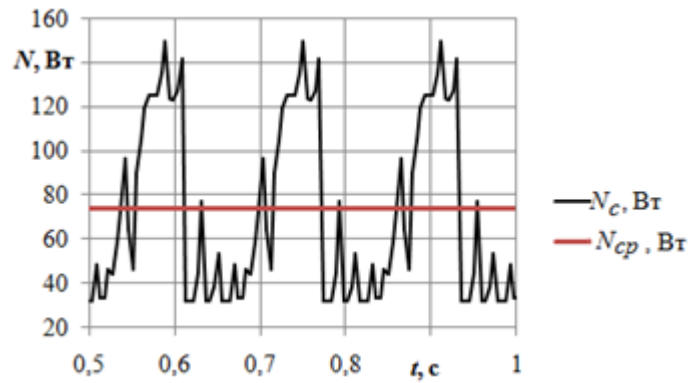


Рисунок 3.94– Суммарные затраты мощности, N_c , и средние суммарные затраты мощности, N_{cp} , для фрезы с $n_z=5$, с углом захода $\theta=50^\circ$ при транспортировании снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci}=0,03$ м, в зависимости от времени, t

На рисунке 3.95 представлена поверхность описываемая уравнением (3.29) с точками значений суммарных средних затрат мощности, N_{cp} , по которым проводилась полиномиальная аппроксимация.

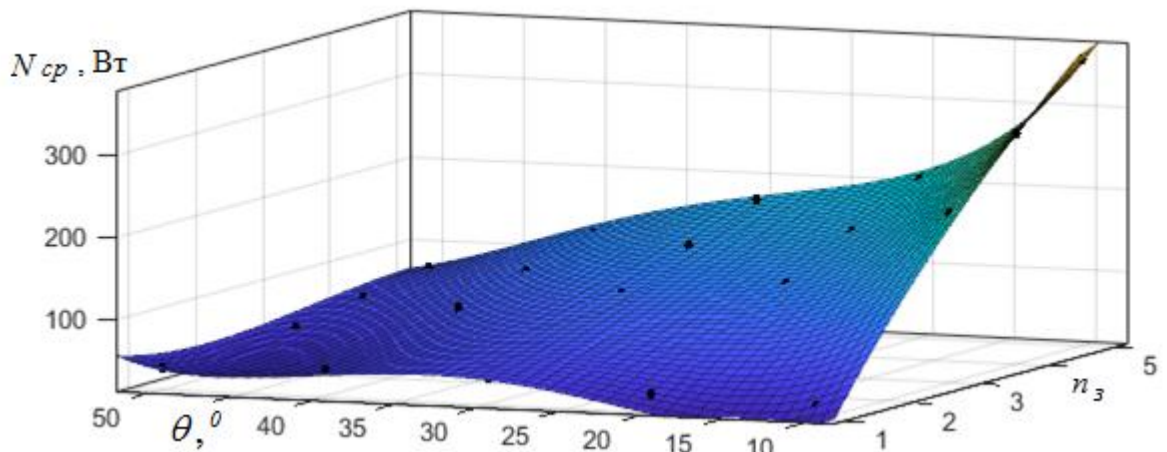


Рисунок 3.95 – Суммарные средние затраты мощности, N_{cp} , в зависимости от числа заходов фрезы, n_z , и угла захода ленты фрезы, θ , транспортируемой снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci}=0,03$ м

Как видно из зависимости (3.29), существенно нелинейное влияние оказывает на затраты мощности угол захода, θ , ленты фрезы, зависимость мощности имеет четвертый порядок, в отличие от числа заходов, n_z , которые в уравнении аппроксимации имеют третий порядок.

Таблица 3.5 - Базовые статистические характеристики заград мощности в зависимости от числа заходов, n_s , и угла захода фрезы, θ , при характерном размере частиц, транспортируемой снежной массы, $r_{\text{эл}} = 0,03$ м

угол захода фрезы, θ , град.	n_s	среднее, Вт	среднеквадратическое, Вт	несмещенная асимметрия, Вт	несмещенный эксцесс, Вт	медиана, Вт	размах, Вт	максимальное значение, Вт	минимальное значение, Вт
10	3	117,379	46,17	-0,14	1,82	217,35	162,43	286,804	117,379
	4	200,451	44,705	0,212	2,48	288,59	192,07	392,526	200,451
	5	255,195	43,375	0,201	3,111	361,427	205,079	460,274	255,195
20	3	124,67	26,395	0,568	2,278	120,729	95,252	183,722	88,471
	4	166,096	28,885	0,254	2,309	165,508	123,355	238,771	115,416
	5	204,855	29,898	0,284	3,486	203,928	142,989	285,49	142,501
50	3	43,085	29,579	0,499	2,113	32,054	93,128	94,183	1,0545
	4	58,532	30,664	0,773	2,01	42,947	90,305	122,279	31,974
	5	72,565	40,795	0,504	1,627	53,335	117,503	149,478	31,974

Увеличение угла захода, θ , ленты фрезы, в целом, приводит к снижению потребляемой фрезой питателя ФРС мощности. При увеличении числа заходов, n_3 , потребляемая мощность возрастает. Особенно это влияние заметно, при углах захода, $\theta < 30^\circ$. Так при, $n_3=3$, на каждые 10° в среднем снижение потребляемой мощности на 10 Вт. На рисунке 3.96 представлено относительное расхождение, e , отн. ед., результатов сравнительного анализа выражения суммарных средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от углах захода, θ , и числа заходов, n_3 , вычисленных по формуле (3.29) и затрат мощности на вырезание и транспортирование снега в питателе ФРС, вычисленных по существующей методике (см. таблица 1.1), при заданной производительности и конструктивных и технологических параметрах РСО, представленных в таблице 3.1.

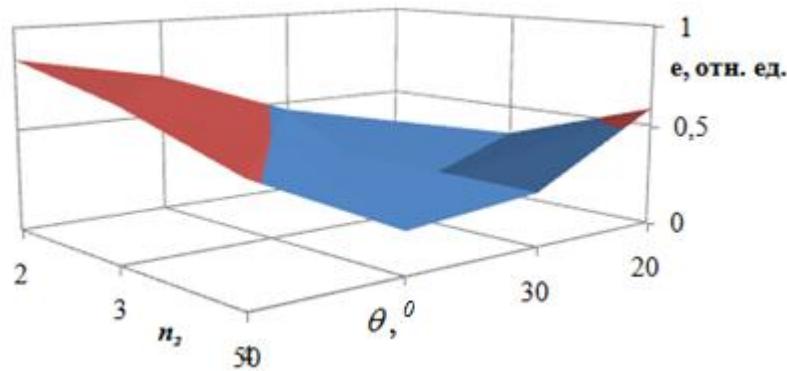


Рисунок 3.96 – Относительное расхождение результатов вычисления необходимой мощности для транспортирования снежной массы в питателе ФРС вычисленное по формуле (3.28) и существующей методике (см. таблица 1.1)

Относительное расхождение результатов, $e < 0,1$, наблюдается в средней области значений конструктивных параметров фрезы питателя: $20^\circ < \theta < 40^\circ$ и $n_3=3$.

На рисунке 3.97 представлена поверхность суммарных средних затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от угла захода, θ , и размера транспортируемых частиц, r_{ch} , при угловой скорости вращения $\omega_\phi=8$ рад/с, и числе заходов ленты фрезы $n_3=3$.

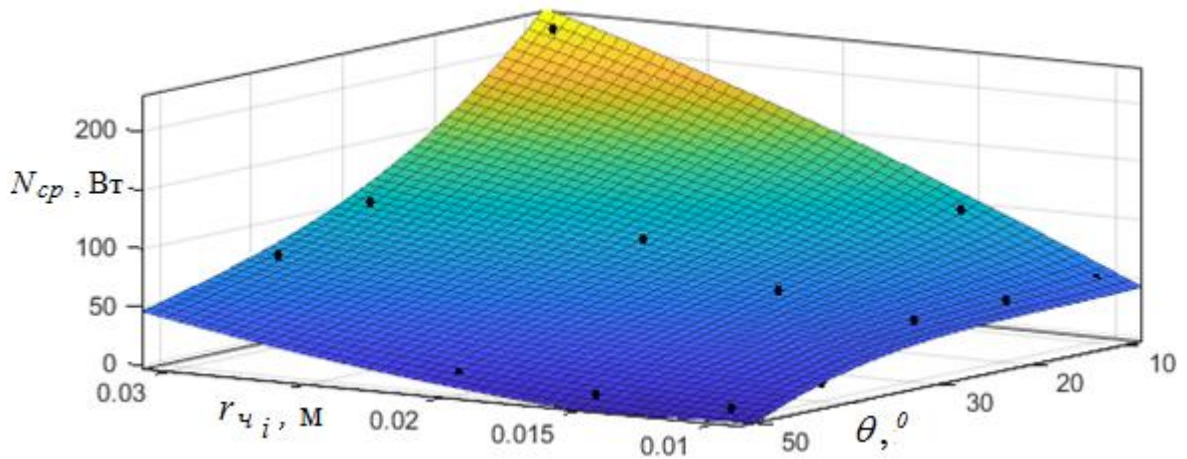


Рисунок 3.97 – Суммарные средние затраты мощности, N_{cp} , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и характерного размера частиц транспортируемой снежной массы, r_{χ_i} , при числе заходов фрезы, $n_3=3$, $\omega_\phi=8$ рад/с

Выражение полиномиальной аппроксимации суммарных средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от, θ , и, r_{χ_i} , имеет вид:

$$N_{cp} = -91,36 + 1,65 \cdot 10^4 \cdot r_{\chi_i} + 4,198 \cdot \theta - 1,14 \cdot 10^5 \cdot r_{\chi_i}^2 - 608,9 \cdot r_{\chi_i} \cdot \theta + 0,0055 \cdot \theta^2 + 37,91 \cdot \theta \cdot r_{\chi_i}^2 + 5,33 \cdot r_{\chi_i} \cdot \theta^2 - 0,001 \cdot \theta^3 \quad (3.30)$$

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

Результаты сравнительного анализа суммарных средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от угла захода, θ , при транспортировании частиц с характерным размером, $r_{\chi_i}=0,01$ м, вычисленных по формуле (3.30) и затрат мощности на вырезание и транспортирование снега в питателе ФРС (см. таблица 1.1), представлены на рисунке 3.98. Значительное расхождение при угла захода, $\theta > 20^\circ$, обусловлены тем, что формулы, представленные в таблице 1.1, непосредственно не учитывают изменения производительности питателя роторного снегоочистителя, в случае изменения его конструктивных параметров.

Выражение полиномиальной аппроксимации суммарных средних значений производительности, Π_{cp} , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и числа заходов, n_3 , имеет вид:

$$\begin{aligned}
 P_{cp} = & 390,5 + 218,5 \cdot n_3 - 58,94 \cdot \theta - 73,41 \cdot n_3^2 - 6,45 \cdot n_3 \cdot \theta + 3,37 \cdot \theta^2 + 7,3 \cdot n_3^3 + \\
 & + 1,93 \cdot \theta \cdot n_3^2 + 0,017 \cdot n_3 \cdot \theta^2 - 0,076 \cdot \theta^3 - 0,171 \cdot n_3^3 \cdot \theta - 0,006 \cdot n_3^2 \cdot \theta - \\
 & - 0,004 \cdot n_3^2 \cdot \theta^2 + 0,00015 \cdot n_3 \cdot \theta^3 - 0,0006 \cdot \theta^4
 \end{aligned} \quad (3.31)$$

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

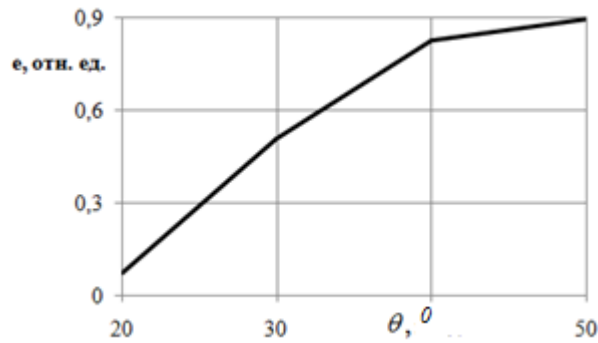


Рисунок 3.98 – Относительное расхождение результатов вычисления необходимой мощности для транспортирования снежной массы в питателе ФРС вычисленное по формуле (3.29) и существующей методике

Поверхность, описываемая уравнением (3.31) с точками значений суммарной средней производительности, P_{cp} , по которым проводилась полиномиальная аппроксимация представлена на рисунке 3.99.

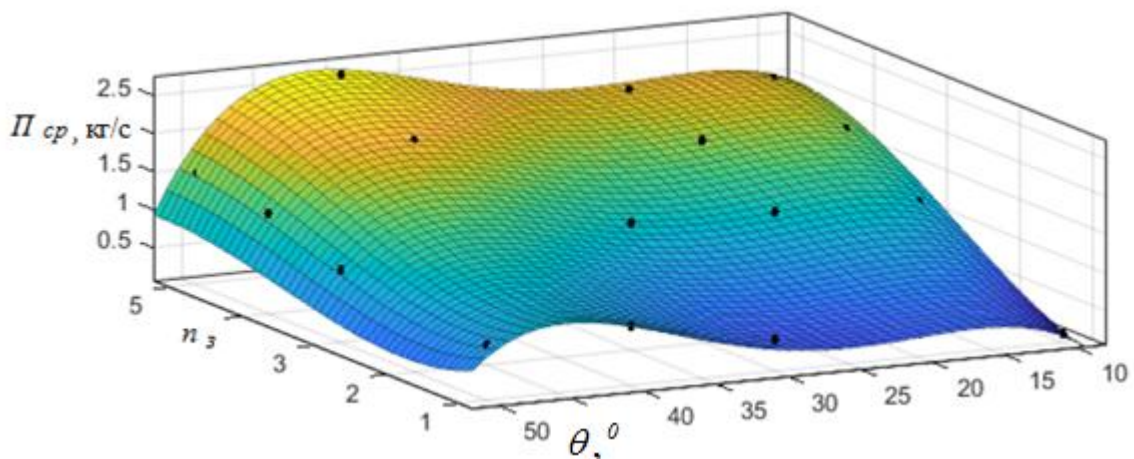


Рисунок 3.99 – Суммарная средняя производительность, P_{cp} , в зависимости от числа заходов фрезы, n_3 , и угла захода ленты фрезы транспортируемой снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{qi} = 0,03$ м

На рисунке 3.100 представлена поверхность суммарной средней производительности в зависимости от угла захода, θ , и характерного размера транспортируемых частиц, $r_{\text{чи}}$, при угловой скорости вращения $\omega_{\phi}=8$ рад/с, и числе заходов ленты фрезы $n_3 = 3$.

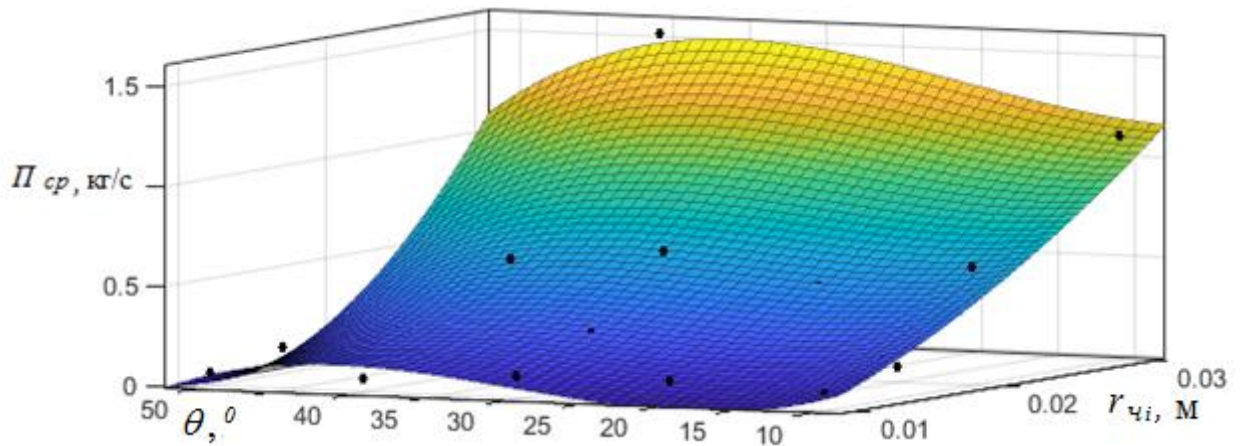


Рисунок 3.100 – Суммарная средняя производительность, P_{cp} , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и характерного размера частиц транспортируемой снежной массы, $r_{\text{ч}}$, при числе заходов фрезы, $n_3=3$, $\omega_{\phi}=8$ рад/с

Выражение полиномиальной аппроксимации суммарных средних значений производительности, P_{cp} , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и числа заходов, n_3 , имеет вид:

$$P_{cp} = 0,4535 + 0,4451 \cdot r_{\text{чи}} + 0,066 \cdot \theta + 0,113 \cdot r_{\text{чи}}^2 - 0,011 \cdot r_{\text{чи}} \cdot \theta - 0,73 \cdot \theta^2 + 0,0425 \cdot \theta \cdot r_{\text{чи}}^2 - 0,0472 \cdot r_{\text{чи}} \cdot \theta^2 - 0,0798 \cdot \theta^3 \quad (3.32)$$

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

При сравнении общих форм поверхностей, изображенных на рисунках 3.95 и 3.99, наблюдается аналогичная картина, описанной в разделе 3.3. На рисунке 3.101 представлена картограмма зависимости удельных энергозатрат, NP , от угла захода, θ , и числа заходов фрезы, n_3 , из которой следует, что наиболее эффективно работает фреза питателя в диапазоне углов захода от 40 до 50° , при большем, n_3 . Увеличение характерного размера частиц приводит к увеличению затрат мощности, но при этом возрастает производительность (рисунок 3.100).

Картограмма зависимости удельных энергозатрат от угла захода, θ , и характерного размера транспортируемых частиц, r_{ci} , изображена на рисунке 3.102.

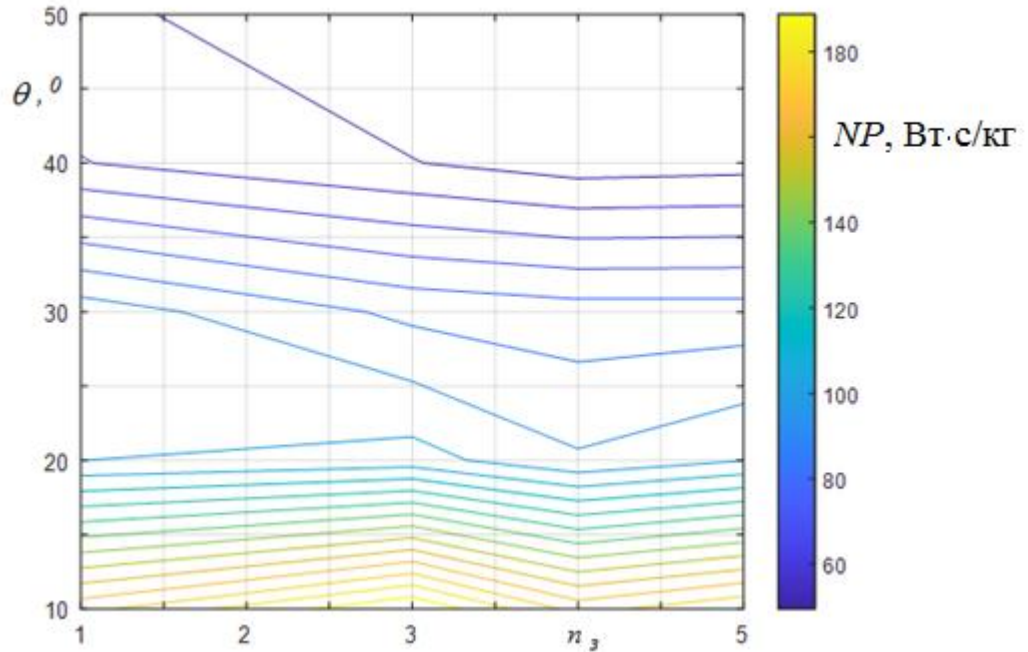


Рисунок 3.101 – Картограмма удельных энергозатрат, NP , в зависимости от числа заходов, n_z , фрезы и угла захода ленты фрезы, θ , транспортируемой снежной массы с характерными размерами частиц, $r_{ci} = 0,03$ м

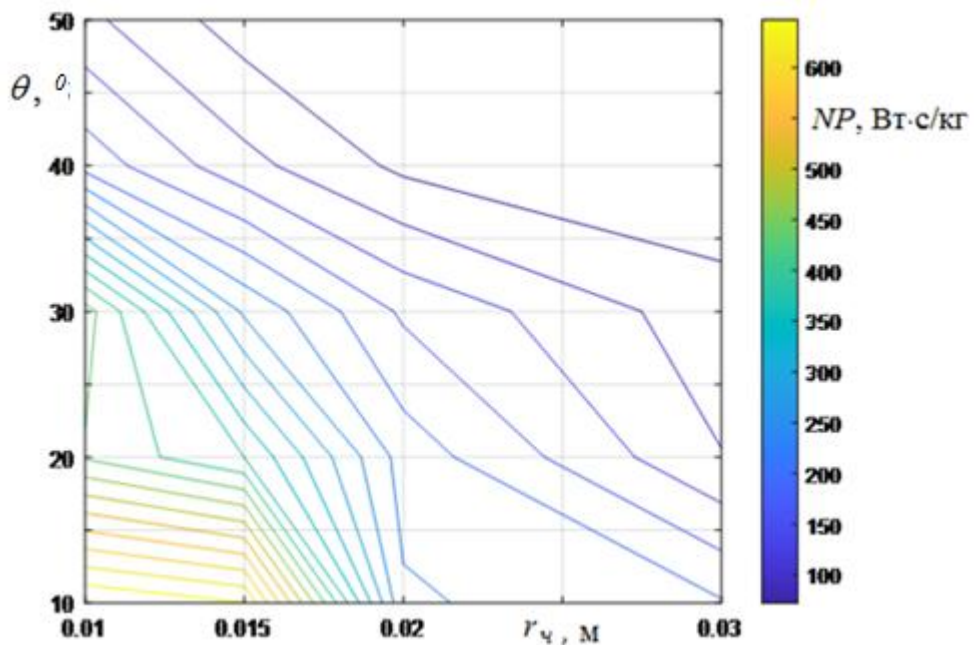


Рисунок 3.102 – Картограмма удельных энергозатрат, NP , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и характерного размера частиц транспортируемой снежной массы, r_{ci} , при числе заходов фрезы, $n_z=3$, $\omega_{\phi}=8$ рад/с

Из рисунков 3.101, 3.102 следует, что наиболее эффективными параметрами, обеспечивающими 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 $0,02 \leq r_{ci} < 0,03$ м. При малых углах захода транспортирование снежной массы с характерным размером частиц, является нерациональным, с точки зрения удельных энергозатрат, NP .

При прочих равных условиях, для ФРС, при транспортировании частиц одного характерного размера, r_{ci} , максимальная затрачиваемая мощность приходится на углы захода фрезы не более 20° , что соответствует: $T_{\phi} = 2 \cdot R_{\phi}$, и с точки зрения энергетических затрат не является оптимальным. Так же необходимо учитывать очевидный факт сокращения времени, t , достижения границы загрузочного окна транспортируемой снежной массой с увеличением, θ .

Изменение средней координаты по координатам всех транспортируемых частиц, $x_{\phi i}$, в области загрузочного окна по оси $O_{\phi}X_{\phi}$ в зависимости от характерного размера частиц, r_{ci} , транспортируемой снежной массы представлено на рисунке 3.103.

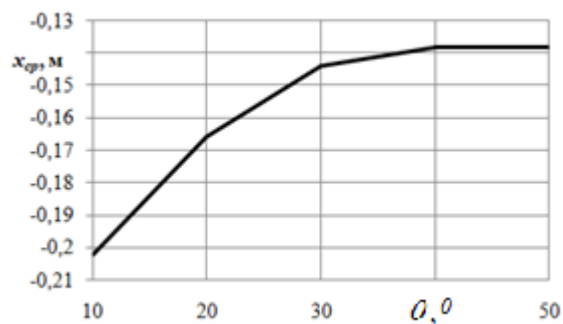


Рисунок 3.103 – Изменение средней координаты по координатам всех транспортируемых частиц, $x_{\phi i}$, в области загрузочного окна по оси $O_{\phi}X_{\phi}$ в зависимости от угла захода, θ , ленты фрезы при характерном размере частиц, $r_{ci} = 0,015$ м

Из рисунка 3.103 следует, что с увеличением угла захода ленты фрезы, θ , наблюдается рост подъема транспортируемой снежной массы при характерных

размерах снежных частиц в диапазоне, r_{ch} , от 0,015, однако, при, θ , более 40° , среднее значение подъема снежной массы стабилизируется.

На рисунках 3.104, 3.105, 3.106 представлены изменения проекций векторов скоростей снежных частиц в области загрузочного окна на оси $O_\phi X_\phi$ и $O_\phi Y_\phi$, а также величин абсолютных скоростей снежных частиц в зависимости от координаты по оси $O_\phi X_\phi$.

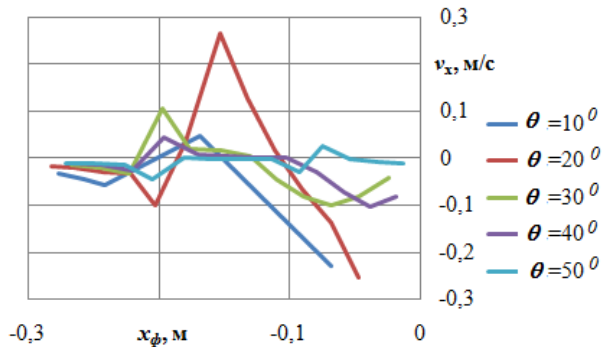


Рисунок 3.104 – Изменение величины проекции векторов скоростей снежных частиц, v_x , по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от угла захода, θ

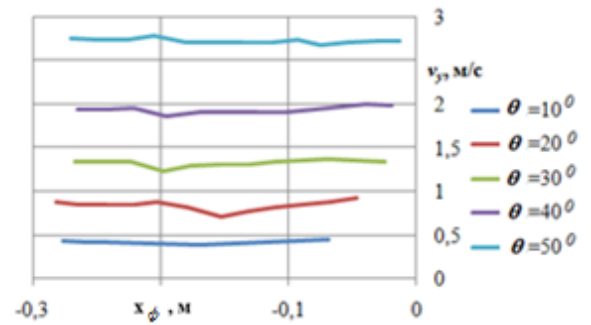


Рисунок 3.105 – Изменение величины проекции векторов скоростей снежных частиц, v_y , по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от угла захода, θ

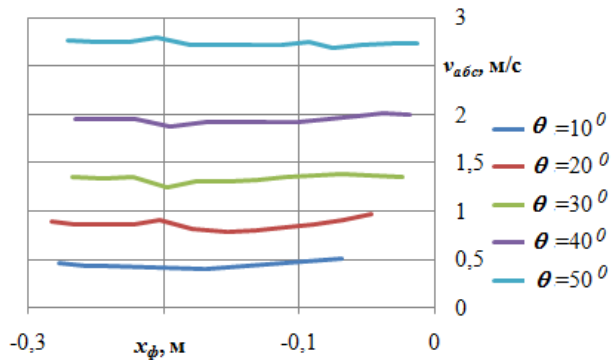


Рисунок 3.106 – Изменение величины абсолютных скоростей снежных частиц, v_{abs} , по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от угла захода, θ

На рисунке 3.104 наблюдается интенсивное перемешивание частиц в продольной плоскости, возникающее из-за того, что верхние частицы имеют положительное значение скорости и сталкиваются с ниже лежащими частицами, у которых скорость имеет противоположное значение.

На рисунках 3.105, 3.106 значения скоростей практически одинаковы и не зависят от положения на ленте фрезы. С увеличением угла захода проекция вектора скорости v_y , возрастает.

Величина абсолютной скорости, $v_{абс}$, так же возрастает с увеличением угла захода, θ . Наблюдается торможение частиц на внешней границе питателя ФРС, что обусловлено трением поступивших частиц о снежный массив.

Изменение средних значений абсолютных скоростей, $v_{абс\ ср}$, носит линейный характер в зависимости от характерного размера частиц, $r_{чi}$, и угла захода, θ , фрезы (рисунок 3.107).

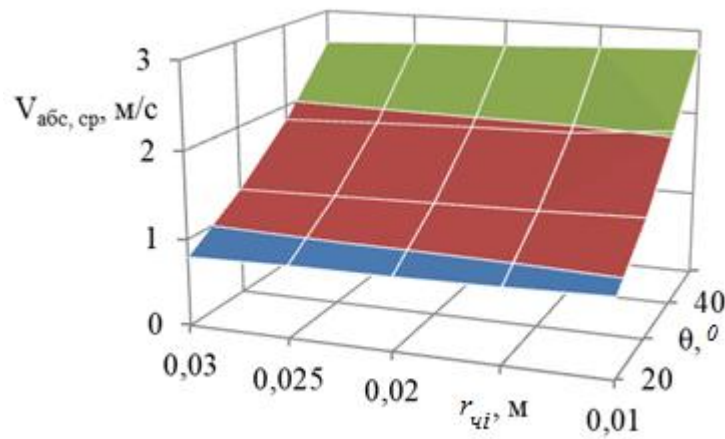


Рисунок 3.107 - Изменение средних значений абсолютной скорости по всем транспортируемым частицам, $V_{абс, ср}$, в зависимости от их характерного радиуса, $r_{чi}$, за один загрузочный цикл для однозаходной фрезы для случая максимальной емкости питателя и угла захода, θ ,

В результате полиномиальной аппроксимации средних значений проекций векторов скоростей на ось $O_\phi X_\phi$, $v_{x\ ср}$, в зависимости от угла захода, θ , получено уравнение описывающее изменение среднего по потоку значения проекций векторов скоростей на ось $O_\phi X_\phi$, v_x , (рисунок 3.108):

$$v_{x\ ср} = -1,73 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^4 + 2,62 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^3 - 0,0014 \cdot \theta^2 + 0,03 \cdot \theta - 0,25. \quad (3.33)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=1$.

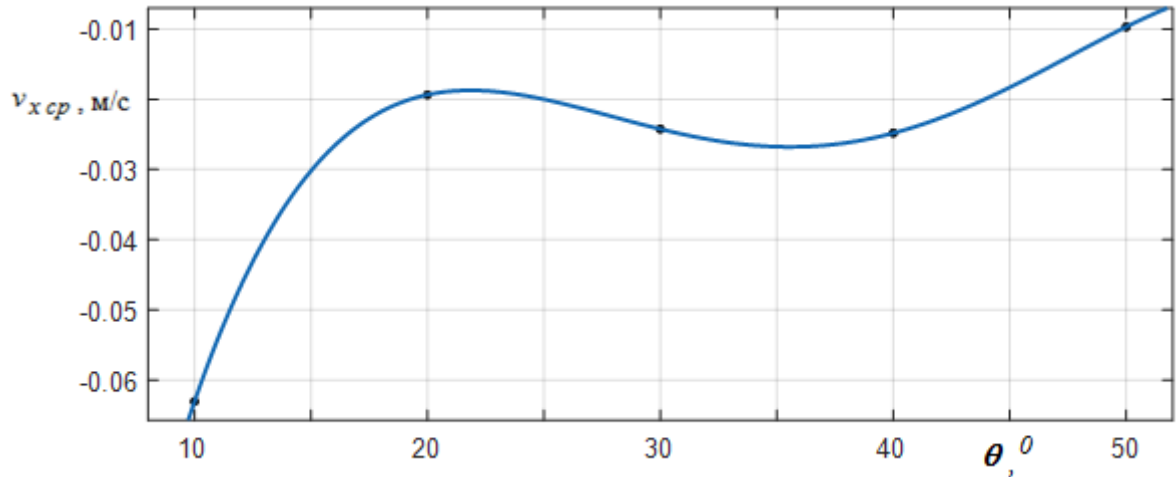


Рисунок 3.108 – Зависимость средних значений проекций векторов скоростей, $v_{x\text{cp}}$, на ось $O_\phi X_\phi$, от угла захода θ , при угловой скорости, $\omega=8$ рад/с, при характерном размере частиц, $r_{\text{чi}}=0,015$ м

Полученное в результате полиномиальной аппроксимации, изменения средней кинетической энергии, K_{cp} , транспортируемого снежного потока в зависимости от угла захода, θ , имеет вид:

$$K_{\text{cp}} = 3,66 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^3 - 1,45 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^2 + 0,00038 \cdot \theta - 0,002. \quad (3.34)$$

На рисунке 3.109 представлена зависимость кинетической энергии транспортируемых снежных частиц в области загрузочного окна, K_{cp} , в зависимости от угла захода, θ .

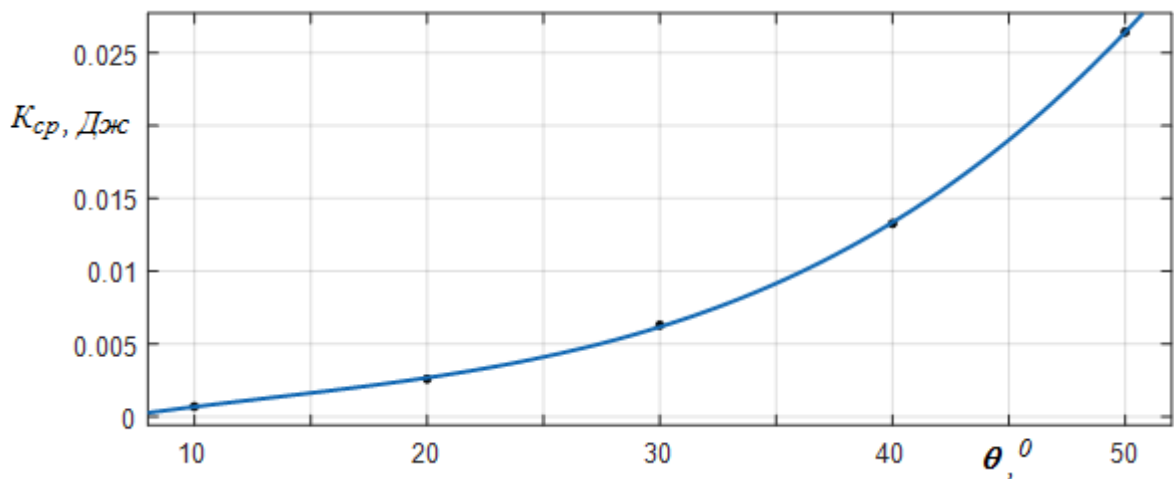


Рисунок 3.109– Зависимость кинетической энергии транспортируемых снежных частиц в области загрузочного окна, K_{cp} , от θ

Из рисунка 3.109 следует рост кинетической энергии транспортируемой снежной массы с увеличением угла захода, θ , и этот рост более интенсивен, чем в случае увеличения размера частиц, r_{ci} , (см. рисунок 3.65). Соответственно, можно говорить о том, что на снеге малой плотности, ρ , которая характерна для мелкозернистого снега, повышение кинетической энергии потока, K , возможно за счет увеличения угла захода, θ , ленты фрезы.

На рисунках 3.110 и 3.111 представлены траектории движения снежных частиц с характерным радиусом $r_{ci}=0,03$ в плоскости $X_\phi O_\phi Y_\phi$, при угле захода ленты фрезы $\theta = 10^\circ$ и $\theta = 50^\circ$, $\omega=8$ рад/с для одного захода ленты фрезы.

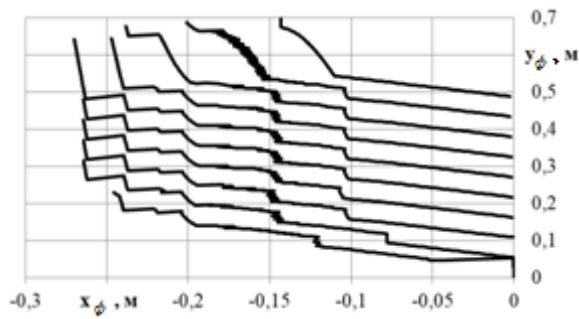


Рисунок 3.110– Траектории движения снежных частиц с характерным радиусом, $r_{ci}=0,03$ м, в плоскости $X_\phi O_\phi Y_\phi$, при угле захода ленты фрезы $\theta = 10^\circ$ и $\omega_\phi=8$ рад/с

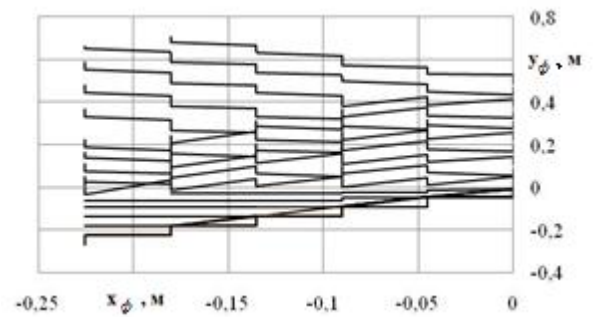


Рисунок 3.111– Траектории движения снежных частиц с характерным радиусом, $r_{ci}=0,03$ м, в плоскости $X_\phi O_\phi Y_\phi$, при угле захода ленты фрезы $\theta = 50^\circ$, $\omega_\phi=8$ рад/с

Как видно из приведенных рисунков, количество потерянной массы существенно зависит от угла захода ленты фрезы ФРС и эта зависимость имеет ярко выраженный нелинейный характер, особенно в диапазоне, $\theta=10\dots20^\circ$. Влияние размера транспортируемых частиц практически не оказывает влияния на количество потерянной массы и может быть принято постоянной величиной для соответствующего угла захода ленты фрезы питателя ФРС.

Из графиков 3.99, 3.100 видно, что влияние угла захода, θ , и характерного размера частиц, r_{ci} , на производительность, Π_{cp} , транспортирования снежной массы фрезой питателя носит, с определенными допущениями, параболический характер. Минимальное значение квадрата ошибки составило $R^2=0,958$. Максимальная производительность достигается за счет увеличения угла захода ленты фрезы, θ , что минимизирует время транспортирования снежных частиц на заданное расстояние, и увеличением характерного размера, r_{ci} , транспортируемых снежных частиц, обеспечивающих большую массу [17]. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости ограничения числа заходов, n_z , фрезы питателя ФРС, особенно при температурах близких к нулю и высокой влажности, что минимизирует вероятность налипания снежной массы в пространстве образованном соседними заходами фрезы. Для транспортирования снежных частиц диаметром 0,06 м при геометрических параметрах питателя ФРС, представленных в таблице 3.1, предельное количество заходов у фрезы будет равно 11.

3.5. Теоретические исследования влияния угловой скорости вращения фрезы питателя на показатели эффективности рабочего оборудования роторных снегоочистителей

Влияние угловой скорости вращения фрезы, ω_ϕ , питателя ФРС с точки зрения вырезания снежной массы из снежного массива в первую очередь проявляется в геометрической форме линии резания, которая может быть получена из уравнений геликоида [5, 85] (см. подраздел 2.1.1).

Рассмотрим влияние угловой скорости вращения, ω_ϕ , фрезы питателя на силы нормальных реакций и затраты мощности, N , на перемещение группы снежных частиц при тех же исходных данных, представленных в таблице 3.1. Загрузка питателя определяется его максимальной емкостью в соответствии с таблицей 3.3. Характерный размер частиц, r_c , варьировался в диапазоне указанном в подразделе

2.2. Угловая скорость вращения фрезы, ω_f , изменялась от 6 до 12 рад/с, с шагом варьирования 2 рад/с.

В работе [45, 161] получены зависимости суммарного сопротивления резанию и перемещению снега со шнеком, представленные на рисунке 3.112.

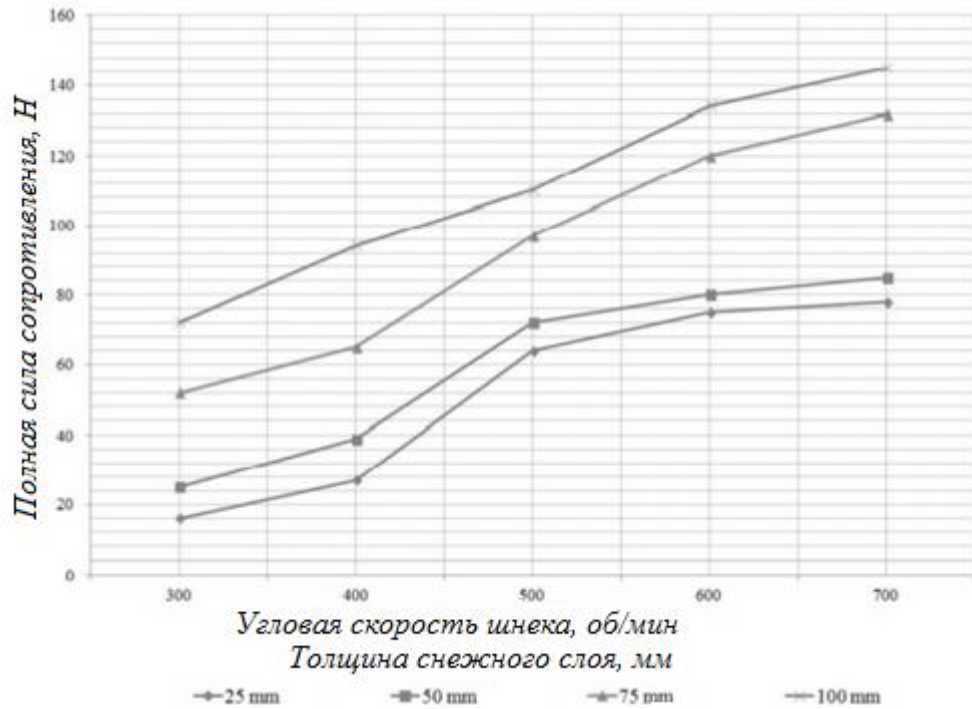


Рисунок 3.112 - Суммарное сопротивление резанию и перемещению снега шнеком в зависимости от его угловой скорости вращения и толщины снежного слоя

Картограммы значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc\ \text{чи}}$, и боковой поверхности, $N_{nc\ \text{фи}}$, $n_z = 3$, при транспортировании снежной массы с частицами с характерными размерами, $r_{\text{чи}}=0,01$ м и 0,03 м, для углов захода рабочей поверхности, $\theta=10, 50^\circ$, угловой скорости $\omega_f= 6$ и 12 рад/с, соответственно. Результаты вычислений представлены на рисунках 3.113 - 3.120. Для угла, $\theta=30^\circ$, картограммы значений сил нормальных реакций в плоскости $O_\phi X_\phi Y_\phi$, представлены на рисунках 3.121, ..., 3.124.

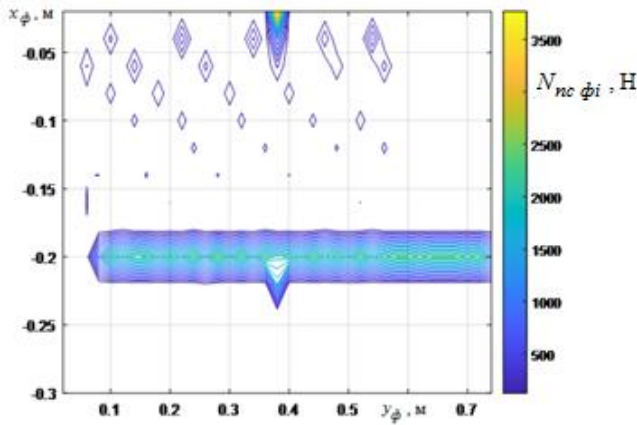


Рисунок 3.113 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc \phi i}$, для частиц с характерным размером, $r_{\phi i}=0,01$ м, при угле захода, $\theta=10^0$ и $\omega_{\phi}=6$ рад/с

Увеличение угловой скорости, ω_{ϕ} , приводит к росту силы нормальной реакции действующей на боковую поверхность, что касается опорной поверхности, то действие сил остается одного порядка (рисунки 3.15 – 3.16). При малых значениях угловой скорости, ω_{ϕ} , четко просматривается область действия максимальных сил по всей длине отвала на расстоянии 0,2 м вглубь отвала. Глубже контакт рабочего оборудования с транспортируемой снежной массой отсутствует. При больших скоростях наблюдается продольное «размазывание» действия сил с шагом 0,1 м.

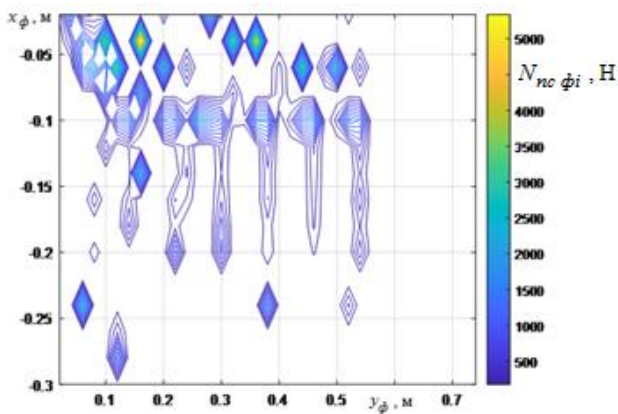


Рисунок 3.115– Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc \phi i}$, для частиц с характерным размером, $r_{\phi i}=0,01$ м, при угле захода, $\theta=10^0$ и $\omega_{\phi}=12$ рад/с

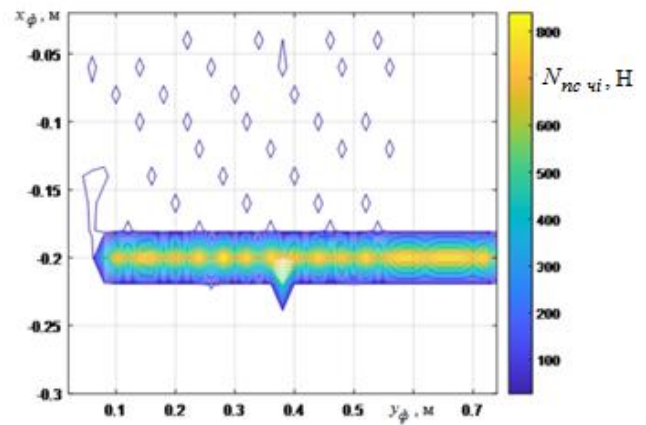


Рисунок 3.114 – Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc \chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i}=0,01$ м, при угле захода, $\theta=10^0$ и $\omega_{\phi}=6$ рад/с

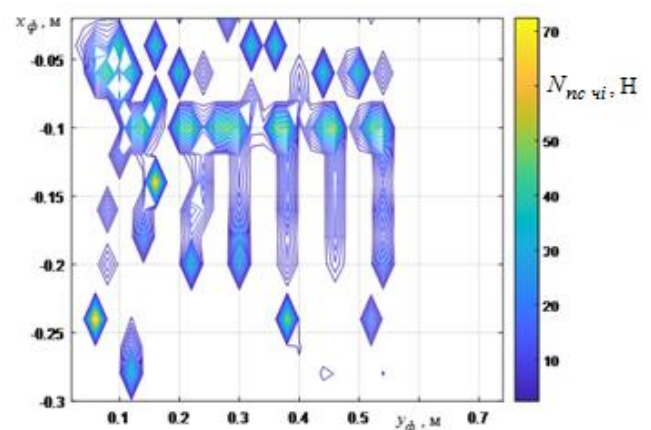


Рисунок 3.116 – Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc \chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i}=0,01$ м, при угле захода, $\theta=10^0$ и $\omega_{\phi}=12$ рад/с

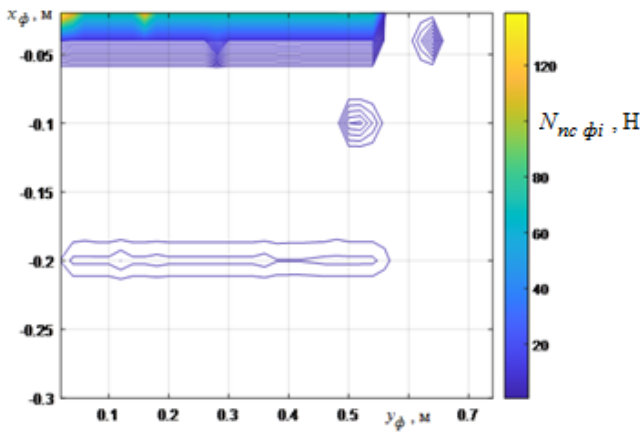


Рисунок 3.117 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc \phi i}$, для частиц с характерным размером, $r_{\chi i} = 0,01$ м, при угле захода, $\theta = 50^0$ и $\omega_{\phi} = 6$ рад/с

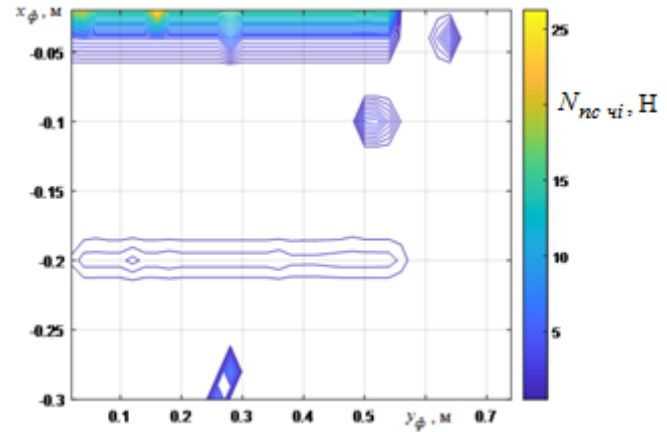


Рисунок 3.118 – Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc \chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i} = 0,01$ м, при угле захода, $\theta = 50^0$ и $\omega_{\phi} = 6$ рад/с

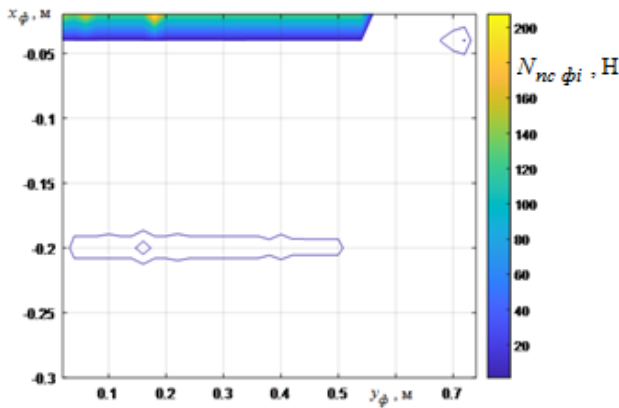


Рисунок 3.119 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc \phi i}$, для частиц с характерным размером, $r_{\chi i} = 0,01$ м, при угле захода, $\theta = 50^0$ и $\omega_{\phi} = 12$ рад/с

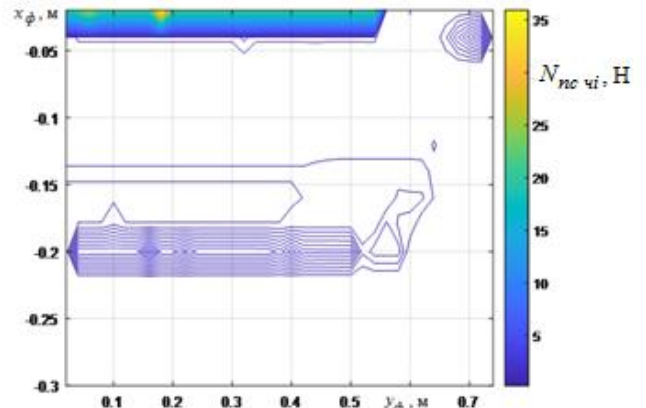


Рисунок 3.120 – Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc \chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i} = 0,01$ м, при угле захода, $\theta = 50^0$ и $\omega_{\phi} = 12$ рад/с

При больших углах захода боковой поверхности, как следует из рисунков 3.117 ...3.120, выделяются две области действия сил нормальных реакций в нижней части опорной поверхности и две трети глубины питателя, как для боковой поверхности, так и для опорной поверхности. Увеличение угловой скорости, ω_{ϕ} , приводит лишь к росту величины силы нормальной реакции, особенно – это

характерно для боковой поверхности рабочей поверхности рабочего органа, $N_{nc\phi i}$. При промежуточных углах захода $10^0 < \theta < 50^0$ характер распределения сил нормальных реакций идентичен применительно к боковой и опорной поверхностям рабочего органа РСО (рисунок 3.121 – 3.124).

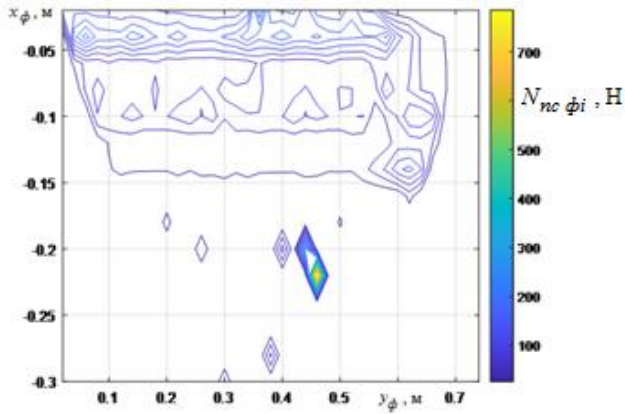


Рисунок 3.121– Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc\phi i}$, для частиц с характерным размером, $r_{\chi i} = 0,01$ м, при угле захода, $\theta = 30^0$ и $\omega_{\phi} = 6$ рад/с

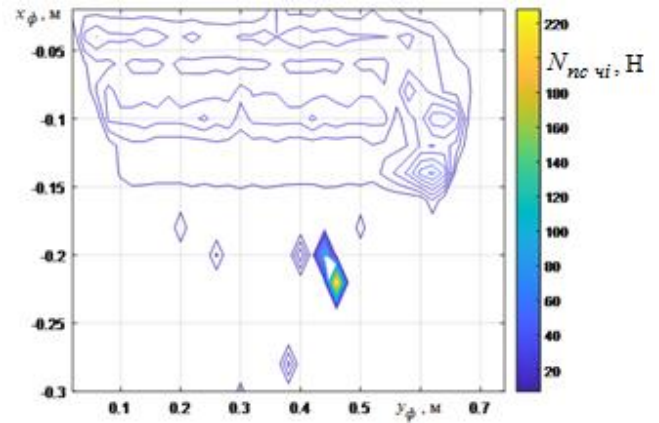


Рисунок 3.122– Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc\chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i} = 0,01$ м, при угле захода, $\theta = 30^0$ и $\omega_{\phi} = 6$ рад/с

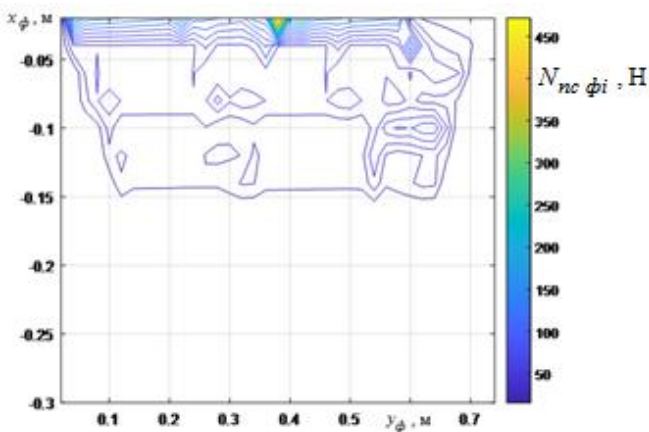


Рисунок 3.123 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc\phi i}$, для частиц с характерным размером, $r_{\chi i} = 0,01$ м, при угле захода, $\theta = 30^0$ и $\omega_{\phi} = 12$ рад/с

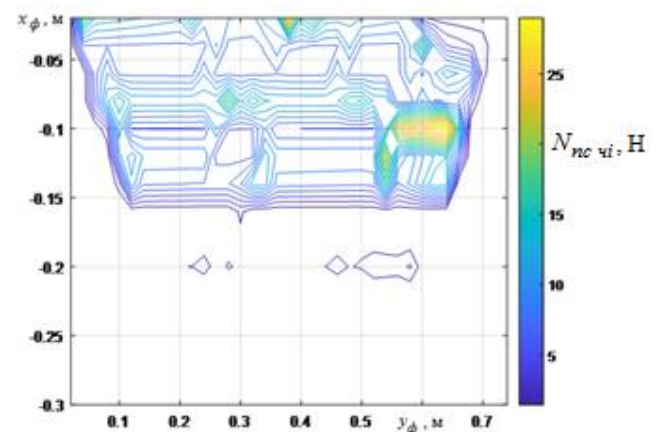


Рисунок 3.124 – Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc\chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\chi i} = 0,01$ м, при угле захода, $\theta = 30^0$ и $\omega_{\phi} = 12$ рад/с

Однако наблюдается расширение области действия сил в нижней части опорной поверхности, до половины глубины объема питателя рабочего органа. Область действия на глубине две трети объема питателя распадается на несколько точек контакта, а при увеличении угловой скорости вращения, ω_ϕ , практически исчезает.

Картина распределений существенно меняется с увеличением характерного размера транспортируемых частиц, r_{ci} , (рисунки 3.125 – 3.128), особенно при увеличении угловой скорости вращения, ω_ϕ . Выделяются три области максимальных значений нормальных реакций: в нижней части области загрузочного окна; в средней части горизонтальной плоскости пространства питателя рабочего органа и в верхней части края опорной поверхности отвала.

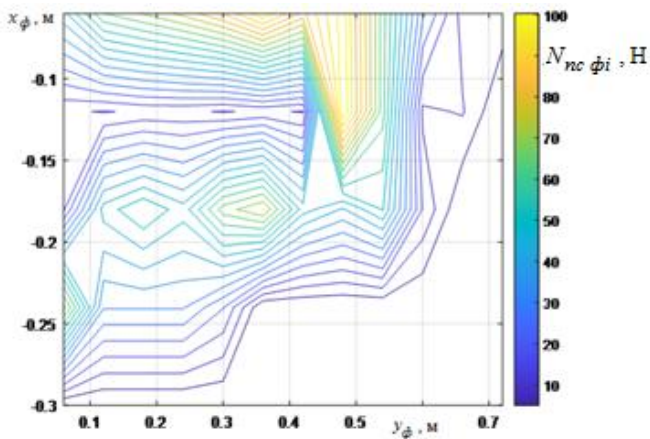


Рисунок 3.125 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc\ \phi i}$, для частиц с характерным размером, $r_{ci} = 0,03$ м, при угле захода, $\theta = 50^\circ$ и $\omega_\phi = 6$ рад/с

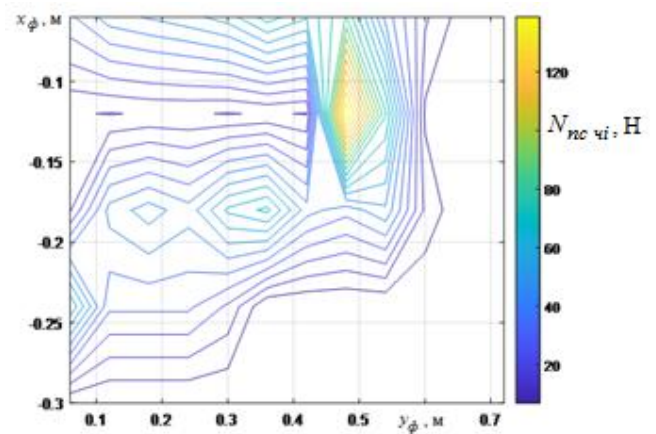


Рисунок 3.126– Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc\ \chi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{ci} = 0,03$ м, при угле захода, $\theta = 50^\circ$ и $\omega_\phi = 6$ рад/с

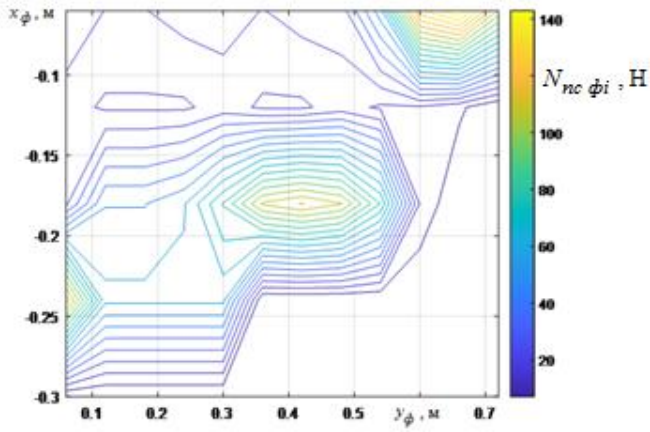


Рисунок 3.127 – Картограмма значений сил нормальных реакций боковой поверхности, $N_{nc \phi i}$, для частиц с характерным размером, $r_{\phi i} = 0,03$ м, при угле захода, $\theta = 50^{\circ}$ и $\omega_{\phi} = 12$ рад/с

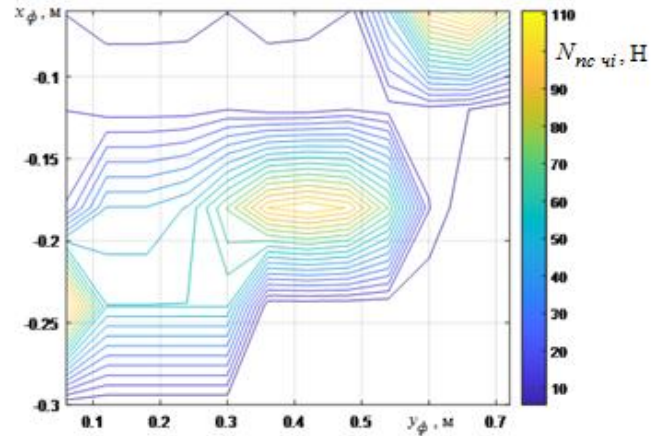


Рисунок 3.128 – Картограмма значений сил нормальных реакций опорной поверхности, $N_{nc \psi i}$, для частиц с характерными размерами, $r_{\phi i} = 0,03$ м, при угле захода, $\theta = 50^{\circ}$ и $\omega_{\phi} = 12$ рад/с

На рисунке 3.129 представлена поверхность суммарной средней мощности в зависимости от угла захода, θ , и угловой скорости вращения ω_{ϕ} , для характерного размера транспортируемых частиц, $r_{\phi i} = 0,01$ м, при и числе заходов ленты фрезы $n_3 = 3$.

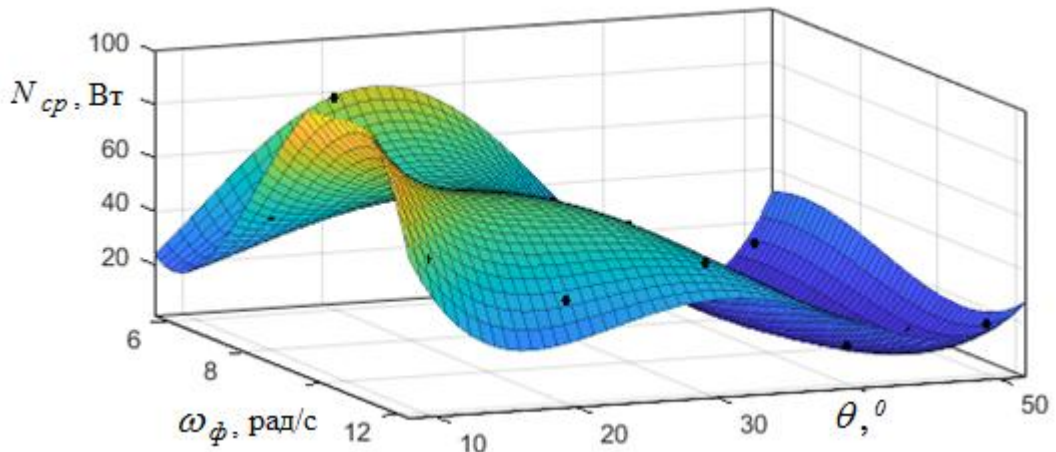


Рисунок 3.129 – Суммарные средние затраты мощности, N_{cp} , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{\phi i} = 0,01$ м, при числе заходов фрезы, $n_3 = 3$

Выражение полиномиальной аппроксимации суммарных средних значений

затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от, θ , и, ω_ϕ , при транспортировании снежной массы с характерным размером частиц, $r_{ci}=0,01$ м, имеет вид:

$$N_{cp} = -1012 - 452,1 \cdot \omega_\phi + 8,871 \cdot \theta + 63,29 \cdot \omega_\phi^2 + 2,964 \cdot \omega_\phi \cdot \theta - 0,2918 \cdot \theta^2 - \\ - 2,58 \cdot \omega_\phi^3 - 0,229 \cdot \theta \cdot \omega_\phi^2 + 0,229 \cdot \omega_\phi \cdot \theta^2 - 0,025 \cdot \theta^3 + 0,059 \cdot \omega_\phi^3 \cdot \theta - \\ - 0,0042 \cdot \omega_\phi^2 \cdot \theta^2 - 0,0015 \cdot \omega_\phi \cdot \theta^3 + 0,00035 \cdot \theta^3 \quad . (3.35)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,953$.

Для случая транспортирования снежных частиц с характерным размером, $r_{ci}=0,03$ м, выражение полиномиальной аппроксимации суммарных средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от, θ , и, ω_ϕ , при числе заходов фрезы $n_3 = 3$, описывается следующим выражением:

$$N_{cp} = 437,7 - 29,24 \cdot \omega_\phi - 46,64 \cdot \theta + 10,52 \cdot \omega_\phi^2 - 1,247 \cdot \omega_\phi \cdot \theta + 2,776 \cdot \theta^2 - \\ - 0,237 \cdot \omega_\phi^3 - 0,638 \cdot \theta \cdot \omega_\phi^2 + 0,208 \cdot \omega_\phi \cdot \theta^2 - 0,082 \cdot \theta^3 - 0,012 \cdot \omega_\phi^3 \cdot \theta + \\ + 0,0049 \cdot \omega_\phi^2 \cdot \theta^2 - 0,0028 \cdot \omega_\phi \cdot \theta^3 + 0,0008 \cdot \theta^3 \quad . (3.36)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,995$. Описываемая уравнением (3.35) поверхность изображена на рисунке 3.130.

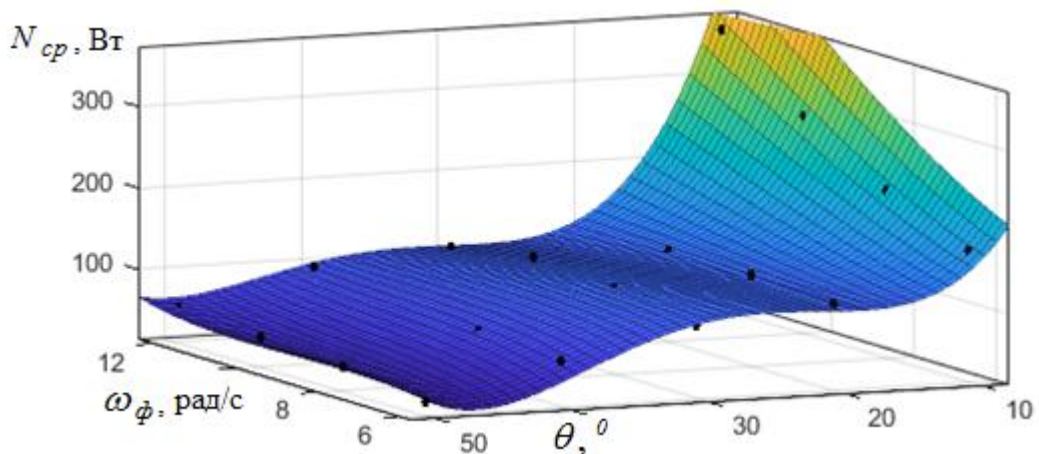


Рисунок 3.130 – Суммарные средние затраты мощности, N_{cp} , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_ϕ , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{ci}=0,03$ м, при числе заходов фрезы, $n_3=3$

Выражения полиномиальной аппроксимации суммарных средних значений производительности, Π_{cp} , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и числа

заходов, n_3 , для характерных размеров транспортируемых частиц, $r_{ci}=0,01$ м и $r_{ci}=0,03$ м, соответственно, имеют вид:

$$\begin{aligned} P_{cp} = & -0,865 + 0,285 \cdot \omega_{\phi} + 0,94045 \cdot \theta - 0,031 \cdot \omega_{\phi}^2 - 0,013 \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta - \\ & - 9,49 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^2 + 0,001 \cdot \omega_{\phi}^3 + 0,001 \cdot \theta \cdot \omega_{\phi}^2 + 9,48 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta^2 - \\ & - 1,77 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^3 - 4,93 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\phi}^3 \cdot \theta - 0,847 \cdot 10^{-8} \cdot \omega_{\phi}^2 \cdot \theta^2 - \\ & - 1,16 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta^3 - 2,86 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^4 \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} P_{cp} = & 11,81 - 5,129 \cdot \omega_{\phi} + 0,313 \cdot \theta + 0,644 \cdot \omega_{\phi}^2 + 0,058 \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta - 0,025 \cdot \theta^2 - \\ & - 0,024 \cdot \omega_{\phi}^3 - 0,013 \cdot \theta \cdot \omega_{\phi}^2 + 0,002 \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta^2 + 0,00041 \cdot \theta^3 + 0,0005 \cdot \omega_{\phi}^3 \cdot \theta - \\ & - 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\phi}^2 \cdot \theta^2 - 1,417 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta^3 - 2,57 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^4 \end{aligned} \quad (3.38)$$

Величина достоверности аппроксимации, соответственно, составила $R^2=0,844$, $R^2=0,952$.

Поверхности, описываемые уравнениями (3.37), (3.38) с точками значений суммарной средней производительности, по которым проводилась полиномиальная аппроксимация, представлены на рисунках 3.131 и 3.132, соответственно.

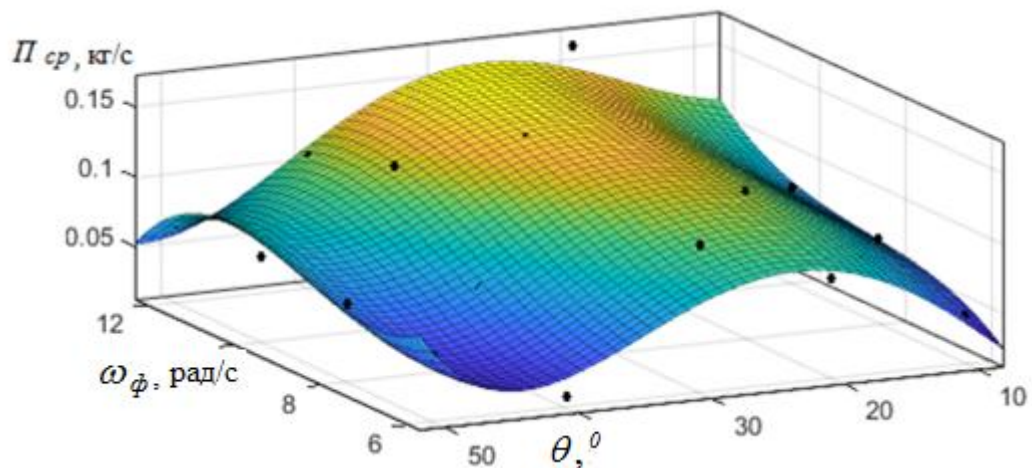


Рисунок 3.131 – Суммарная средняя производительность, P_{cp} , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{ci}=0,01$ м, при числе заходов фрезы, $n_3=3$

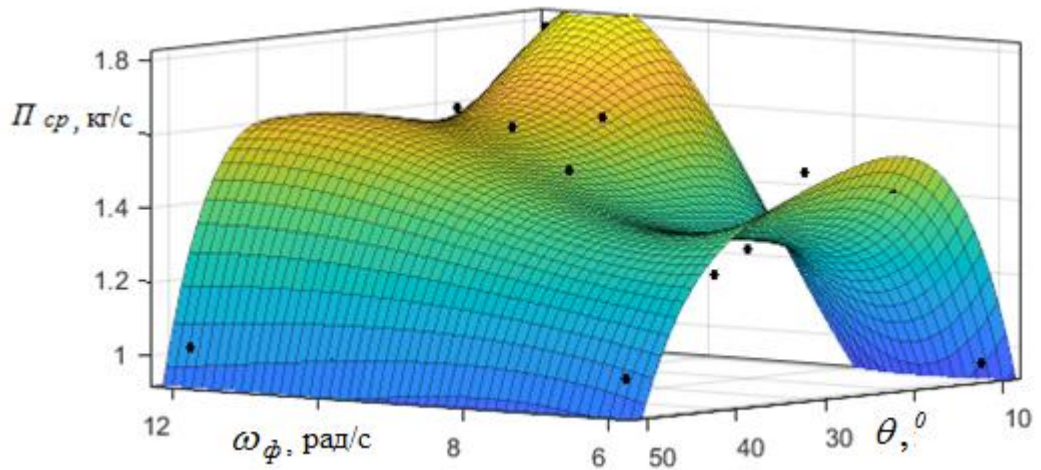


Рисунок 3.132 – Суммарная средняя производительность, P_{cp} , в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{ci}=0,03$ м, при числе заходов фрезы, $n_3=3$

На картограммах 3.133, 3.134 представлены зависимости удельных энергозатрат, NP , от угла захода, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , для характерных размеров транспортируемых частиц, $r_{ci}=0,01$ м и $r_{ci}=0,03$ м, соответственно.

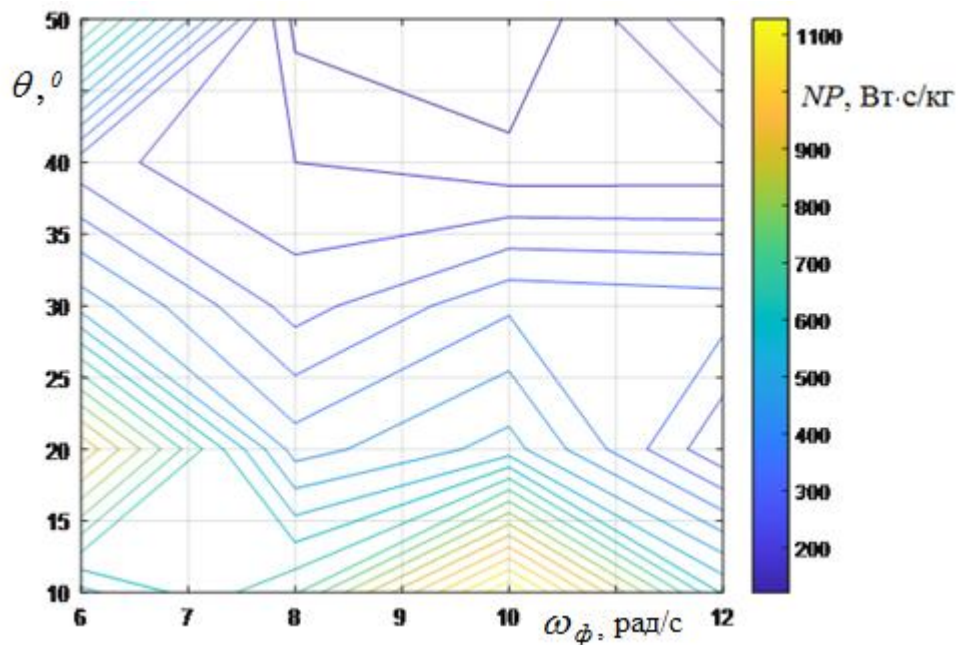


Рисунок 3.133 – Картограмма удельных энергозатрат от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{ci}=0,01$ м, при числе заходов фрезы, $n_3=3$

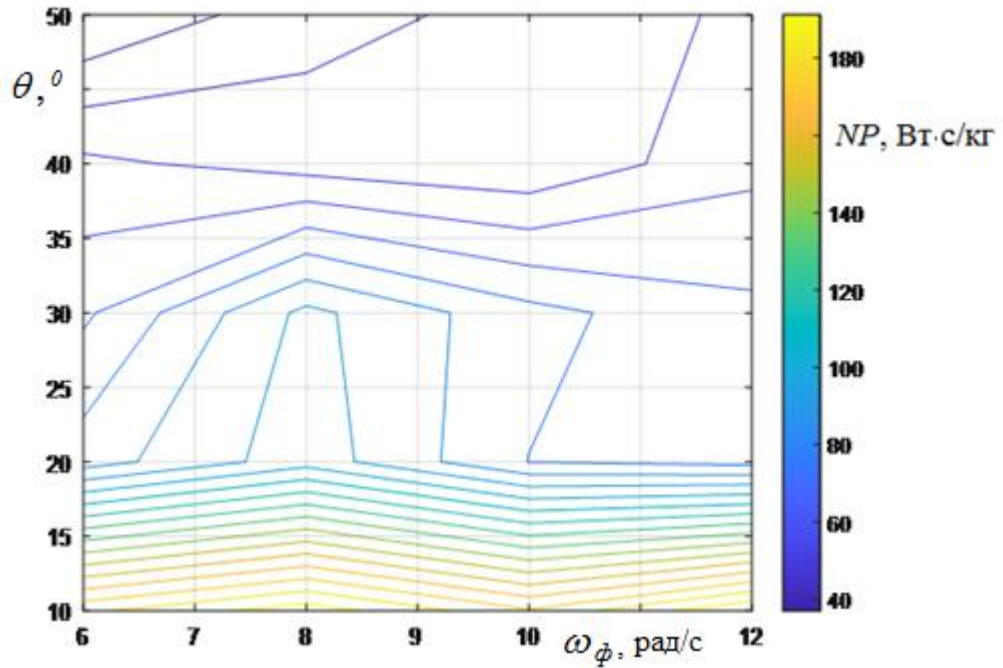


Рисунок 3.134 – Картограмма удельных энергозатрат от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_ϕ , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{ci}=0,03$ м, при числе заходов фрезы, $n_3=3$

Из рисунков 3.133, 3.134 следует, что оптимальные области с точки зрения минимизации величины удельной энергоёмкости существенно зависят от характерного размера частиц, r_{ci} . При малых характерных размерах частиц, r_{ci} , оптимум находится в области от $\theta=35$ до 50° угла захода ленты при значениях угловой скорости вращения рабочего элемента с, ω_ϕ , в диапазоне от 8 до 10 рад/с. Увеличение размера транспортируемых частиц, r_{ci} , приводит к необходимости уменьшения угловой скорости вращения до 8 рад/с, угловой диапазон остается прежним.

На рисунке 3.135 представлено изменение средних значений мощностей, N_{cp} , по всем транспортируемым частицам в зависимости от угловой скорости вращения однозаходной фрезы, ω_ϕ , и угла захода ленты фрезы, θ , за один загрузочный цикл для транспортируемых частиц с характерными размерами $r_i=0,01, \dots, 0,03$ м, с шагом 0,01 м. На рисунке 3.136 - изменение суммарной средней производительности, Π_{cp} , по всем транспортируемым частицам в зависимости от угловой скорости вращения фрезы, ω_ϕ , и угла захода ленты фрезы, θ , при аналогичных условиях.

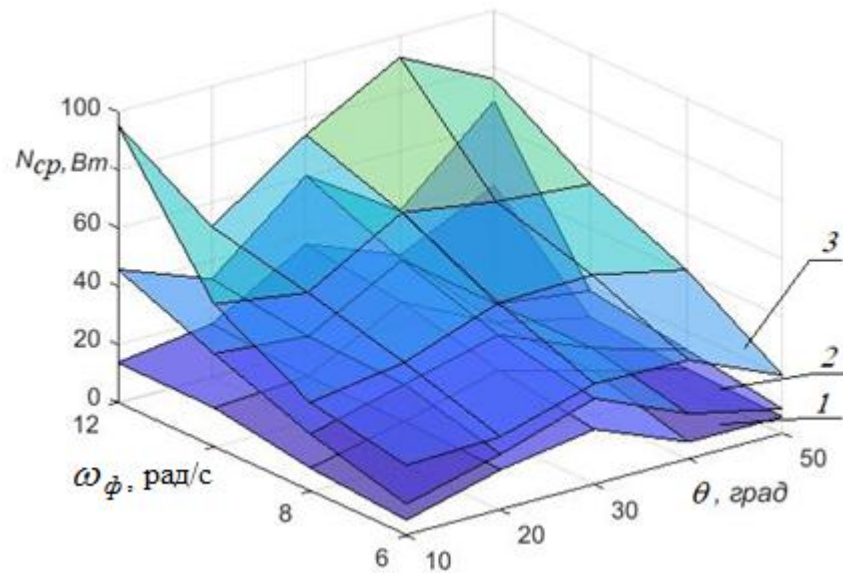


Рисунок 3.135 - Изменение средних значений мощностей по всем транспортируемым частицам, N_{cp} , в зависимости от угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , и угла захода ленты фрезы, θ , за один загрузочный цикл при максимальной емкости питателя (см. таблица 3.3), где
 1- $r_{qi}=0,01$ м; 2 - $r_{qi}=0,02$ м; 3 - $r_{qi}=0,03$ м

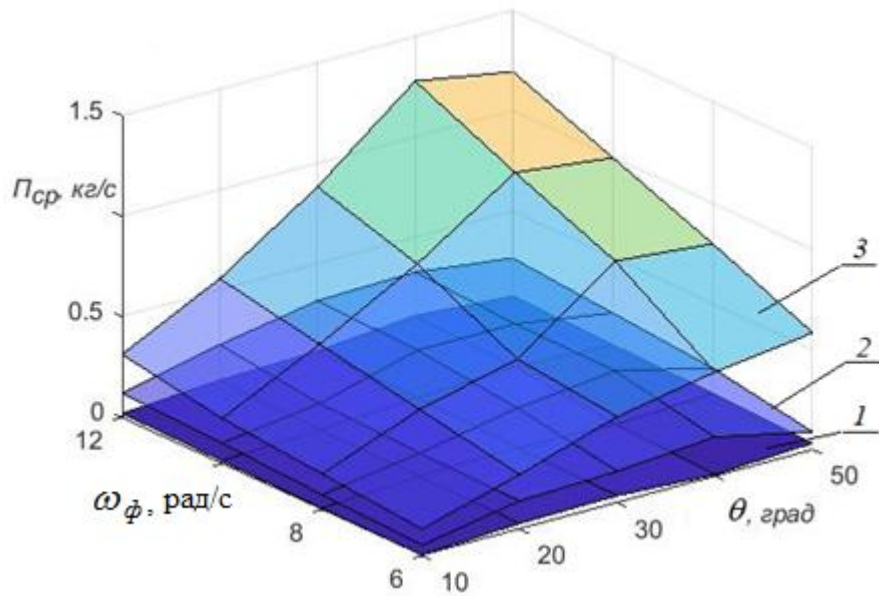


Рисунок 3.136 - Зависимость производительности фрезы питателя, P_{cp} , от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , где 1- $r_{qi}=0,01$ м; 2 - $r_{qi}=0,02$ м; 3 - $r_{qi}=0,03$ м

Из рисунка 3.135 следует наличие экстремумов мощности затрачиваемой на перемещение вырезанной снежной массы, в частности, области максимума и двух участков минимума. Однозначно, с увеличением угловой скорости вращения

фрезы, ω_ϕ , величина потребляемой мощности возрастает в любом диапазоне угловых скоростей вращения. Влияние угла захода ленты фрезы не однозначно и носит более сложный характер.

Полученные результаты по форме поверхностей схожи с результатами полученными с использованием DEM метода для почвоуборочной машины [145]. Численные значения и области экстремумов отличаются за счет различных количественных значений параметров, описывающих транспортируемую среду.

Изменение средней координаты по координатам всех транспортируемых частиц, x_i , в области загрузочного окна по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω_ϕ , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{ci}=0,03$ м, представлено на рисунке 3.137.

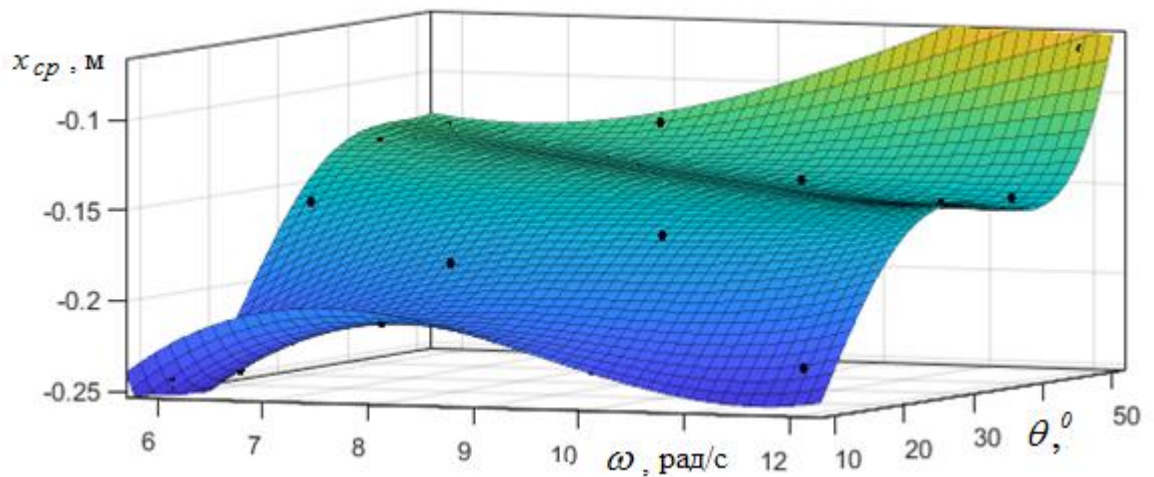


Рисунок 3.137 – Изменение средней координаты по координатам всех транспортируемых частиц, x_i , в области загрузочного окна по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от угла захода, θ , ленты фрезы и угловой скорости вращения фрезы, ω_ϕ , при характерном размере транспортируемых частиц, $r_{ci}=0,01$ м

Уравнение, полученное в результате полиномиальной аппроксимации, изменения средней координаты по координатам всех транспортируемых частиц, x_i , в области загрузочного окна по оси $O_\phi X_\phi$ в зависимости от угла захода, θ , ленты фрезы и угловой скорости вращения фрезы, ω_ϕ , при характерном размере транспортируемых частиц, $r_{ci}=0,01$ м, для трехзаходной фрезы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 x_{cp} = & -1,014 + 0,385 \cdot \omega_{\phi} - 0,061 \cdot \theta - 0,047 \cdot \omega_{\phi}^2 - 0,0009 \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta + 0,0042 \cdot \theta^2 + \\
 & + 0,0017 \cdot \omega_{\phi}^3 + 0,00097 \cdot \theta \cdot \omega_{\phi}^2 + 0,0003 \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta^2 - 6,636 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^3 - \\
 & - 3,795 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\phi}^3 \cdot \theta + 2,843 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_{\phi}^2 \cdot \theta^2 + 3,152 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta^3 + \\
 & + 3,335 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^4
 \end{aligned} \quad . (3.39)$$

На рисунках 3.138, 3.139, 3.140 представлены изменения проекций векторов скоростей снежных частиц в области загрузочного окна на оси $O_{\phi}X_{\phi}$ и $O_{\phi}Y_{\phi}$, а также величин абсолютных скоростей снежных частиц в зависимости от координаты по оси $O_{\phi}X_{\phi}$, и угловой скорости вращения, ω_{ϕ} , рабочего органа.

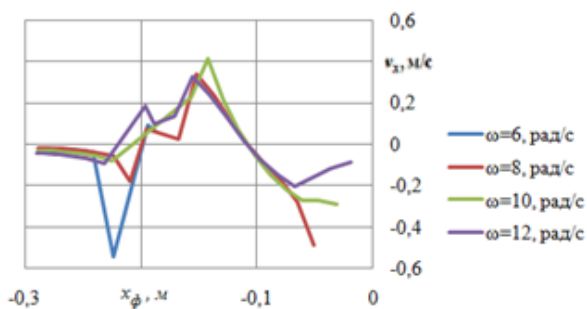


Рисунок 3.138 – Изменение величины проекции векторов скоростей снежных частиц, v_x , по оси $O_{\phi}X_{\phi}$ в зависимости от угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , при характерном размере транспортируемых частиц, $r_{ci}=0,01$ м

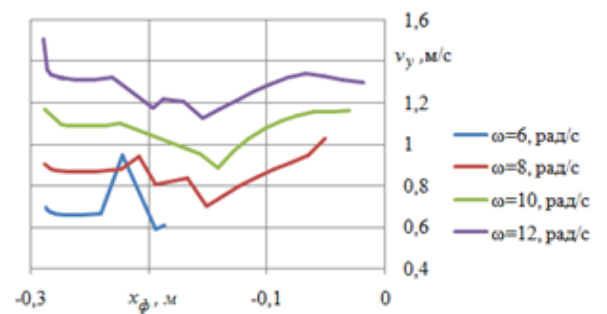


Рисунок 3.139– Изменение величины проекции векторов скоростей снежных частиц, v_y , по оси $O_{\phi}X_{\phi}$ в зависимости от угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , при характерном размере транспортируемых частиц, $r_{ci}=0,01$ м

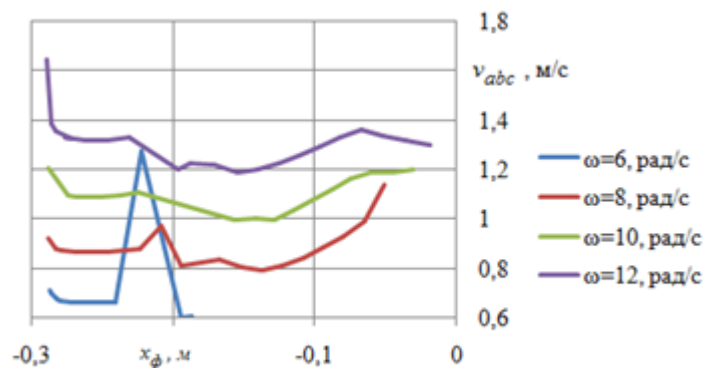


Рисунок 3.140 – Изменение величины абсолютных скоростей снежных частиц, v_{abs} , по оси $O_{\phi}X_{\phi}$ в зависимости от угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , при характерном размере транспортируемых частиц, $r_{ci}=0,01$ м

По результатам оценки значений векторов скоростей и координат снежного потока в области загрузочного окна представляется возможным провести оценку угловой скорости вращения ротора МА РСО. Оценка заключается в том, что необходимо определить максимальное, по оси $O_\phi Z_\phi$, положение частицы, $z_{i\ max}$, что позволяет определить угол, α_p , на который должен повернуться ротор, чтобы обеспечить поступление в межлопастное пространство всех частиц за один полный оборот фрезы. Этот угол может быть найден по формуле:

$$\alpha_p = \arccos\left(\frac{z_{i\ max}}{R_p}\right).$$

В результате для фрезы с углом захода, $\theta=20^\circ$, транспортируемых снежных частиц с характерным радиусом, $r_{ci}=0,01$ м, и угловой скорости вращения фрезы, $\omega_\phi=10$ рад/с были получены графические зависимости угловой скорости вращения ротора МА от поступательной скорости РСО при различных радиусах фрезы питателя (рисунок 3.141).

На рисунке 3.142, представлена картограмма изменения производительности по массе питателя от значения поступательной скорости РСО, $V_{пер}$, м/с, и радиус фрезы, R_ϕ , м, питателя.

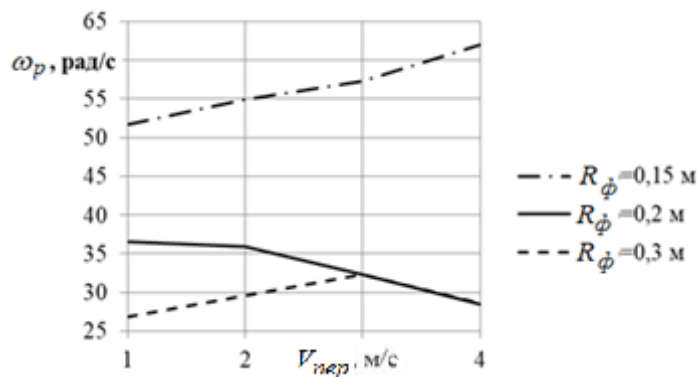


Рисунок 3.141 – Угловая скорость вращения, ω_p , рад/с, ротора метательного аппарата РСО в зависимости от радиуса фрезы, R_ϕ , и поступательной скорости РСО, $V_{пер}$

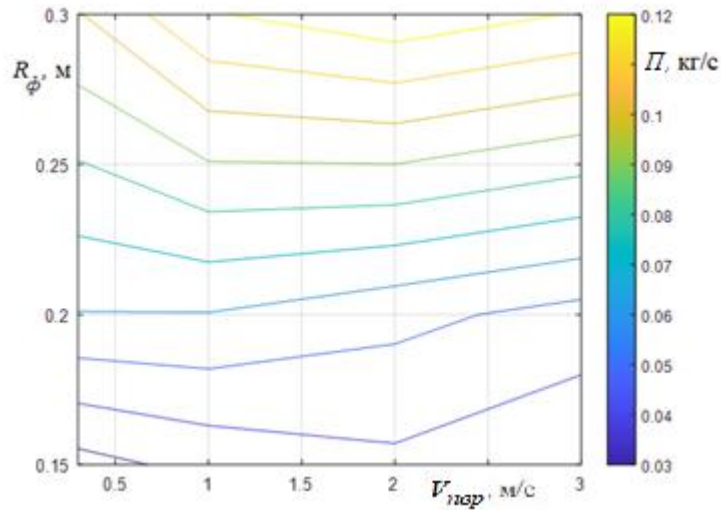


Рисунок 3.142 – Картограмма производительности по массе от радиуса трехзаходной фрезы, R_ϕ , и поступательной скорости РСО, $V_{пер}$

В свою очередь, для каждого диаметра фрезы, R_ϕ , м, имеется своя оптимальная величина поступательной скорости, $V_{пер}$, м/с, с точки зрения отношения затрат мощности на производительность, NP , Вт·с/кг. Задаваясь радиусом фрезы, R_ϕ , м, по рисунку 3.143 подбираем величину поступательной скорости РСО, $V_{пер}$, м/с, из условия его максимальной энергоэффективности.

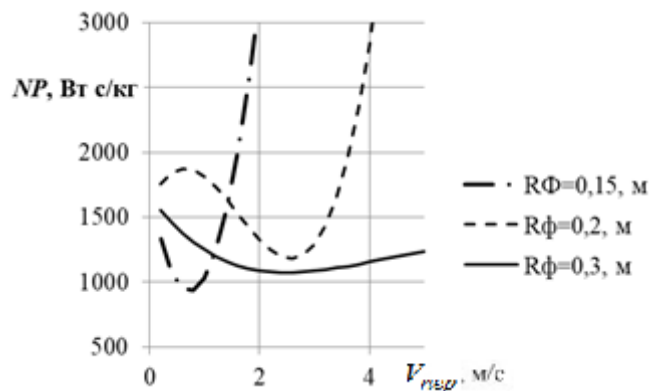


Рисунок 3.143 – Зависимость энергоэффективности от поступательной скорости РСО, $V_{пер}$, при различных радиусах горизонтальной фрезы, R_ϕ , м

Необходимо учесть, что заданную производительность по массе необходимо разделить на два, т.к. все вычисления выполняются для одной половины питателя,

что обусловлено принятым в разделе 2 допущения о наличии вертикальной плоскости симметрии.

Уточнение величины весовой производительности, Q , кг/с, от параметров, V_{nep} , и, R_{ϕ} , можно произвести по формуле:

$$Q = -0,1154 + 0,06778 \cdot V_{nep} + 1,17 \cdot R_{\phi} - 0,0001 \cdot V_{nep}^2 - 0,6113 \cdot V_{nep} \cdot R_{\phi} - 1,619 \cdot R_{\phi}^2 + 0,0006 \cdot V_{nep}^3 - 0,038 \cdot V_{nep}^2 \cdot R_{\phi} + 1,716 \cdot V_{nep} \cdot R_{\phi}^2 \quad (3.40)$$

Величина достоверности аппроксимации расчетных значений составила $R^2=0,964$.

3.6. Влияние числа заходов ленты фрезы питателя на показатели эффективности работы роторных снегоочистителей

Геометрическое описание линии, по которой осуществляется вырезание фрезой снежной массы из снежного массива, может быть получено из уравнений (2.1), (2.2).

За интервал времени Δt фреза повернется на угол $\Delta\phi$, а последующая точка фрезы войдет в контакт со снежным массивом, толщиной, h , расположенная на расстоянии Δy_{ϕ} , которое определяется по формуле [12]:

$$\Delta x_0 = V_{nep} \cdot \Delta t + x_{\phi i} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot \Delta t).$$

$$\Delta y_0 = \omega_{\phi} \cdot \Delta t \cdot R_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta,$$

Так как высота, h , снежного массива фиксированная, то:

$$x_{\phi i} = \frac{z_{\phi i}}{\cos(\omega_{\phi i} \cdot t)} = \frac{h}{\cos(\omega_{\phi i} \cdot t)}.$$

Соответственно

$$x_0 = V_{nep} \cdot (t + \Delta t) + h \cdot \operatorname{tg}(\omega_{\phi} \cdot \Delta t),$$

$$y_0 = y_0 + \omega_{\phi} \cdot \Delta t \cdot R_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \theta.$$

В результате получена система двух уравнений, решение которой дает наклонную прямую в плоскости $X_0O_0Y_0$. Представим полученную систему в виде уравнения прямой:

$$x_0 = \frac{V_{nep}}{R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot \text{tg}\theta} \cdot y_0 + h \cdot \text{tg}(\omega_\phi \cdot \Delta t). \quad (3.41)$$

Уравнение (3.41), интерпретируется, как линия, по которой осуществляется вырезание снежной массы из снежного массива. Наклон линии реза зависит от R_ϕ , θ и V_{nep} . Линия реза является прямой, если $\theta = \text{const}$ (рисунок 3.144, а). Иначе это будет кривая второго порядка. На рисунке 3.144, б так же представлена линия реза в случае, когда θ изменяется по линейному закону, например:

$$\theta = \theta_0 - y \cdot 0,01.$$

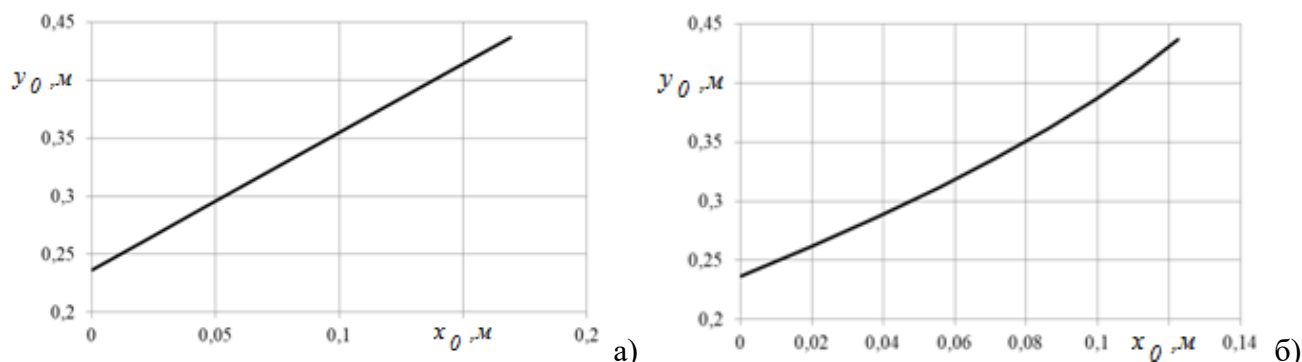


Рисунок 3.144 –Линия вырезания снежной массы из снежного массива: а) при $\theta = \text{const}$; б) при $\theta = \theta_0 - 0,01 \cdot y$.

В общем виде характер наклона линии реза определяется из следующих условий [12]:

$$\omega_\phi \cdot R_\phi \cdot \text{tg}\theta = V_{nep}; \quad (3.42)$$

$$\omega_\phi \cdot R_\phi \cdot \text{tg}\theta > V_{nep}; \quad (3.43)$$

$$\omega_\phi \cdot R_\phi \cdot \text{tg}\theta < V_{nep}. \quad (3.44)$$

При выполнении условия (3.42) угол наклона линии реза составляет 45° . Для условия (3.43) и (3.44) меньше 45° и больше 45° , соответственно.

Очевидно, что угловая скорость вращения фрезы питателя ФРС, ω_ϕ , задает толщину вырезаемой снежной стружки.

Топология изменения конструкции фрезы питателя ФРС, может быть представлена следующим образом: при уменьшении угла захода ленты фрезы (3.44), фреза трансформируется в режущий диск (рисунок 3.145). Число заходов, n_3 , будет соответствовать количеству режущих дисков, а длина шага ленты фрезы для одношаговых фрез станет равной сумме длин участков между соседними дисками [12]. Соответственно, количество режущих дисков выбирается из условия обеспечения ширины захвата и толщины вырезаемой стружки или скалывания ледовых образований на подстилающей поверхности [12]. Толщина вырезаемой снежной стружки так же будет равна длине участка между соседними дисками. Примеры реализации режущих дисков в конструкциях фрез питателей ФРС описаны, например, в патенте US3395466A. Кроме этого в работе [161] представлено описание такой конструкции. В случае (2.43) спираль ленты фрезы вытягивается и трансформируется в режущую полосу (рисунок 3.146). Количество таких полос равно, n_3 , и так же зависит от толщины вырезаемой снежной массы. Длина шага станет равной ширине захвата, а вырезание снежной массы будет происходить одновременно по всей ширине захвата [12]. Похожее инженерное решение описано в патенте US4951403A.

Соответственно, для случая многозаходной фрезы, линия реза будет представлять собой ломанную линию имеющую точку неустранимого разрыва первого рода [12, 85], а система уравнений траектории многозаходной фрезы будет иметь вид:

$$x_0 = \frac{V_{nep}}{R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot tg\theta} \cdot y_0 + h \cdot tg(\omega_\phi \cdot \Delta t) + \sum_{j=1}^{n_3} (i-1) \cdot V_{nep} \cdot \Delta t; j=j+1 \text{ при } t > t_i + \Delta t.$$

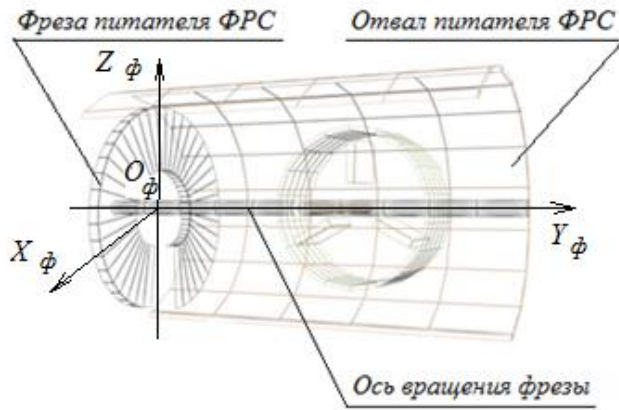


Рисунок 3.145– Вид фрезы питателя ФРС при значениях угла захода, θ , ленты фрезы стремящихся к 0^0

Рассмотрим влияние числа заходов ленты фрезы, n_z , на параметры рабочего процесса транспортирования снежной массы. В ходе расчетов были получены результаты транспортирования снежной массы, состоящей из группы частиц с радиусом, $r_{ci}=0,03$ м, одним заходом фрезы, для случая максимальной емкости, с угловой скоростью вращения, $\omega_\phi=6$ рад/с и углом захода ленты фрезы, $\theta=10^0$ [10].

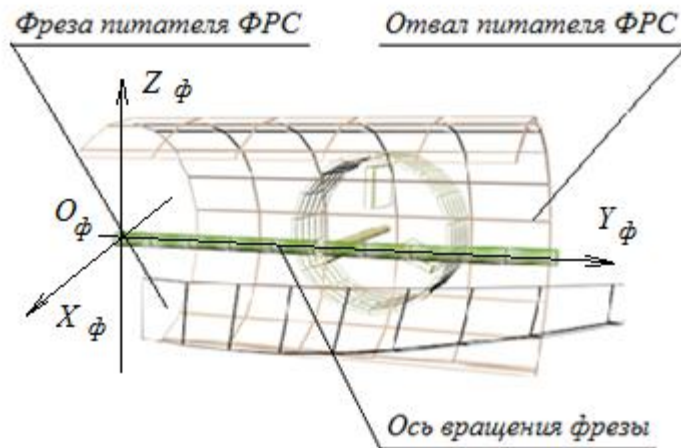


Рисунок 3.146 – Вид фрезы питателя ФРС при значениях угла захода, θ , ленты фрезы стремящихся к 90^0

Интервалы времени, через которые начинают работать последующие заходы фрезы питателя ФРС, $t_{ц}$, определялись по формуле (3.2).

Результаты вычислений интервалов времени, $t_{ц}$, для различных чисел заходов фрезы питателя ФРС и ее угловых скоростей вращения представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Интервалы времени, Δt_z , для различных чисел заходов фрезы питателя ФРС и ее угловых скоростей вращения

ω_f , рад/с	Число заходов ленты фрезы, n_z			
	2	3	4	5
6	0,356932	0,237955	0,178466	0,142773
8	0,267699	0,178466	0,13385	0,10708
10	0,214159	0,142773	0,10708	0,085664
12	0,178466	0,118977	0,089233	0,071386

На рисунках 3.147 – 3.150 представлены изменения суммарной мощности, N_c , работы фрезы питателя ФРС при транспортировании снежной массы.

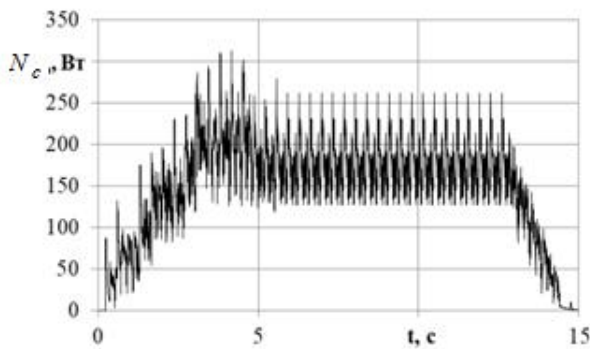


Рисунок 3.147 – Изменение суммарной мощности двухзаходной фрезы питателя ФРС при транспортировании снежной массы во времени, t , с.

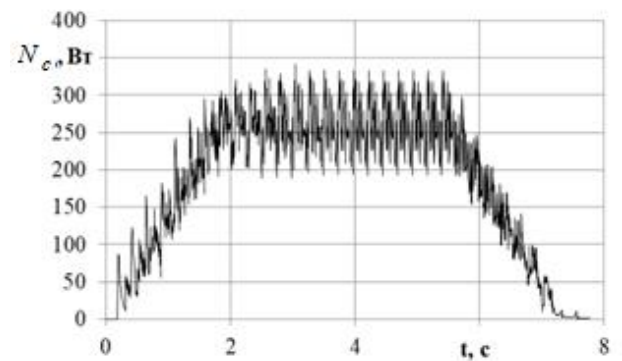


Рисунок 3.148 – Изменение суммарной мощности трехзаходной фрезы питателя ФРС при транспортировании снежной массы во времени, t , с.

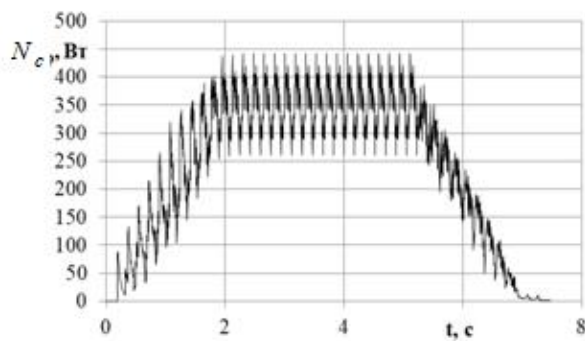


Рисунок 3.149 – Изменение суммарной мощности четырехзаходной фрезы питателя ФРС при транспортировании снежной массы во времени, t , с.

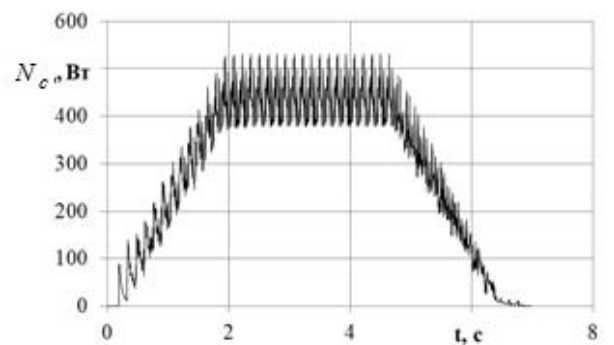


Рисунок 3.150 – Изменение суммарной мощности пятизаходной фрезы питателя ФРС при транспортировании снежной массы во времени, t , с.

Из рисунков можно сделать следующие выводы:

- с увеличением числа заходов ленты фрезы питателя ФРС, n_3 , сокращается продолжительность переходного периода;

- с увеличением числа заходов ленты фрезы, n_3 , возрастает средняя величина суммарной мощности, затрачиваемой на транспортирование снежной массы фрезой питателя ФРС.

Следующим этапом является определение зависимости изменения затрат суммарной мощности от числа заходов ленты фрезы. Для этого выбирался стационарный участок работы фрезы питателя ФРС, где изменения суммарной мощности, затрачиваемой на перемещение вырезанной снежной массы, носят периодический характер. Для случаев, представленных на рисунках 3.151 – 3.154, средние значения составили: 173,43 Вт для двухзаходной фрезы; 262,57 Вт для трехзаходной фрезы; 350,74 Вт для четырехзаходной фрезы; 438,11 Вт для пятизаходной фрезы.

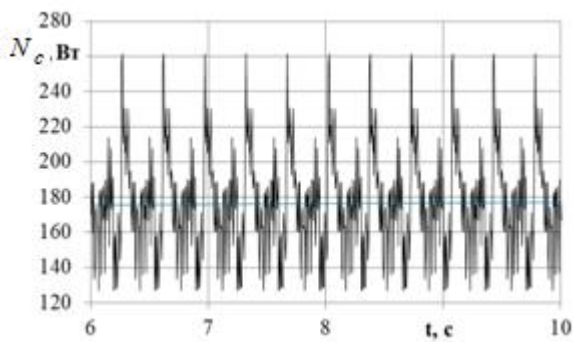


Рисунок 3.151 – Изменение суммарной мощности двухзаходной фрезы, $n_3=2$, питателя ФРС при транспортировании снежной массы в стационарном режиме.

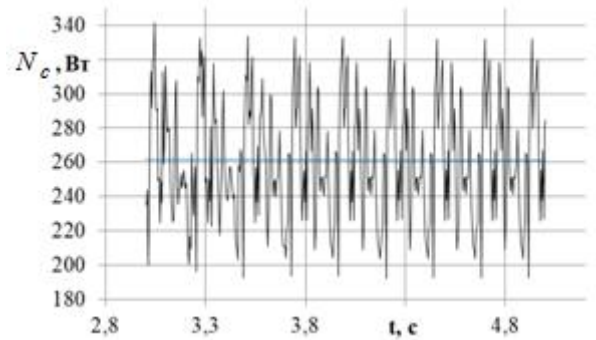


Рисунок 3.152 – Изменение суммарной мощности трехзаходной фрезы питателя, $n_3=3$, ФРС при транспортировании снежной массы в стационарном режиме.

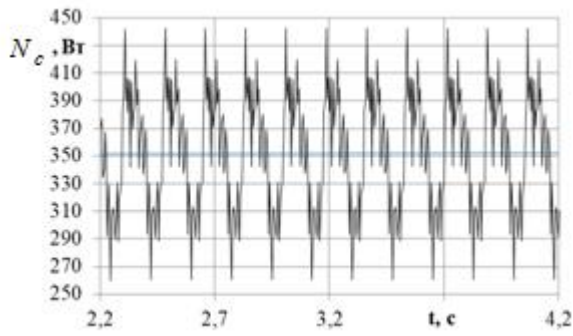


Рисунок 3.153 – Изменение суммарной мощности четырехзаходной фрезы, $n_3=4$, питателя ФРС при транспортировании снежной массы в стационарном режиме.

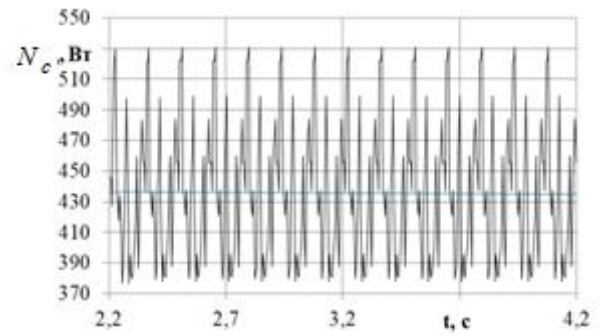


Рисунок 3.154 – Изменение суммарной мощности пятизаходной фрезы питателя, $n_3=5$, ФРС при транспортировании снежной массы в стационарном режиме.

На рисунке 3.155 представлен график влияния числа заходов на суммарную среднюю мощность, N_{cp} , затрачиваемую на транспортирование снежной массой фрезой питателя ФРС.

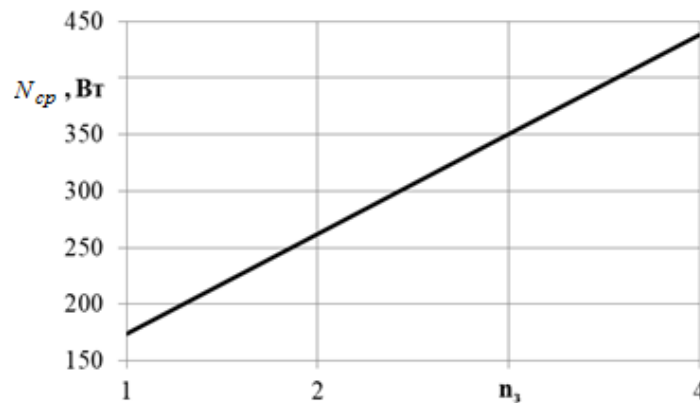


Рисунок 3.155 – Зависимость изменения суммарной средней мощности, N_{cp} , затрачиваемой на транспортирование снежной массы в зависимости от числа заходов фрезы питателя ФРС, n_3 углом захода ленты фрезы, $\theta=10^\circ$

Уравнение регрессии имеет вид:

$$N_{cp} = 88,221 \cdot n_3 + 85,66 .$$

С увеличением угловой скорости, ω_ϕ , суммарные средние затраты мощности, N_{cp} , на транспортирование снежной массы также линейно возрастают, и угол наклона прямой увеличивается (рисунок 3.156), что позволяет сделать вывод о том, что при увеличении угловой скорости вращения фрезы, число заходов лент

фрезы питателя ФРС, должно быть ограничено, иначе затраты мощности будут крайне велики.

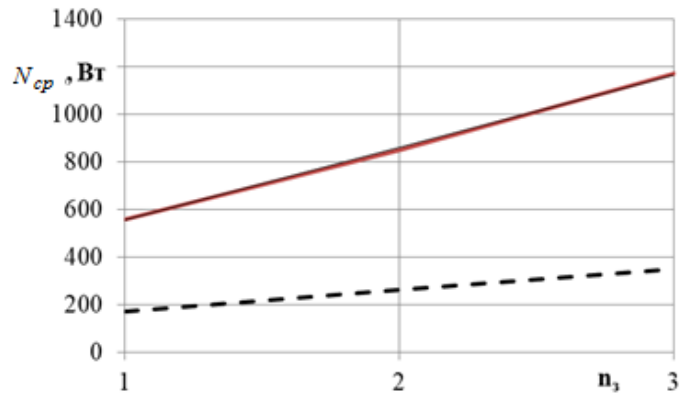


Рисунок 3.156 – Зависимость изменения суммарной мощности затрачиваемой на транспортирование снежной массы в зависимости от числа заходов фрезы питателя ФРС, n , где 1 – при $\omega_\phi=6$ рад/с; 2 – при $\omega_\phi=10$ рад/с.

Уравнение регрессии при $\omega_\phi=10$ рад/с уже имеет вид:

$$N_{cp} = 305,12 \cdot n_3 + 249,74.$$

Изменение средних суммарных значений мощностей, N_{cp} , по всем транспортируемым частицам в зависимости от их радиуса, r_{qi} , и угла захода ленты фрезы, θ , за один загрузочный цикл для однозаходной фрезы при максимальной емкости питателя представлено на рисунке 3.157 [17].

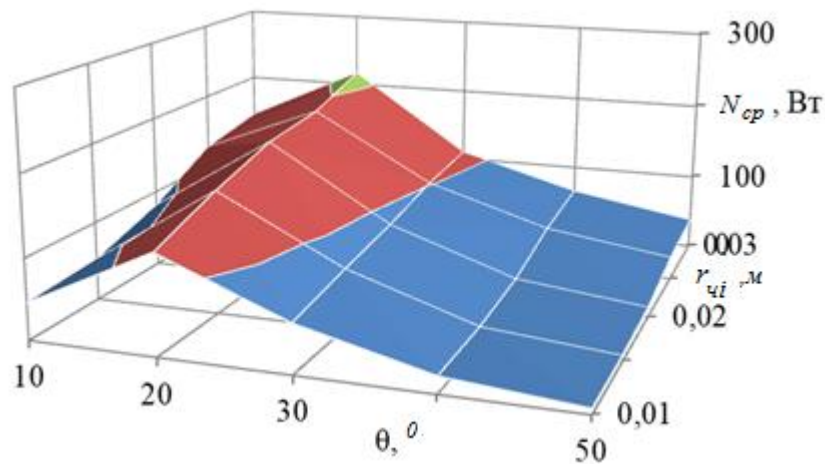


Рисунок 3.157 - Изменение средних суммарных значений мощностей по всем транспортируемым частицам, N_{cp} , в зависимости от их радиуса, r_{qi} , и угла захода ленты фрезы, θ , за один загрузочный цикл для однозаходной фрезы

Из представленной зависимости видно, что с увеличением характерного размера частиц мощность, которую необходимо приложить к фрезе питателя ФРС монотонно возрастает, что касается угла захода ленты фрезы, то с увеличением, θ , затраты мощности уменьшаются, для случая транспортирования снежных частиц [17].

Результаты теоретических исследований изменения суммарной мощности трех и четырех заходных фрез питателя, ΔN_{34} , при транспортировании снежной массы с характерным радиусом частиц 0,01 м, и угловой скорости вращения фрезы 10 рад/с, с углом захода фрезы 20° , при переходе от 3-х заходной фрезы к 4-х заходной в зависимости от радиуса фрезы и поступательной скорости РСО, могут быть определены выражением:

$$\begin{aligned} \Delta N_{34} = & -83,48 + 64,34 \cdot V_{пер} + 734,9 \cdot R_{ф} - 15,37 \cdot V_{пер}^2 - 392,6 \cdot V_{пер} \cdot R_{ф} - \\ & - 1232 \cdot R_{ф}^2 + 2,044 \cdot V_{пер}^3 + 24,89 \cdot V_{пер}^2 \cdot R_{ф} + 634,7 \cdot V_{пер} \cdot R_{ф}^2 \end{aligned} \quad (3.45)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,932$.

При переходе от 4-х заходной к 5-и заходной фрезе, ΔN_{45} , соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta N_{45} = & -101,9 + 67,59 \cdot V_{пер} + 940,5 \cdot R_{ф} - 12,38 \cdot V_{пер}^2 - 471 \cdot V_{пер} \cdot R_{ф} - \\ & - 17,21 \cdot R_{ф}^2 + 2,034 \cdot V_{пер}^3 + 18,13 \cdot V_{пер}^2 \cdot R_{ф} + 862,2 \cdot V_{пер} \cdot R_{ф}^2 \end{aligned} \quad (3.46)$$

Величина достоверности аппроксимации равна $R^2=0,953$.

На рисунке 3.158 изменение производительности фрезы питателя при изменении числа заходов от $n_3=3$ к $n_3=4$ и от $n_3=4$ к $n_3=5$, в зависимости от радиуса фрезы и поступательной скорости РСО.

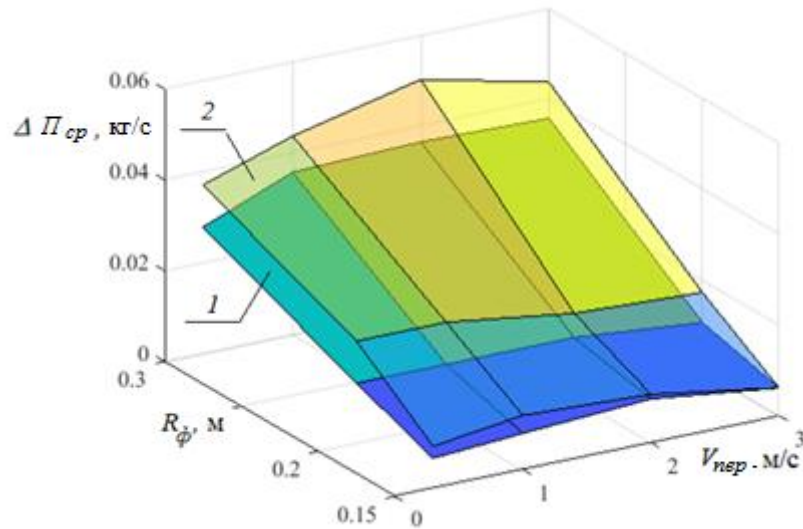


Рисунок 3.158 - Изменение производительности фрезы питателя, $\Delta\Pi_{ср}$, в зависимости от радиуса фрезы и поступательной скорости РСО, где 1 - при изменении числа заходов от , $n_з=3$ к $n_з=4$; 2 - от $n_з=4$ к $n_з=5$

В результате полиномиальной аппроксимации были получены уравнения изменения производительности, $\Delta\Pi_{ср}$, при изменении числа заходов от $n_з=3$ к $n_з=4$ и от $n_з=4$ к $n_з=5$, соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_{34} = & -0,0382 + 0,0076 \cdot V_{нпр} + 0,406 \cdot R_{ф} + 0,0021 \cdot V_{нпр}^2 - 0,106 \cdot V_{нпр} \cdot R_{ф} - \\ & - 0,569 \cdot R_{ф}^2 + 2,52 \cdot 10^{-5} \cdot V^3 - 0,021 \cdot V_{нпр}^2 \cdot R_{ф} + 0,448 \cdot V_{нпр} \cdot R_{ф}^2 \end{aligned} \quad (3.47)$$

Величина достоверности аппроксимации равна $R^2=0,993$.

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_{45} = & -0,0043 + 0,0189 \cdot V_{нпр} + 0,024 \cdot R_{ф} + 0,0008 \cdot V_{нпр}^2 - 0,159 \cdot V_{нпр} \cdot R_{ф} + \\ & + 0,267 \cdot R_{ф}^2 - 0,00057 \cdot V_{нпр}^3 - 0,0012 \cdot V_{нпр}^2 \cdot R_{ф} + 0,395 \cdot V_{нпр} \cdot R_{ф}^2 \end{aligned} \quad (3.48)$$

Величина достоверности аппроксимации составляет $R^2=0,993$.

При увеличении угла захода, дополнительные затраты мощности с увеличением числа заходов уменьшаются, так при $\theta=20^\circ$ они составляют 20 Вт на каждый заход. При увеличении поступательной скорости РСО более 3 м/с при любых радиусах фрезы увеличение числа заходов до 5 при транспортировании снежной массы с характерным радиусом частиц, $r_{чi}=0,01$ м наблюдается снижение производительности от 2 до 20% по сравнению с $n_з=4$. Меньшие значения падения прироста производительности характерны для фрез большего радиуса, что

позволяет сформулировать правило задания, на этапе эскизного проектирования, числа заходов фрезы питателя РСО в зависимости от ее радиуса, которое представлено диаграммой на рисунке 3.159.

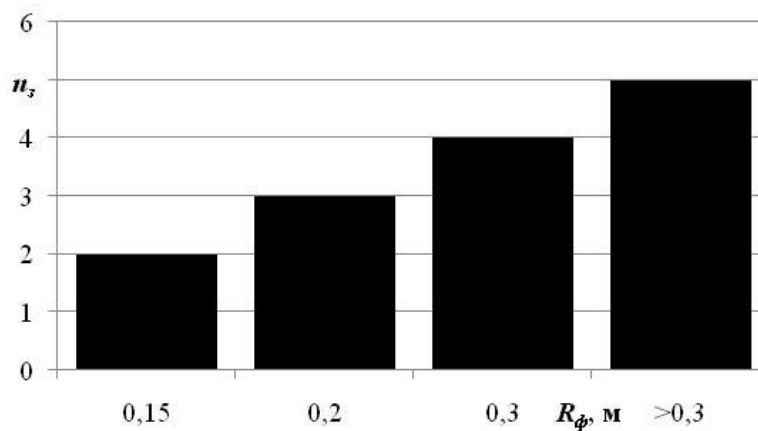


Рисунок 3.159 – Ориентировочные значения чисел заходов фрезы питателя РСО от ее радиуса при угле захода, $\theta=20^\circ$ и угловой скорости, $\omega_\phi=10$ рад/с

На основании полученных теоретических закономерностей представляется возможным построить методику проектирования рабочего оборудования РСО. Алгоритм методики представлен на рисунке 3.160.

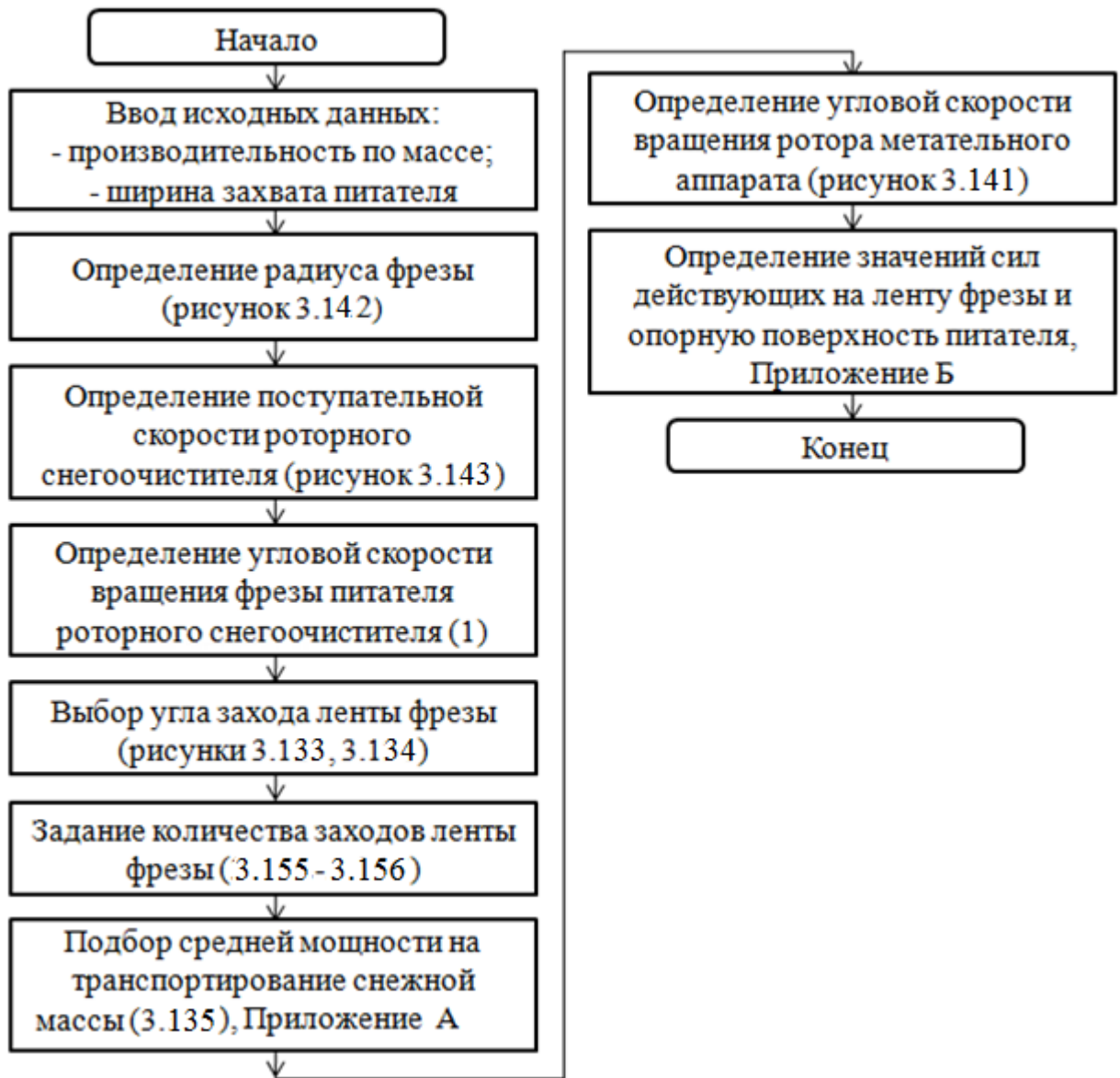


Рисунок 3.160 – Алгоритм методики проектирования рабочего оборудования РСО

3.7. Теоретические исследования влияния конструктивных и технологических параметров роторного снегоочистителя на формирование снежных валов

Учитывая тот факт, что в настоящее время на территории селитебной застройки в качестве снегоочистителей достаточно больших открытых площадок (территорий парковок, площадей непосредственно прилегающих к зданиям и сооружениям) используются ФРС малой мощности, рассмотрим процесс формирования снежных валов при проведении снегоочистных работ машинами

такого класса [11]. Для проведения теоретических исследований влияния параметров роторного снегоочистителя на изменение толщины снежного вала, на ЭВМ был реализован алгоритм, представленный в приложении Ж. Фрагмент рабочего окна программы по определению толщины снежного вала представлен на рисунке 3.161.

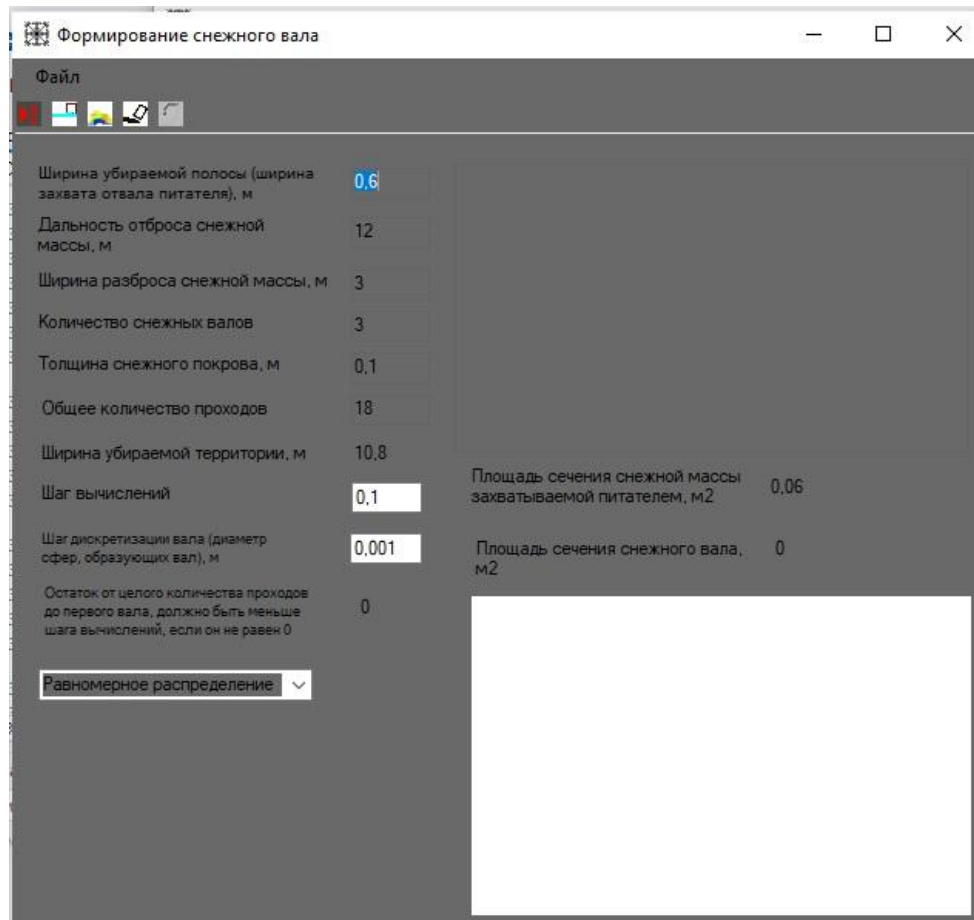


Рисунок 3.161 - Фрагмент рабочего окна программы по определению толщины снежного вала

Были проведены исследования изменения ширины и максимальной толщины снежного вала в зависимости от количества проходов. В качестве примера рассмотрим очистку территории шириной 30 м. При дальности отброса, $L=7$ м и ширине разброса, $B_p=1,5$ м, при ширине захвата питателя ФРС, $B=0,6$ м количество проходов ФРС для очистки составит 50 [11]. График изменения толщины снежного вала, h , в зависимости от количества проходов представлен на рисунке 3.162, при ширине разброса снежной массы, $B_p=1,6$ и дальности отброса, $L=7$ м, и $L=12$ м, соответственно [11]. На рисунке 3.163 представлено изменение

ширины и высоты снежного покрова в зависимости от количества проходов ФРС при ширине разброса снежной массы 1,6 и 3 м соответственно [11].

Из рисунка 3.162 следует, что увеличение дальности отброса приводит к снижению скорости роста толщины снежного вала, при этом из выражения (2.80) следует, чем меньше отношение ширины захвата к ширине разброса, тем медленнее растет толщина снежного вала, или при увеличении ширины захвата питателя ФРС, необходимо стремиться с увеличению ширины разброса снежного потока, который формируется в метательном аппарате ФРС.

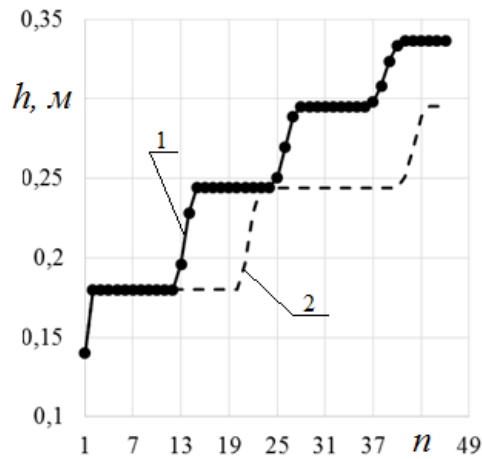


Рисунок 3.162 - Изменение максимальной толщины снежного вала в зависимости от количества проходов ФРС, при ширине разброса, $b= 1,5$ м, начальной толщине снежного покрова 0,1 м и 1 – при дальности отброса, $L= 7$ м; 2 – при дальности отброса, $L=12$ м.

На рисунках 3.163, 3.164 представлен профиль формируемого снежного вала при заданных выше исходных данных.

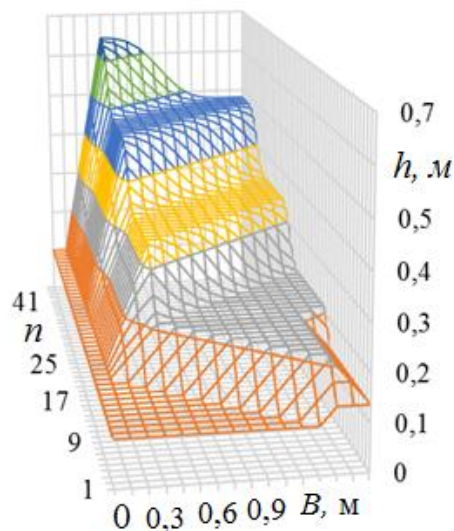


Рисунок 3.163 - Изменение размеров снежного вала в зависимости от количества проходов и ширины захвата питателя ФРС, при ширине разброса, $B_p = 1,6$ м

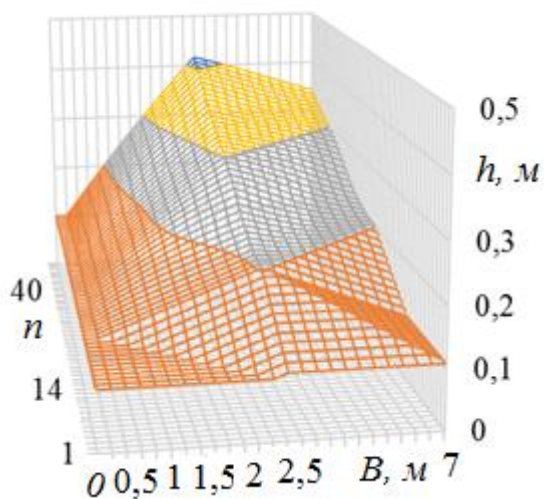


Рисунок 3.164 - Изменение размеров снежного вала в зависимости от количества проходов и ширины захвата питателя ФРС, при ширине разброса, $B_p = 7$ м

График изменения толщины снежного вала в зависимости от длины отброса представлен на рисунке 3.165. В свою очередь, график изменения максимальной толщины снежного вала в зависимости от ширины пятна разброса представлен на рисунке 3.166, 3.168.

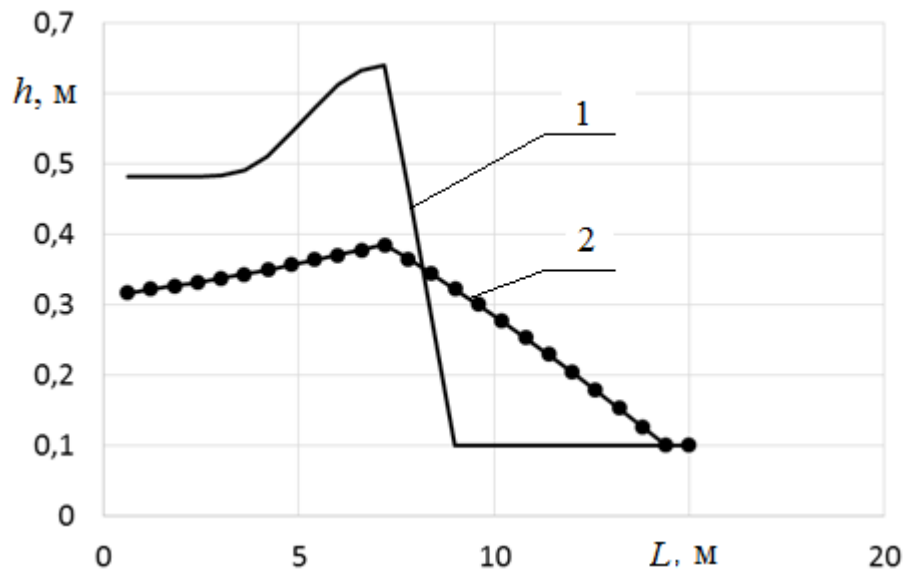


Рисунок 3.165 - Профиль снежного вала при количестве проходов 45 и: 1 - ширине разброса 1,6; 2 - ширине разброса 7 м

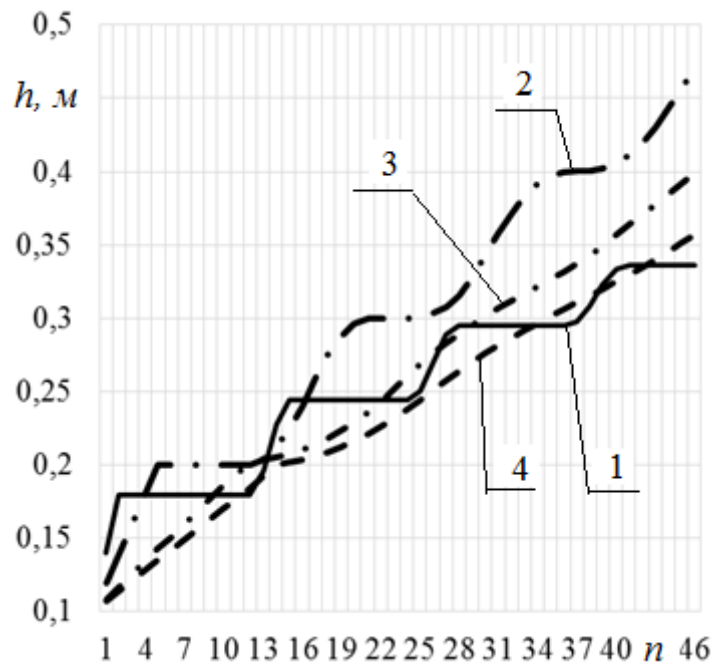


Рисунок 3.166 - График изменения максимальной толщины снежного вала в зависимости от количества проходов ФРС при дальности отброса 7 м, толщине снежного покрова 0,1 м. и: 1 – ширине пятна разброса 1,5 м; 2 – 3 м; 3 – 7 м; 4 – 8,5 м, соответственно

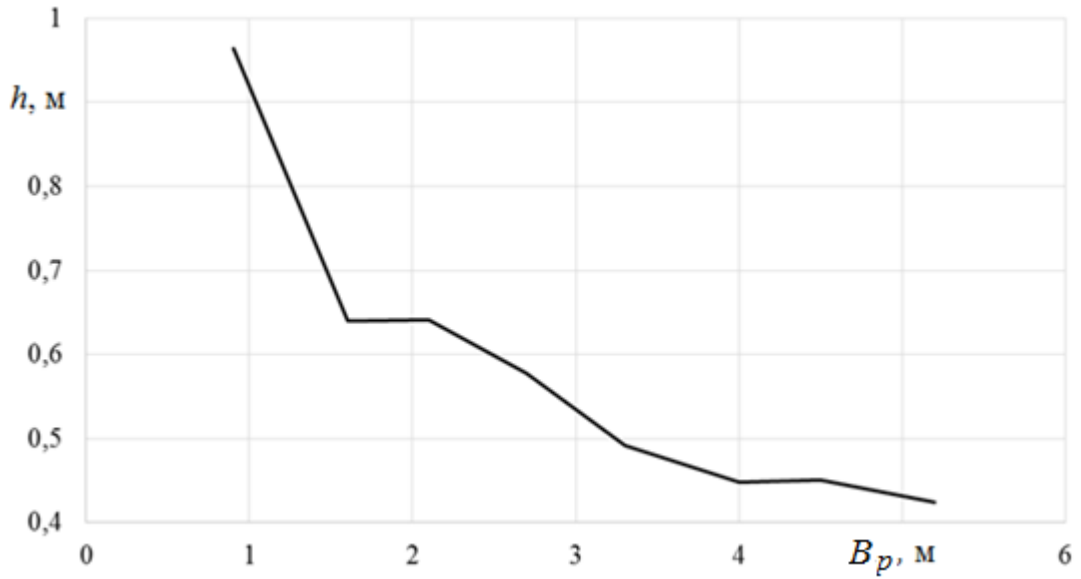


Рисунок 3.167 - График изменения максимальной толщины снежного вала от ширины разброса снежной массы при количестве проходов ФРС 46, при дальности отброса 7 м, толщине снежного покрова 0,1 м

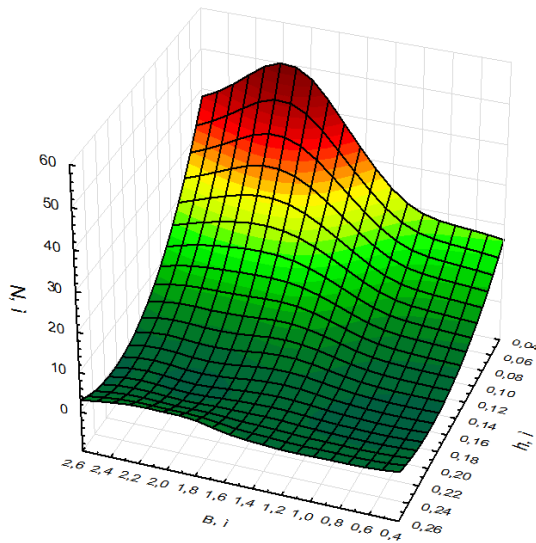


Рисунок 3.168 - Изменение толщины снежного вала при работе РСО с шириной захвата питателя, $B=0,6$ м, и диаметром фрезы $d = 0,5$ м, при ширине разброса $B_p=1,5$ м, начальной толщине снежного покрова, $h= 0,1$ м

Из рисунков 3.167, 3.168 следует, что характер увеличения максимальной толщины снежного вала является нелинейным, что, в итоге, приводит к необходимости использования ФРС другой типоразмерной группы: снегоочистителя большей мощности и большего диаметра фрезы, иначе процесс очистки значительно замедлится [11].

Так же из графиков следует:

- толщина снежного вала, h , имеет максимум, который зависит от ширины разброса и от дальности отброса, L [11];

- характер изменения толщины снежного вала, h , носит нелинейный характер [11]

Зависимость толщины снежного вала, h , от ширины очищаемой территории, B_0 , при различной ширине захвата питателя роторного снегоочистителя, B , ширине разброса снежной массы, $b_p=0,5$ м, и дальности отброса, $L=10$ м, представлена на рисунке 3.169, и имеет вид:

$$h = 0,1943 + 1,24 \cdot B - 0,1987 \cdot b_p - 1,39 \cdot B^2 + 0,1594 \cdot B \cdot b_p + 0,0076 \cdot b_p^2 .$$

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

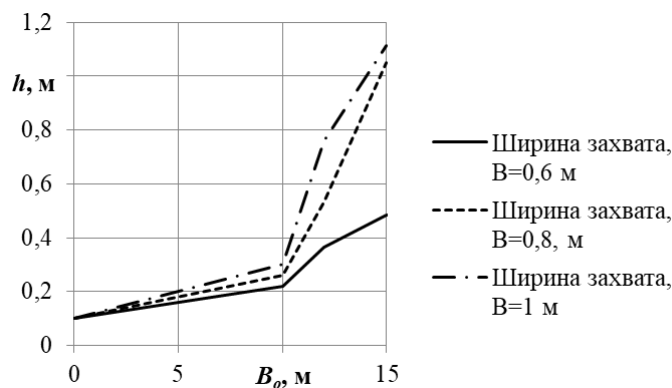


Рисунок 3.169 – Изменение толщины снежного вала, h , в зависимости от ширины очищаемой территории, B_0

Толщина снежного покрова нелинейно зависит от количества проходов ФРС. Чем больше разброс и больше дальность отброса снега, тем медленнее растет толщина снежного покрова и соответственно большую площадь можно будет очистить ФРС одной типоразмерной группы [11].

Выводы

1. Получены выражения показателей, на основании которых может осуществляться оценка энергоэффективности рабочих органов РСО с учетом взаимодействия снежных частиц в транспортируемой снежной массе. Для оценки энергоэффективности фрезы питателя использовались уравнение расчета необходимой мощности на транспортирование снежной массы, величина теоретической производительности по массе. На их основе определялось отношение затрачиваемой мощности на теоретическую производительность по массе, представляющую собой удельную энергоэффективность, NP , Вт·с/кг. Чем меньше значение данного показателя, тем выше энергоэффективность рабочего органа РСО.

2. Для принятых во втором разделе граничных условий, показано, что максимальное количество снежных частиц, расположенных в ряд и образующих поступающую в питатель снежную массу, зависит от их характерного размера, и изменяется по гиперболической зависимости. Прирост максимальных значений полной кинетической энергии, для группы частиц, практически одинаков и не зависит от их количества, относительный прирост составляет в среднем в 1,43 раза. По окончании захвата частиц наблюдается монотонный спад эволюционной кривой полной кинетической энергии, обусловленный действием сил внешнего трения. Угол наклона линии спада составляет около 9^0 , что может быть объяснено действием двух диссипативных сил трения, со стороны наложенных связей, на каждую частицу.

3. Осредненные значения по пространству нормальных реакций и их средних суммарных значений по времени как для опорной, так и для боковой поверхностей, демонстрируют тенденцию к равенству. Для значений сил нормальной реакции фрезы максимальное относительное превышение составило 8,6%, для силы нормальной реакции опорной поверхности – 11,8%, при транспортировании частиц, $r_i=0,015$ м. При этом просматривается тенденция – с уменьшением характерного размера транспортируемых частиц отклонение растет.

Выборки суммарных значений потребляемой мощности по группам транспортируемых частиц, используемых для осреднения потребляемой мощности на стационарном режиме, достаточно хорошо описываются нормальным законом распределения. Показана зависимость продолжительности переходного периода в работе фрезы питателя от числа заходов фрезы и ее угловой скорости вращения. При характерном размере частиц, транспортируемой снежной массы, $r_{\text{ч}} = 0,03$ м, число заходов, n_3 , обеспечивающих минимум удельной энергоемкости, составляет от 3 до 5.

4. Увеличение угла захода ленты фрезы приводит к ярко выраженному нелинейному снижению, как средних, так и максимальных значений мощности, при малом числе, $n_3 < 3$, захода ленты фрезы наблюдается рост мощности в пределах, $\theta < 20^\circ$. Наиболее эффективными параметрами, обеспечивающими минимум удельных энергозатрат, являются угол захода в диапазоне $40^\circ \leq \theta < 50^\circ$, число заходов ленты фрезы $n_3 = 3$, при угловой скорости вращения $\omega = 8$ рад/с и транспортировании снежной массы с характерным размером снежных частиц $0,02 \leq r_{\text{ч}} < 0,03$ м.

5. Рост кинетической энергии транспортируемой снежной массы с увеличением угла захода, θ , и этот рост более интенсивен, чем в случае увеличения размера частиц. Соответственно, можно говорить о том, что на снеге малой плотности, которая характерна для мелкозернистого снега, повышение кинетической энергии снежного потока возможно за счет увеличения угла захода ленты фрезы. При малых характерных размерах частиц, оптимум находится в области от $\theta = 35$ до 50° угла захода ленты при значениях угловой скорости вращения рабочего элемента, ω , в диапазоне от 8 до 10 рад/с. Увеличение размера транспортируемых частиц приводит к необходимости уменьшения угловой скорости вращения до 8 рад/с, угловой диапазон остается прежним. Увеличение угловой скорости вращения до 10 рад/с приводит к увеличению мощности на 300 Вт.

6. Установлено, что для каждого диаметра рабочего органа питателя существует своя оптимальная скорость угловая и поступательная скорости v

точки зрения обеспечения энергоэффективности процесса транспортирования снежной массы в область загрузочного окна. 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.

7. 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. При увеличении поступательной скорости РСО более 3 м/с при любых радиусах фрезы увеличение числа заходов до 5 при транспортировании снежной массы с характерным радиусом частиц 0,01 м наблюдается снижение производительности от 2 до 20% по сравнению с $n_3=4$, меньшие значения падения прироста производительности характерны для фрез большего радиуса. Разработана методика проектирования рабочего оборудования РСО (Приложение Е).

8. Характер увеличения максимальной толщины снежного вала является нелинейным. Толщина снежного вала имеет максимум, который зависит от ширины разброса и от дальности разброса. Чем больше разброс и больше дальность отброса снега, тем медленнее растет толщина снежного покрова и соответственно большую площадь можно будет очистить ФРС одной типоразмерной группы. Полученные выражения и алгоритм формирования снежного вала могут быть использованы для любого вида РСО, и позволяют решать задачу формирования снежного вала требуемой конфигурации, а так же определять типоразмер РСО в зависимости от ширины очищаемой полосы.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ

Экспериментальные исследования решают следующие задачи [4, 47, 57]:

- подтверждение адекватности математической модели;
- определение значений параметров входящих в описание математической модели;
- подтверждение эффективности предлагаемых решений.

Комплекс проведенных экспериментальных исследований решал все перечисленные задачи. На первом этапе решались задачи уточнения особенностей работы фрезы, как составного элемента целой группы РСО и подтверждения результатов математического моделирования на ЭВМ его работы на примере фрезы питателя ФРС.

Целью данных экспериментальных исследований является определение основных характеристик воздушного потока в области загрузочного окна питателя ФРС.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- произвести измерения величин скоростей воздушного потока в различных точках, лежащих в плоскости загрузочного окна;
- определить характер зависимости величин нормальных к плоскости загрузочного окна проекций векторов скорости воздушного потока от угловой скорости вращения фрезы питателя ФРС и характер их распределения в области загрузочного окна;
- произвести сравнение результатов численного моделирования движения воздушного потока в плоскости загрузочного окна с результатами проведенных экспериментальных исследований.

Решение поставленных задач позволит уточнить влияние параметров питателя ФРС на характер движения воздушного потока в области загрузочного окна питателя, что является актуальным в условиях интенсификации процессов транспортирования снежной массы. Сделать вывод о возможности использования

численного моделирования движения воздушных потоков в питателе ФРС и адекватности его математической модели.

Необходимость знания закономерности образования снежных валов, образующихся в результате работы РСО, что позволит сделать технику более совершенной и выработать наиболее эффективные способы минимизации негативного влияния снежных валов на транспортную инфраструктуру, промышленные зоны и селитебную территорию, обусловило проведение второго этапа экспериментальных исследований, основной целью которого является определение основных характеристик образующихся валов при работе МА ФРС. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- получение экспериментальных значений основных параметров снежных валов при работе МА ФРС;
- фиксирование и описание результатов эксперимента.

4.1. Экспериментальные исследования аэродинамики рабочего органа роторного снегоочистителя в области загрузочного окна

Во второй главе представлено описание расчетной схемы и математической модели работы элементов рабочего оборудования РСО, построенные при допущении отсутствия действия аэродинамических сил.

Однако одним из возможных состояний снежного массива может являться представление снега как совокупности снежных частиц конечного размера, на поведение которых аэродинамические силы могут оказывать существенное влияние. В определенных условиях, в питателе ФРС может присутствовать снег в таком состоянии в достаточно большом количестве. Знание закономерностей поведения воздушного потока в питателе ФРС и их учет при создании конструкций питателя позволит повысить эффективность его работы, особенно в условиях присутствия снежного массива как совокупности снежных частиц конечного размера. На рисунке 4.1 представлены снежные потоки при работе ФРС.



Рисунок 4.1 – Формирование снежных потоков в свободном пространстве в процессе работы ФРС.

В процессе транспортирования к загрузочному окну МА ФРС, снег активно перемешивается и измельчается [48], что приводит к перебросу убираемой снежной массы при ее перемещении фрезой питателя, формированию снежного облака перед отвалом питателя и ее потерям и как следствие снижению коэффициента заполнения межлопастного пространства ротора МА (см. рисунок 4.1).

Учитывая тот факт, что снежный массив, при определенных условиях, может представлять собой несвязанную структуру, состоящую из отдельных частиц, с характеристиками, позволяющими им активно взаимодействовать с воздушными потоками, при этом, снежные частицы могут рассматриваться как двухфазная среда [37, 74].

В предыдущих исследованиях снежный массив в питателе представлялся как отдельное крупнокусковое образование, что позволяло ввести допущение об отсутствии влияния аэродинамических сил и соответственно они не учитывались при рассмотрении уравнений движения снежных частиц в питателе ФРС [88, 111, 159].

Известны работы по определению эффективности пневмосепараторов [3, 22], где исследуется транспортирование двухфазной среды или системы, которая может быть представлена совокупностью частиц, однако характер такой среды по

своим характеристикам существенно отличается от снежной массы транспортируемой фрезой питателя. Так же необходимо указать на работы [104, 110] где исследуется аэродинамика винтокольцевых движателей, которые в первом приближении могут рассматриваться как элементы питателя ФРС.

Таким образом, в настоящее время вопрос движения воздушных потоков в процессе работы элементов рабочего оборудования РСО малоизучен.

Учет аэродинамических характеристик работы питателя позволит выбрать эффективное решение по исключению неуправляемого движения снежных частиц во вне, а направить их в загрузочное окно, для этого необходимо знать движение воздушных потоков при вращении фрез и роторов рабочего оборудования РСО.

Для изучения движения воздушного потока в области загрузочного окна в процессе вращения фрезы питателя ФРС, была разработана экспериментальная установка по измерению величины нормальной проекции вектора скорости воздушного потока в загрузочном окне питателя ФРС (рисунок 4.2). Коэффициент подобия данной физической модели равен 1. Стенд представляет собой питатель ФРС с боковым приводом, позволяющим осуществлять регулирование величины угловой скорости вращения фрезы питателя. С отвалом питателя соединена платформа, имеющая две степени свободы, что позволяет регулировать положение верхнего основания платформы по высоте и в горизонтальной плоскости относительно загрузочного окна питателя ФРС. На верхнем основании платформы устанавливается средство измерения – термоанемометр (см. таблица 4.2). Положение датчика термоанемометра по горизонтали определялось по показаниям лазерного дальномера (см. таблица 4.1), связанного с термоанемометром. Положение датчика по вертикали фиксировалось по линейке [32] на основании изображения луча лазера, спроецированного на линейку, где ноль вертикально стоящей линейки, совпадал с началом, системы координат $O_p X_p Y_p Z_p$ (см. рисунок 2.1).

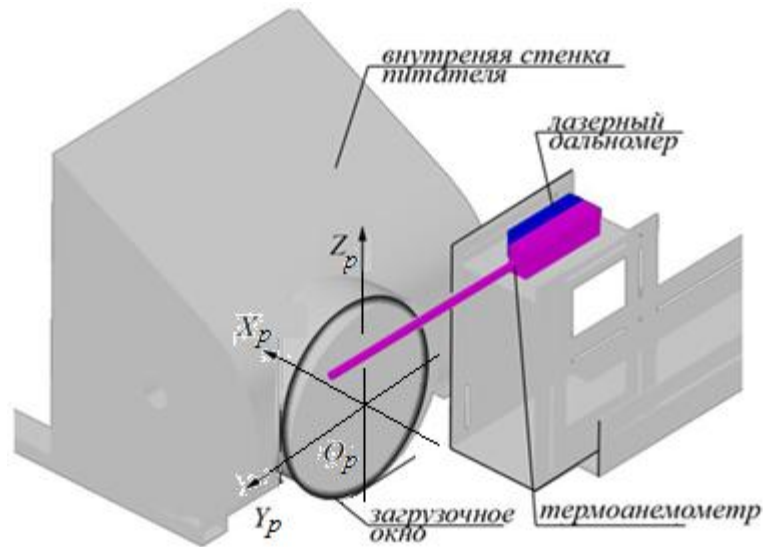


Рисунок 4.2 - Общий вид стенда по измерению величины вектора скорости воздушного потока в загрузочном окне питателя ФРС

Сама экспериментальная установка оценки влияния аэродинамических сил на работу питателя роторного снегоочистителя показана на рисунке 4.3.

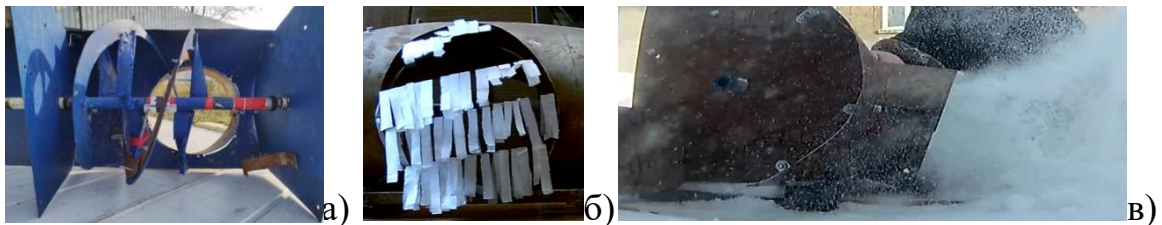


Рисунок 4.3 - Общий вид стенда по измерению величины вектора скорости воздушного потока в загрузочном окне питателя роторного снегоочистителя: а) вид спереди; б) визуализация воздушных потоков в загрузочном окне питателя при проведении экспериментальных исследований; в) снежный поток в свободном пространстве в области загрузочного окна в процессе работы питателя

Таблица 4.1 Основные характеристики дальномера лазерного

Средство измерений	Диапазон измерений, м	Точность измерений, мм	Класс лазера	Диаметр луча, мм	Время измерений (типичное), с	Рабочая температура, град. С
Дальномер лазерный	0,15...20	±3	2	18	0,5	-10...+40

Исследования проводились для внутренней стенки имеющей форму части цилиндра и минимизирующей по высоте свободное пространство перед фрезой питателя ФРС (рис. 4.10, б). Основное назначение исследуемой конструкции является минимизировать потерю транспортируемой снежной массы при ее выбросе в окружающую среду [83]. Все измерения осуществлялись в закрытом помещении, что позволяло минимизировать влияние движения воздушных масс внешней среды. Одним из недостатков использования представленного термоанемометра является то, что с его помощью не представляется возможным оценить направление движения воздушного потока, и как следствие, необходимы дополнительные экспериментальные исследования, по определению направления движения воздушного потока.

Таблица 4.2 Основные характеристики термоанемометра

Средство измерений	Диапазон измерений, м/с	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений скорости движения воздуха, V, при температуре воздуха в зоне измерения (20±5) град С		Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений при температуре воздуха в зоне измерения (20±5) град С при измерении температуры воздуха:
		в диапазоне 0,1...1 м/с	1...20	
Прибор комбинированный серии "ТКА-ПКМ" (52)	0,1...20	±(0,045+0,05V)	±(0,1+0,05V)	±0,5

Варьируемыми параметрами при проведении экспериментальных исследований являлись:

- координаты положения датчика анемометра по оси $O_p Y_p$, м, с шагом 0,03 м;
- координаты положения датчика анемометра по оси $O_p Z_p$, м с шагом 0,03 м;
- угловая скорость вращения фрезы принимала значения 9, 20, 30 рад/с, что, в соответствии с классификацией режимов работы винтового транспортера [81, 89], характеризует питатель как тихоходный.

Фиксированными параметрами являлись геометрические параметры питателя ФРС:

- радиус фрезы, $R_\phi = 0,14$ м;
- радиус загрузочного окна, $R_z = 0,12$ м;
- ширина ленты фрезы, $b = 0,05$ м;
- угол захода ленты фрезы, $\theta = 17^\circ$;
- фреза двухзаходная;
- длина фрезы равна одному шагу винтовой линии.

Исследуемым параметром являлась величина проекции вектора скорости воздушного потока ортогональная плоскости загрузочного окна (направление ОХ принятой системы координат), v_{ex} .

Измерения проекции вектора средней скорости воздушного потока, v_{ex} , проводились при перемещении датчика в пространстве вдоль линий, лежащих в плоскости сечения загрузочного окна питателя ФРС, в системе координат $O_p X_p Y_p Z_p$. В каждой точке осуществлялось видеорегистрирование показаний термоанемометра. Фиксировалось не менее 12 значений величины скорости воздушного потока в каждой точке, где проводились измерения. По результатам измерений определялась средняя величина.

Следующим этапом являлось численное моделирование движения воздушных потоков в плоскости загрузочного окна при работе питателя ФРС в ANSYS FLUENT. Расчётная область питателя представлена на рисунке 4.4, и имеет одно входное сечение и одно выходное (загрузочное окно питателя). Расчетная область

была покрыта структурированной многоблочной расчётной сеткой со сгущением к ленте фрезы, задней стенке питателя и отвалу питателя.

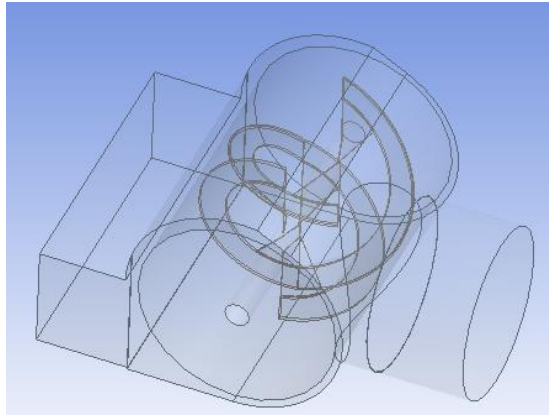


Рисунок 4.4 - Расчётная область питателя

Принимались следующие граничные условия: скорость невозмущенного потока составляла 0 м/с; давление соответствовало нормальному атмосферному; модель турбулентности $k - \epsilon$.

Численное моделирование выполнено на основе системы нестационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса, записанных в переменных скорость - давление. Температура среды задавалась постоянной. Для замыкания осреднённых уравнений использованы уравнения модели турбулентности $k - \epsilon$ [39, 153], турбулентные числа Прандтля $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\epsilon = 1,3$.

На входе в расчётную область заданы компоненты вектора скорости $v_{vx} = v_{vy} = v_{vz} = 0$ при атмосферном давлении $P_\infty = 101325$ Па. В выходном сечении было задано значение статического давления $P = P_\infty$.

На рисунке 4.5 представлены модули средних значений нормальных к плоскости загрузочного окна проекций векторов скорости воздушного потока, v_{vx} , полученные в результате проведенных измерений, при угловой скорости вращения фрезы питателя $\omega_\phi = 20$ рад/с. На рисунке 4.6 представлены измеренные значения проекций скорости воздушного потока, для питателя с задней стенкой, являющейся частью цилиндра, и задней стенкой с возрастающим радиусом кривизны, которые были упорядочены по убыванию. Из рисунков 4.5,

4.6 следует, что в случае использования задней стенки в форме части цилиндра максимальные значения проекций воздушного потока уменьшились по сравнению с максимальными значениями в загрузочном окне питателя с задней стенкой имеющей возрастающий радиус кривизны, однако, при этом наблюдается выравнивание значений проекций скоростей воздушного потока по всей площади загрузочного окна. Среднее значение величины проекции вектора скорости воздушного потока, как следует из рисунка 4.6, возросло.

Максимальное значение числа Рейнольдса, Re , воздушного потока в загрузочном окне питателя РСО, при равенстве гидравлического диаметра диаметру загрузочного окна и кинематической вязкости воздуха, ν , равной $1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ [72, 96], составило 10344,37.

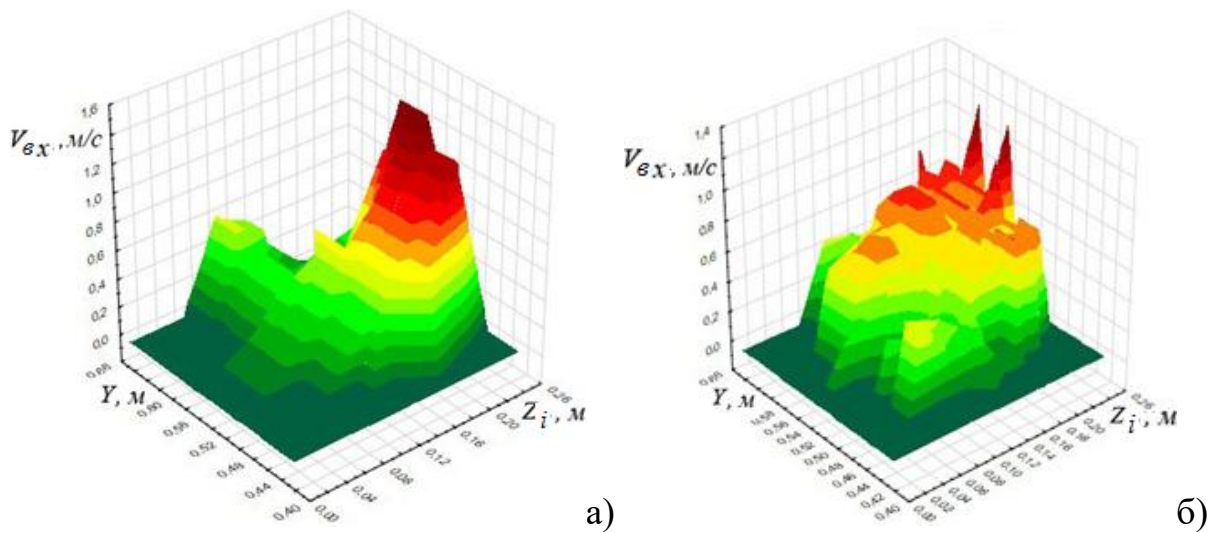


Рисунок 4.5 - Величины нормальных к плоскости загрузочного окна проекции вектора скорости воздушного потока, v_{ex} , в различных точках загрузочного окна, где а) для питателя изображенного на рисунке 4.3,а; б) для питателя с внутренней стенкой, имеющей форму части цилиндра (рисунок 4.10, б)

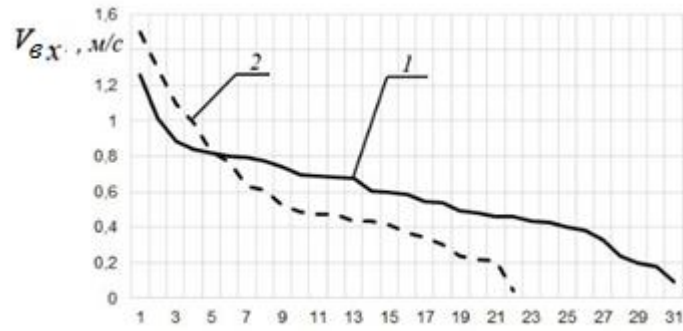


Рисунок 4.6 - Значения проекций вектора скорости воздушных потоков, V_{ex} , нормальных к плоскости загрузочного окна, упорядоченных по убыванию: 1 – для питателя без задней стенки; 2 – для питателя с задней стенкой в форме части цилиндра

По полученным результатам, в программном продукте STATISTICA [1], были составлены уравнения регрессии с достаточной степенью точности и статистической значимостью описывающие зависимость нормальной проекции вектора скорости воздушного потока на ось $O_p X_p$ от угловой скорости, ω_ϕ , вращения фрезы питателя PCO:

- для точки с координатами по горизонтали 0,072 м, и по вертикали 0,127 м, уравнение регрессии имеет вид:

$$v_{ex} = -1,5736 - 0,0287 \cdot \omega_\phi + 0,5156 \sqrt{\omega_\phi}; \quad (4.1)$$

- для точки с координатами по горизонтали 0,132 м, и по вертикали 0,127 м

$$v_{ex} = -1,721 - 0,0518 \cdot \omega_\phi + 0,6822 \sqrt{\omega_\phi}. \quad (4.2)$$

Величина коэффициента множественной корреляции регрессии составила $R=0,9646$. Стандартная ошибка оценки 0,06308. При числах степеней свободы исследуемых величин $df = 3, 4$ и уровне значимости $p = 0,0088$ значение критерия Фишера составило $F=194,99$. Величина критерия Фишера говорит о достаточно высокой точности предложенной регрессионной модели.

На рисунках 4.7, 4.8 представлены графики полученных уравнений регрессии и измеренные значения величин проекций скорости воздушного потока при различных значениях угловой скорости фрезы питателя.

Следующим этапом являлось численное моделирование на ЭВМ движения воздушного потока в питателе ФРС.

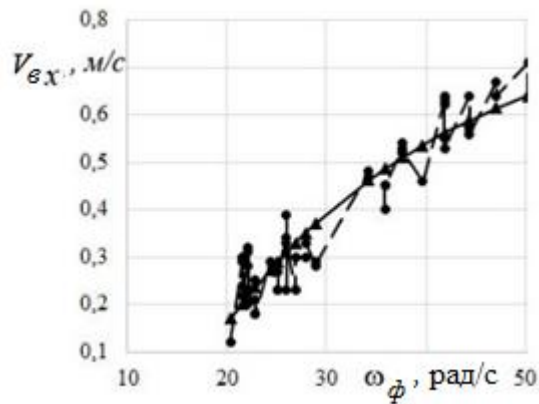


Рисунок 4.7. Зависимость величины нормальной проекции вектора скорости воздушного потока, $v_{\varepsilon x}$, от угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , в плоскости загрузочного окна с координатами $y_p = 0,072$ м, и $z_p = 0,127$ м

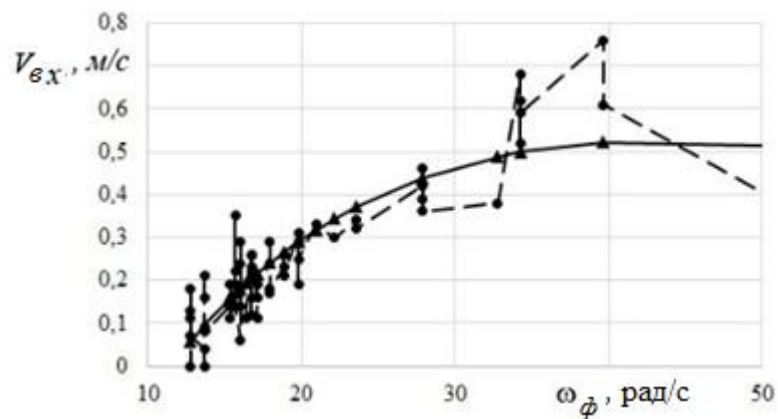


Рисунок 4.8. Зависимость величины нормальной проекции вектора скорости воздушного потока, $v_{\varepsilon x}$, от угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , в плоскости загрузочного окна с координатами $y_p = 0,132$ м, и $z_p = 0,127$ м

В результате численного моделирования движения воздушных потоков в питателе роторного снегоочистителя были получены значения вектора скорости воздушного потока в плоскости загрузочного окна. На рисунке 4.9 представлены значения проекций вектора скорости воздушного потока на ось $O_p X_p$ в плоскости загрузочного окна питателя на отрезках, полученных пересечением горизонтальной плоскости с плоскостью загрузочного окна, где высота

положения горизонтальной плоскости варьировалась по высоте загрузочного окна с шагом 0,02 м.

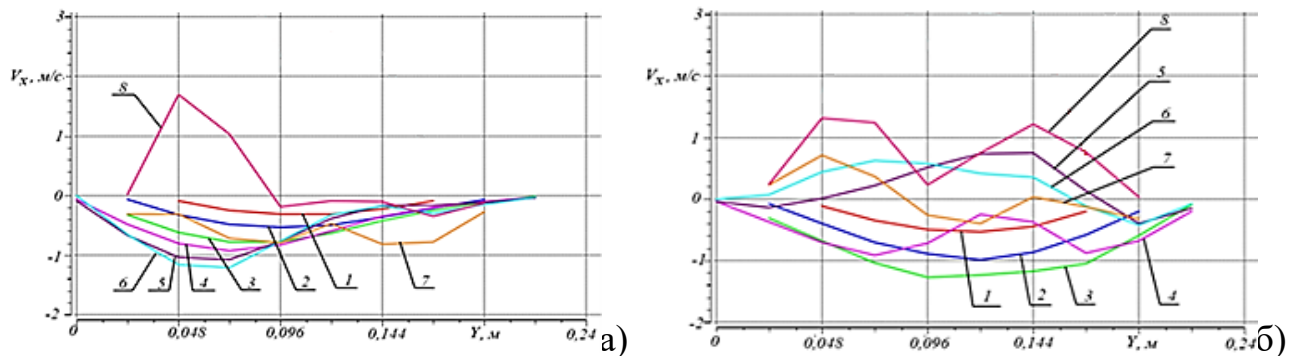


Рисунок 4.9 - Величины нормальной проекции вектора скорости воздушного потока в плоскости загрузочного окна питателя, где а) при угловой скорости вращения фрезы 9 рад/с по результатам вычислений, где: 1 - 0,05 м; 2 - 0,07 м; 3 - 0,10 м; 4 - 0,12 м; 5 - 0,16 м; 6 - 0,18 м; 7 - 0,20 м; 8 - 0,22 м.; б) при угловой скорости вращения фрезы 30 рад/с по 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.

Из графиков следует наличие обратных воздушных течений, особенно в нижней части загрузочного окна питателя роторного снегоочистителя. Следует отметить, что при увеличении угловой скорости вращения фрезы питателя, площадь сечения загрузочного окна, в котором наблюдаются движения воздушного потока в область питателя, уменьшается. Так же увеличение угловой скорости фрезы приводит к формированию воздушных течений более симметричных относительно вертикальной оси загрузочного окна.

Максимальное изменение величины нормальной проекции вектора скорости воздушного потока при увеличении угловой скорости вращения фрезы не превышает 1,5 м/с и наблюдается в верхней трети загрузочного окна.

Сравнение результатов численного моделирования с результатами экспериментальных измерений позволяет сделать вывод об адекватности математической модели питателя РСО. Например, для точек с координатами $y_{p1} = 0,209$ м, $z_{p1} = 0,132$ м и $y_{p2} = 0,115$ м, $z_{p2} = 0,132$ м расчетные значения проекции вектора скорости составили 0,4167, 0,5386 м/с, а измеренные 0,47, 0,54 м/с,

соответственно. Максимальное расхождение измеренных и расчетных значений составляет 11%.

Результаты измерений показали, что максимальные величины проекций векторов скорости воздушного потока в области загрузочного окна выше для случая без внутренней стенки. Однако, в случае питателя оборудованного внутренней стенкой, имеющего форму части цилиндра, по всей площади загрузочного окна наблюдается более равномерное распределение величин проекций вектора скорости воздушного потока, при этом среднее значение воздушного потока по всей площади загрузочного окна возрастает.

Анализ уравнений регрессии (4.1) и (4.2) позволяет сделать вывод о нелинейном характере зависимости величины проекции вектора скорости воздушного потока от угловой скорости вращения фрезы. Однако, увеличение величины скорости воздушного потока в сечении загрузочного окна, не может являться однозначным критерием повышения эффективности работы питателя РСО.

Характер распределения значений проекций скоростей воздушного потока в сечении загрузочного окна носит неравномерный характер и как следствие, значение числа Рейнольдса, Re , говорит о характере течения воздушного потока, как турбулентного.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при значениях угловой скорости вращения фрезы питателя менее 20 рад/с можно не учитывать влияние воздушного потока в области загрузочного окна в конструкции питателя РСО. Увеличение угловой скорости вращения фрезы приводит к уменьшению площади сечения загрузочного окна, в которой наблюдается течение воздушного потока в питатель РСО.

На основании экспериментально установленного факта, наличия обратных течений воздушного потока и наличия потерь снежной массы при работе фрезы, было предложена конструкция стенки питателя РСО (рисунок 4.10) с изменяемой геометрией, обеспечивающее выравнивание по скорости и увеличение средней

скорости потока в области загрузочного окна (патент на полезную модель №177929).

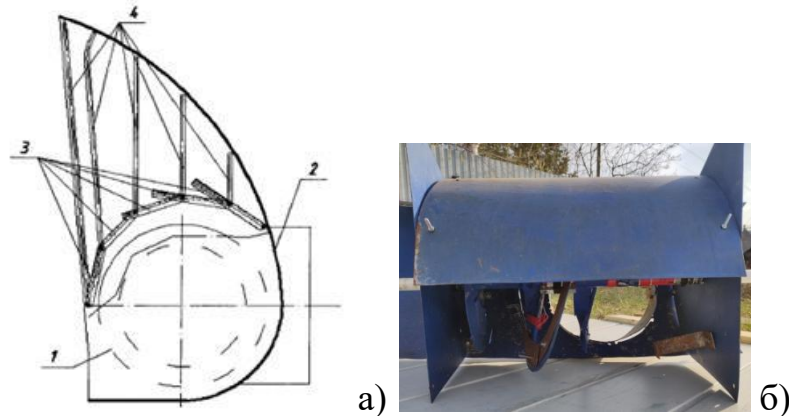


Рисунок 4.10 - Внутренняя стенка питателя, выполненная из шарнирно сочлененных подвижных сегментов: а) принципиальная схема, где 1 - фреза питателя, 2 - неподвижный отвал с боковыми стенками, 3 - подвижные шарнирно-сочлененные сегменты внутренней стенки питателя; 4 - направляющие в боковых стенках отвала, по которым перемещаются торцы сегментов внутренней стенки; б) общий вид питателя с изменяемой внутренней стенкой

Сравнение результатов численного моделирования движения воздушных потоков в плоскости загрузочного окна с результатами натурных измерений, позволяют сделать вывод о возможности использования численных методов для исследования и оптимизации на ЭВМ новых конструктивных решений, связанных с рабочими органами РСО, в процессе их проектирования с последующим выбором наиболее эффективного решения для окончательной проверки на физической модели.

Сравнение результатов имитационного моделирования обобщенной математической модели и результатов проведения физического эксперимента, с результатами существующих моделей, описывающих работу фрезы питателя, осуществлялся в следующей последовательности:

- осуществлялась видеорегистрация движения частиц в питателе ФРС при их сходе с поверхности ленты фрезы в области загрузочного окна. Видеорегистрация велась как снежных частиц, в процессе транспортирования снежной массы, так и увлажненных древесных опилок, моделирующих поведение снежных частиц при

транспортировании снежной массы. В процессе кадрирования получался набор изображений с разрешением 1366x768 пикселей, что соответствовало 220 точек/дюйм. 33 ± 2 пикселя соответствуют физическому диаметру оси фрезы 0,02м, таким образом, ошибка 1 дюйм соответствует 0,02м/33 дюйма, или 0,61 мм/дюйм. Сравнительная оценка велась по изображениям во фронтальной плоскости и виде сверху при работе фрезы питателя РСО. По двум соседним кадрам определялось изменение координат положения частиц по горизонтали, Δx_i , по вертикали, Δy_i . Последующее деление на интервал времени между соседними кадрами, $\Delta t = 0,033$ с, определяло проекции вектора скорости частицы в рассматриваемой плоскости.

- проводилось имитационное моделирование с учетом взаимодействия снежных частиц, при строгом соответствии конструктивных и технологических параметров физической модели питателя, участвующей в эксперименте. Геометрические размеры транспортируемых частиц в математической модели соответствовали размерам частиц, полученным в процессе обработки изображения. Координаты, x_p , y_p , и величины проекций скоростей частиц брались для дальнейшего сравнения, только тех частиц, которые попали в область загрузочного окна.

- определение скоростей и координат частиц так же осуществлялось по существующей методике, описанной в [51].

На рисунке 4.11 представлены изображения питателя в процессе транспортирования частиц во время физического эксперимента.



Рисунок 4.11 – Фрагмент физического эксперимента по определению значений скоростей частиц в области загрузочного окна, где а) эксперимент №1; б) эксперимент №2; в) эксперимент

Основные конструктивные и технологические параметры, при которых проводился физический эксперимент, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Основные параметры проведения физического эксперимента

Параметры	№1	№2	№3
Угловая скорость вращения фрезы, ω_f , рад/с	18,3	4,2	25,9
Характерный размер транспортируемой частицы, $r_{ч}$, м	0,05	0,005	0,005
Коэффициент внешнего трения частицы о поверхности питателя, f	0,03	0,05	0,05

На рисунках 4.12-4.14 показаны изменения положения частиц в момент схода с поверхности ленты фрезы.



Рисунок 4.12 – Положения частиц в питателе при проведении эксперимента №1, где а) в момент схода с поверхности ленты фрезы; б) в следующий момент времени

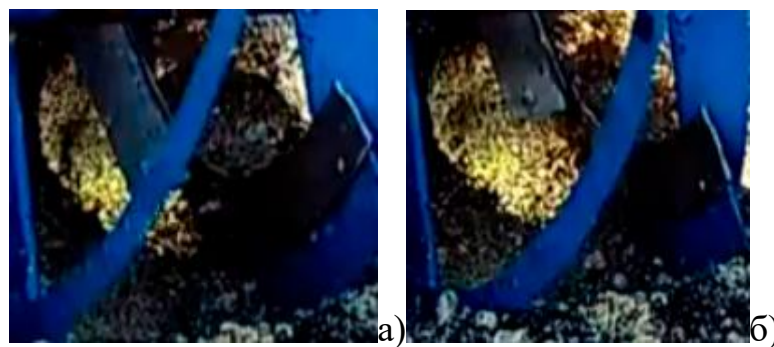


Рисунок 4.13 – Положения частиц в питателе при проведении эксперимента №2, где а) в момент схода с поверхности ленты фрезы; б) в следующий момент времени

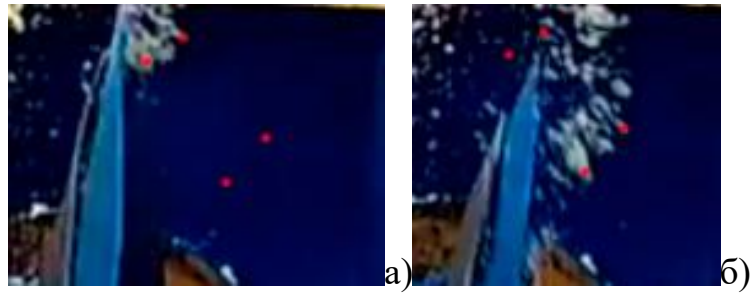


Рисунок 4.14 – Положения частиц в питателе при проведении эксперимента №3, где а) в момент схода с поверхности ленты фрезы; б) в следующий момент времени

Дистанции, пройденные частицами за рассматриваемый интервал времени и значения проекций скоростей, представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты физического эксперимента

Эксперимент	$\Delta x_i, м$	$\Delta y_i, м$	$\Delta z_i, м$	$V_{xi}, м/с$	$V_{yi}, м/с$	$V_{zi}, м/с$
№1	0,01	0,02	-	0,5	1	-
№2	-	0,00419	0,00313	-	0,12687	0,09495
№3	-	0,02667	0,04	-	0,80808	1,2121

В результате имитационного моделирования с учетом взаимодействия частиц были получены результаты, представленные в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Результаты имитационного моделирования с учетом взаимодействия частиц.

Эксперимент	$x_i, м$	$y_i, м$	$z_i, м$	$V_{xi}, м/с$	$V_{yi}, м/с$	$V_{zi}, м/с$
№1	-0,0747	0,3352		0,0745	0,9546	
№2		0,31425	0,1225		0,19099	0,15232
№3		0,32899	0,118		1,2171	0,15532

Для определения значений по методике [51], принимаем допущение о соответствии осевой скорости движения материальной частицы, величине проекции вектора скорости частицы на ось $O_\phi Y_\phi$, полученной в результате эксперимента. Данное допущение позволило определить угловую скорость частицы:

$$\omega_{\text{ч}} = \frac{v_{oc}}{R_{\phi} \cdot \text{tg}(\theta)} - \omega_{\phi}. \quad (4.3)$$

Далее, используя уравнения определения текущего положения частицы на поверхности ленты фрезы, определялось время движения частицы по ленте фрезы при условии равенства текущего положения радиусу фрезы, что соответствует моменту схода частицы с ленты фрезы. Уравнение определения времени достижения частицей точки отрыва на поверхности ленты фрезы имеет вид:

$$\frac{g \cdot f}{2} \omega_{\text{ч}} \cdot t^3 - \omega_{\text{ч}}^2 \cdot t^2 \cdot \left(0,5 \cdot R_{\phi} + \frac{g}{2 \cdot \omega_{\text{ч}}^2} \right) + r_{\text{ч}} = 0. \quad (4.4)$$

В результате решения данного уравнения, определялось время схода частицы с поверхности ленты фрезы. Подставив которое в уравнение (4.3), получим уравнение для определения относительной скорости частицы в момент отрыва от поверхности ленты фрезы:

$$v_o = \omega_{\text{ч}}^2 \cdot t \cdot \left(R_{\phi} + \frac{g}{\omega_{\text{ч}}^2} \right) - 1,5 \cdot g \cdot f \cdot \omega_{\text{ч}} \cdot t^2. \quad (4.5)$$

Таким образом, для однозначного определения проекций абсолютной скорости частицы на соответствующие оси координат, необходимо определить переносную скорость, v_p , материальной частицы, по известному соотношению [114]:

$$v_p = R_{\phi} \cdot \omega_{\phi}. \quad (4.6)$$

Результаты вычислений значений проекций скоростей, полученные на основе методики [51] определения параметров частицы, представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Результаты вычислений по методике [51]

Эксперимент	V_{xi} , м/с	V_{yi} , м/с	V_{zi} , м/с
№1	-0,1921	1	-
№2	-	0,12687	0,2886
№3	-	0,8081	1,8073

Сравнение полученных результатов показало, что в эксперименте №1 результаты по методике [51] на 6% дают более близкий результат к экспериментальным значениям, что касается экспериментов №2 и №3, то результаты при математическом моделировании с учетом взаимодействия частиц уже на 22 и 32% более близки к экспериментальным значениям. Таким образом, можно говорить об экспериментальном подтверждении адекватности математической модели, в диапазоне частиц с характерным радиусом, r_{ch} , от 0,005 до 0,05 м.

4.2. Экспериментальные исследования формирования снежных валов при работе роторного снегоочистителя

Исследованию механизма формирования снежных наносов и факторов, влияющих на характер их образования, посвящен ряд работ [37, 121, 170]. Возможности применения метода CFD и численного решения уравнений Навье-Стокса для проведения таких исследований показана в работе [138]. Оценке таких параметров, как разрешение расчетной сетки, скорость падения снега, турбулентное число Шмидта, пороговая скорость трения снега и модели турбулентности на CFD на вычислительную точность снега посвящена работа [173]. Дальнейшие исследования авторами велись в направлениях: оценки влияния однородной шероховатой поверхности [150], исследовались разнообразные конструктивные элементы: снежные ограждения, которые обычно устанавливаются на полосе отвода или за ее пределами, чтобы исключить выдувание и снос снега на дороги, повысить безопасность дорожного движения [138]; формы, имитирующие простую конструкцию кабины [124], ступенчатые плоские крыши [178]. Параллельно проводились исследования, направленные на усложнение математической модели, за счет учета накопления, эрозии снега, а также временных изменений поверхности снежного покрова [124]. Что касается компьютерного моделирования структуры снежных частиц, то вызывает интерес работа [163] в которой частотная функция столкновения частиц была определена

посредством связи метода дискретных элементов с вычислительной гидродинамикой. Для исследования механизмов роста и разрушения гранул при грануляции в псевдосжиженном слое, функция частоты столкновений одной частицы авторами определялась с использованием числа Фруда. Для того, чтобы упростить дисперсную фазу, в работе [127] частицы снега рассматривались как сферы с одинаковыми диаметрами 0,15 мм [184] и плотностью 250 кг/м³ [17, 184]. Улучшение алгоритма обнаружения контактов 3D DEM-FEM для моделирования взаимодействия между частицами и структурами представлено в работе [183]. Работа [181] демонстрирует алгоритм для моделирования произвольной частицы. Однако при этом отсутствуют как теоретические, так и экспериментальные данные о том, какими геометрическими размерами обладают частицы на выходе из рабочих органов роторных снегоочистителей.

В работах [144, 157] описывается явление кластеризации снега, указывается на его степенное распределение по размерам, фрактальную форму, вертикальное удлинение и большую скорость падения, которая увеличивается с ростом размера кластера. В работе [144] даются зависимости распределения размеров от масс в снежном наносе. Эксперименты в аэродинамической трубе для исследования потока массы снега и скорости его перемещения в зависимости от трения и диаметра частиц описаны в работах [169, 115]. Влияние морфологии снега на угол покоя изучались в работе [175]. В работах [175, 176] экспериментально исследуется процесс образования снежных наносов на крышах зданий различного функционального назначения. Представляет практический интерес работа [158] в которой показано, что при увеличении количества частиц в агломерате скорость возрастает и агломерат с большей вероятностью прилипает к поверхности. Необходимо отметить, что в работе [176] исследования на осаждение и перераспределение снега проводились с использованием порошковой полистирольной пены в качестве искусственного снега.

Таким образом, целый ряд работ посвящены исследованию формирования снежных валов и изменению во времени их основных параметров в различных условиях [121, 124, 178]. Однако, в них исследуется поведение снежных валов

естественного происхождения. Необходимости уборки снежных масс и повышению эффективности этого процесса, посвящен обширный ряд исследований [51, 148, 166], но в них упор делается на оптимизацию алгоритма уборочного процесса. Использование РСО, как правило приводит к образованию снежных валов, обладающих характеристиками отличными от тех, которые образуются в результате протекания естественных процессов. В работе [129] решается задача поиска кратчайшего пути РСО, в процессе очистки территории покрытой снегом одинаковой толщины, при ограничении высоты снежного вала. Работа [179] описывает подход к определению параметров снежных валов при работе РСО в зависимости от его конструктивных и технологических параметров. Однако обе эти работы [129, 179] не учитывают особенности формируемой структуры, что не позволяет судить об их дальнейшем влиянии на очищаемые участки. Что касается экспериментальных исследований системы «роторного снегоочиститель– снежный массив», то здесь основной упор сделан на следование характеристик структурных элементов ФРС. Так в работе [179] экспериментально изучаются нагрузки, которые испытывает питатель ФРС, а в работе [118] характеристики воздушного потока формируемые питателем ФРС.

Проведенный анализ показал, что остался нерешенным вопрос описания модели формирования снежного вала требуемой конфигурации, образующегося в ходе работы РСО.

Для исследования данного процесса была разработана экспериментальная установка.

Экспериментальная установка для исследования вопроса формирования снежных валов представляет собой сборную площадку, на которой установлена физическая модель метательного аппарата, геометрически подобная МА ФРС малой мощности и система видео регистрации процесса работы ротора МА. Конструктивные параметры ротора метательного аппарата представлены на рисунке 4.15. Система видеорегистрации представляет собой видеокамеры с возможностью получения фотографий с разрешением 150 dpi, которые установлены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. На рисунках 4.16

представлен общий вид и основные геометрические размеры установки по проведению экспериментальных исследований образования снежных валов при работе метательного аппарата РСО.

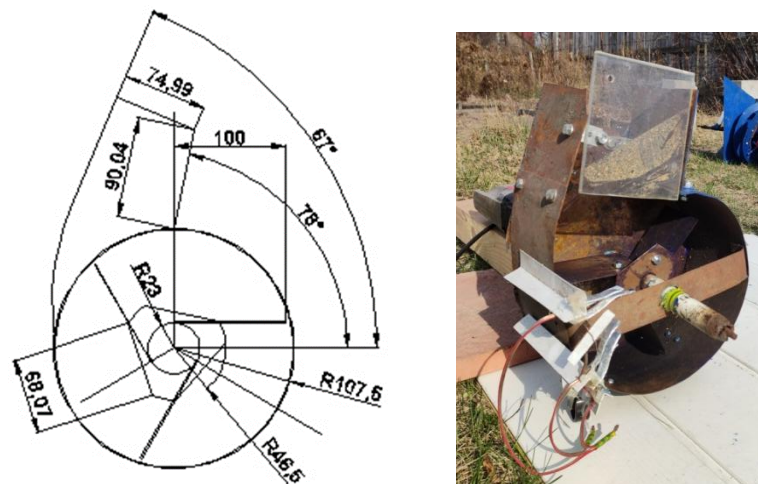


Рисунок 4.15 - Геометрические параметры ротора метательного аппарата и его общий вид
(размеры указаны в мм)

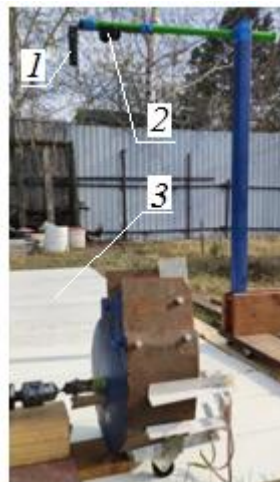


Рисунок 4.16 - Общий вид установки по проведению экспериментальных исследований образования снежных валов при работе метательного аппарата РСО: 1- лазерный дальномер; 2- видеочамера; 3- сборное основание

Проводился активный однофакторный эксперимент, варьируемым параметром в котором являлся угол наклона направляющего насадка относительно горизонтальной поверхности. Измерение углового положения осуществлялось при помощи транспортира с измерительной погрешностью $\pm 0,5^{\circ}$.

В качестве транспортируемого материала использовались прессованные древесные опилки, подвергавшиеся увлажнению водой непосредственно, перед проведением экспериментальных исследований (рисунок 4.17), часть которых маркировалась черным цветом. Использование данного материала в качестве модели снежной массы показана в работе [70].

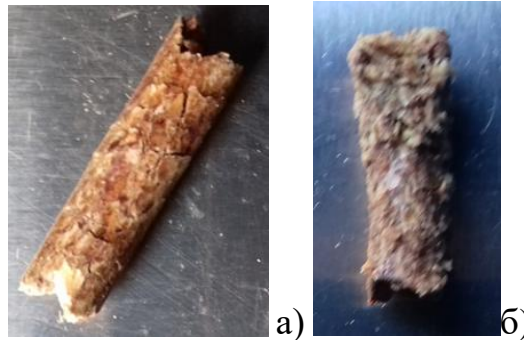


Рисунок 4.17 - Фрагмент транспортируемого материала: а) исходный вид (до увлажнения); б) подготовленный (после увлажнения)

Геометрические характеристики материала имитирующего снежную массу, определялись с помощью металлической линейки, измерительная погрешность которой составляла $\pm 0,5$ мм. Базовые характеристики материала в исходном состоянии представлены в таблице 4.7. В таблице 4.8 приведены базовые характеристики транспортируемого материала после увлажнения.

Таблица 4.7. Базовые характеристики транспортируемого материала в исходном состоянии

	Среднее	Минимум	Максимум	Ст. откл.
Длина, мм	21,4889	8,97436	35,1351	6,59164
Диаметр, мм	8,8017	6,94444	10,2564	0,66184
Плотность, кг/м ³	161,8549	89,74548	280,5782	39,19725
Масса, гр	1,258409	0,430000	2,170000	0,416692

Таблица 4.8. Базовые характеристики транспортируемого материала после увлажнения

	N набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Ст.откл.
Масса	37	1,40730	0,38000	2,5100	0,50881
Длина	37	20,87744	8,75000	33,3333	6,29798
Диаметр	37	11,34142	8,10811	13,8889	1,71441
Плотность	37	96,73574	42,06962	243,0318	42,19503

На рисунке 4.18 изображены гистограммы частот масс частиц и кривые ожидаемого закона распределения для транспортируемого материала в исходном состоянии (рисунок 4.18, а) и для транспортируемого материала в увлажненном состоянии (рисунок 4.18, б).

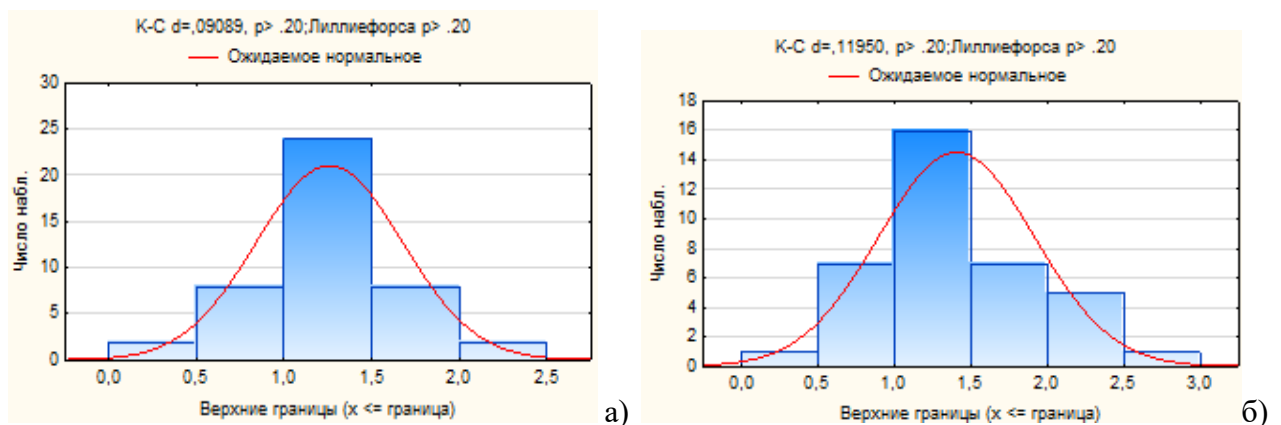


Рисунок 4.19 - Гистограммы частот масс частиц и кривые ожидаемого закона распределения для транспортируемого материала, где а) в исходном состоянии; б) для транспортируемого материала в увлажненном состоянии

Геометрические характеристики транспортируемого материала хорошо описываются нормальным законом распределения, как для материала в исходном состоянии, так и для материала в увлажненном состоянии, за исключением плотности материала, которая для увлажненного материала лучше описывается гамма-распределением.

Для регистрации массы материала, загружаемого в ротор, отдельных ее фрагментов, использовались весы, с относительной погрешностью измерений $\pm 0,01$ гр. и измерительным диапазоном от 0 до 500 гр.

В ходе проведения эксперимента порция материала загружалась в ротор МА, где он произвольно распределялся в межлопастном пространстве (рисунок 4.19).

В результате работы ротора осуществлялась его разгрузка. Заданное количество материала отбрасывалось в сторону. При этом осуществлялась регистрация угловой скорости вращения ротора МА и видеорегистрация потока материала. Для определения угловой скорости вращения ротора МА использовался аналоговый датчик Холла SS49E и аппаратно-программная платформа Arduino. Угловая скорость вращения ротора метательного аппарата при проведении экспериментальных исследований, составила 77,6 рад/с.



Рисунок 4.19 - Заполнение межлопастного пространства ротора МА ФРС транспортируемым материалом

Производилась фото фиксация пятна разброса с помощью камеры, установленной в горизонтальной плоскости на высоте 0,916 м от основания (см. рисунок 4.20).

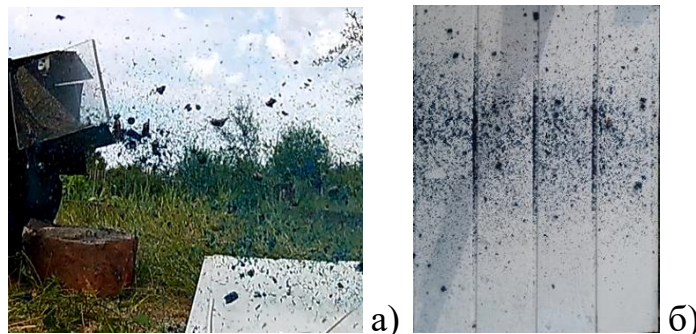


Рисунок 4.20– Фрагмент экспериментальных исследований работы ротора МА и распределения отброшенной массы: а) МА в процессе работы; б) фрагмент формирования снежного вала

Далее проводился сбор материала и его взвешивание. Участки сбора включали в себя поверхности элементов образующих сборное основание.

Фотографии пятна разброса (см. рисунок 4.20) проходили компьютерную обработку, в результате которой определялись координаты положения частиц в принятой системе координат и осуществлялся сквозной подсчет их числа в пятне разброса.

Для обработки результатов была разработана программа, обработки изображений. В результате обработки изображений осуществлялся подсчет частиц и определении их положения в принятой системе координат. Идентификация частиц базировалась на цветовом контрасте фона (сборного основания экспериментальной установки) и частиц моделирующих снег. Язык программирования C#, среда разработки VisualStudio. Фрагмент рабочего окна программы представлен на рисунке 4.21.

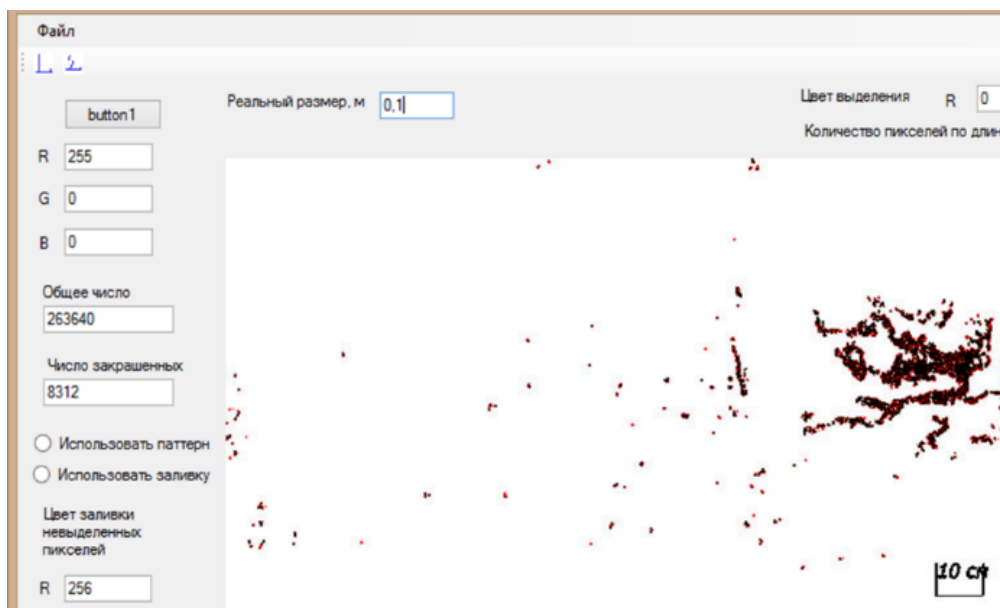


Рисунок 4.21 - Фрагмент рабочего окна программы по количественной обработке пятна разброса

После автоматизированного подсчета количества частиц, C_{ni} , и определения их суммарных масс, M_i , определялась средняя масса одной частицы в группе по формуле:

$$M_{0i} = \frac{C_{ni}}{M_i}. \quad (4.7)$$

Полученные результаты подвергались статистической обработке. Базовые статистические характеристики представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9. Базовые характеристики распределения количества частиц и их масс по отдельным участкам ширины пятна разброса, b_p [4, 140]

	N набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Ст. откл.
Количество частиц, C_{ni} , при угловой скорости вращения ротора, 77,6 рад/с	193	142,135	1,00	974,00	214,79
Суммарные массы частиц, M_i , при угловой скорости вращения ротора, 77,6 рад/с	193	3,646	0,01	17,68	3,43
Средняя масса одной частицы в группе, M_{0i} , при угловой скорости вращения ротора, 77,6 рад/с	193	0,195	0,0016	2,76	0,38

Наиболее предпочтительным вариантом описания плотности распределения количества частиц по ширине снежного вала, C_{ni} , явилась функция гамма-распределения (рисунок 4.22).

Распределение суммарных масс по участкам сбора, M_i , так же удовлетворительно, описывается гамма-распределением (рисунок 4.23).

Распределение средних масс одной частицы в группе, M_{0i} , по участкам сбора описывается распределением χ^2 (рисунок 4.24).

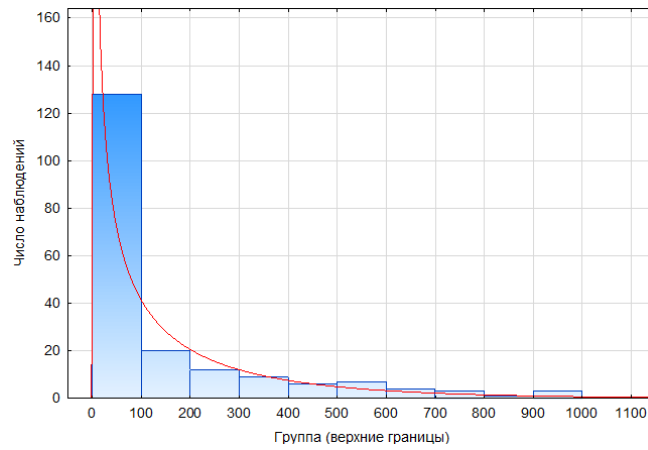


Рисунок 4.22 - Гистограмма распределения количества частиц на отдельных участках основания, C_{ni} ,

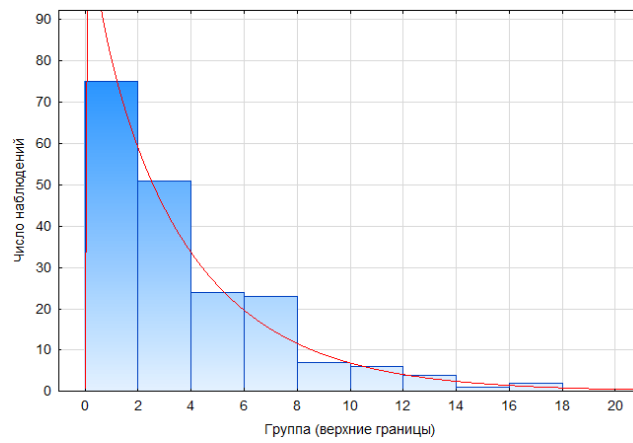


Рисунок 4.23 - Гистограмма распределения суммарных масс частиц на отдельных участках основания, M_i

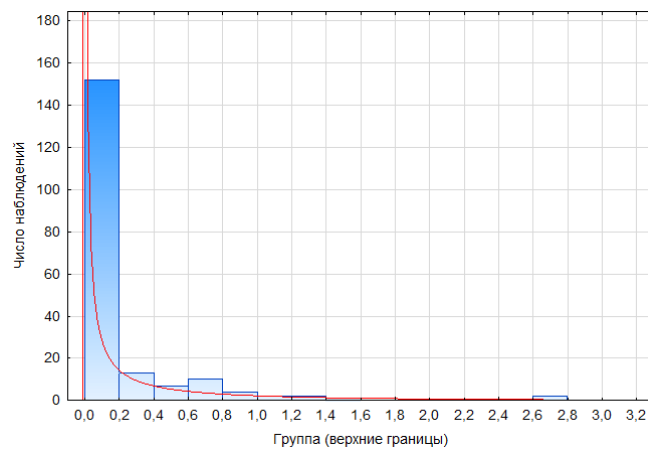


Рисунок 4.24 - Гистограмма распределения средних масс одной частицы в группе, M_{0i} , по участкам сбора

Значения критериев достоверности принятых гипотез представлены в таблице 4.10.

В таблице 4.11 представлены статистические характеристики относительного количества отброшенного материала по отношению к общей массе первоначально загруженного.

Следующим этапом исследований было определение уравнений регрессии позволяющих описать процесс образования снежного вала.

Таблица 4.10 Значения критериев достоверности принятых гипотез

	Закон распределения	Chi- Square	df	p
Количество частиц на отдельных участках основания, C_{ni}	Гамма	7,15374	4	0,12798
Суммарные массы частиц на отдельных участках основания, M_i	Гамма	6,6054	4	0,15827
Средняя масса одной частицы в группе, M_{0i} по участкам сбора	χ^2	13,79380	4	0,00798

Таблица 4.11 Статистические характеристики относительного количества отброшенного материала по отношению к загруженному

	Н число набл.	Среднее	Минимум	Максим.	Ст. откл.
Относительное количество отброшенного материала	9	0,361709	0,161135	0,539278	0,123899

На рисунках 4.25, 4.26, представлены наблюдаемые в результате экспериментов распределения количества частиц, C_{ni} , суммарных масс, M_i , и средних масс отдельных частиц, M_{0i} , по ширине пятна разброса, b_p , и графики полученных функциональных зависимостей.

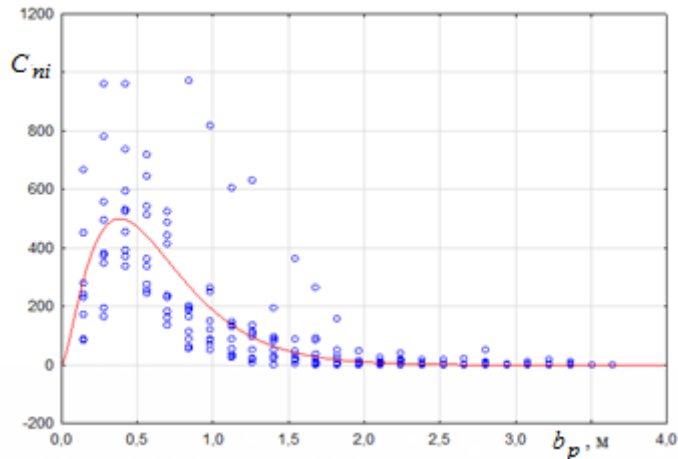


Рисунок 4.25 - Зависимость количества частиц, C_{ni} , от расстояния, b_p , полученное в результате проведенных экспериментов

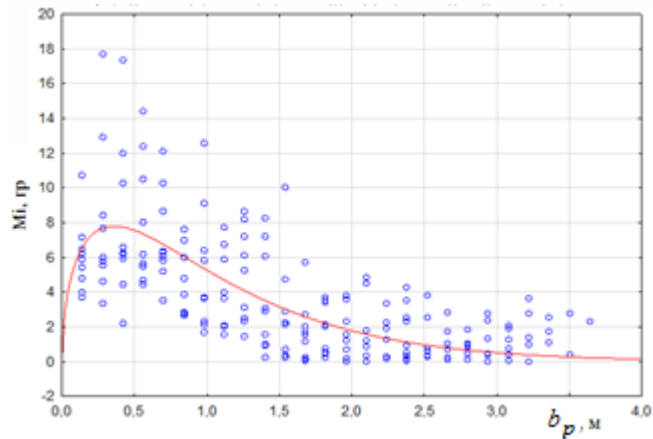


Рисунок 4.26 – Зависимость суммарных масс, M_i , по ширине пятна разброса, b_p ,

Уравнение регрессии (см. рисунок 4.22), описывающей зависимость количества частиц, C_{ni} , от расстояния, b_p , имеет вид:

$$C_{ni} = \frac{e^{-L_i/0,25}}{0,0033 \cdot 0,25^{2,52}} \cdot b_p^{-0,75}. \quad (4.8)$$

Коэффициент детерминации $R = 0,883$.

Уравнение регрессии (см. рисунок 4.23), описывающей зависимость суммарных масс, M_i , от расстояния, b_p , имеет аналогичный вид:

$$M_i = \frac{e^{-L_i/0,69}}{0,078 \cdot 0,69^{1,52}} \cdot b_p^{-0,31}. \quad (4.9)$$

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

Для описания зависимости средних масс отдельных частиц, M_{0i} , по ширине пятна разброса, b_p , использовалась кусочно-линейная регрессия с точкой разрыва. Параметры модели представлены в таблице 4.12.

Значение коэффициента детерминации составило $R = 0,833$.

Установлено, что формирование снежного вала при уборке снега обладает определенными закономерностями, которые существенно отличаются от тех которые лежат в основе снежных наносов, образующихся естественным образом. Соответственно, необходимо учитывать данный аспект, при оценке изменений характеристик снежных образований во времени и степени заносимости очищенных территорий в дальнейшем.

Таблица 4.12 - Параметры кусочно-линейной регрессии с точкой разрыва средних масс отдельных частиц, M_{0i} , по ширине пятна разброса, b_p [140]

	Коэффициент первой прямой	b_p	Коэффициент второй прямой	b_p	Точка разрыва
Оценка	0,017109	0,022265	-0,072845	0,314241	0,195052

Характер распределения частиц по ширине снежного вала носит следующий характер: чем крупнее частица, тем дальше она располагается от места отброса, что обусловлено, тем, что в процессе разгрузки ротора МА, они приобретают большую кинетическую энергию и в процессе свободного полета испытывают меньшее воздействие сил аэродинамического сопротивления, что согласуется с естественным поведением снежных частиц [144, 157].

Таким образом, с использованием полученных уравнений регрессии появляется возможность осуществлять моделирование формирования снежного вала при работе РСО, а так же его визуализацию. Однако данные зависимости не охватывают всего многообразия возможных снежных структур и могут быть применены к плотному из мелкозернистого фирна снегу.

Проведенные экспериментальные исследования, позволили получить представление о характере распределения основных характеристик снежных валов: количестве частиц и их распределении по ширине снежного вала; суммарной массы частиц по ширине вала и распределении масс отдельных частиц по ширине вала.

Выводы

1. По результатам измерений проекции вектора средней скорости воздушного потока, v_{ex} , в области загрузочного окна были составлены уравнения регрессии с достаточной степенью точности описывающие зависимость нормальной проекции вектора скорости воздушного потока на ось O_iX_i от угловой скорости, ω , вращения фрезы роторного снегоочистителя. Величина коэффициента множественной корреляции составила $R=0,9646$. Установлено, что максимальные величины проекций векторов скорости воздушного потока в области загрузочного окна выше для случая без внутренней стенки. Однако в случае питателя оборудованного внутренней стенкой имеющего форму части цилиндра, по всей площади загрузочного окна наблюдается более равномерное распределение величин проекций вектора скорости воздушного потока, при этом среднее значение воздушного потока по всей площади загрузочного окна возросло. Полученные в результате проведенных экспериментов значения числа Рейнолдса, Re , говорят о характере течения воздушного потока в области загрузочного окна, как турбулентного. Максимальное расхождение измеренных и расчетных значений составляет 11%. При значениях угловой скорости вращения фрезы питателя менее 20 рад/с можно не учитывать влияние воздушного потока в области загрузочного окна. Сравнение значений проекций вектора скорости частицы в момент схода с поверхности ленты фрезы питателя, полученными в результате физических экспериментов, с результатами, полученными при проведении имитационного эксперимента и результатами, полученными по методике [51] показало, что, в случае движения крупных частиц результаты по

методике [51] на 6% дают более близкий результат к экспериментальным значениям по сравнению с результатами имитационного моделирования с учетом взаимодействия частиц, что касается экспериментов при транспортировании частиц с характерным радиусом 0,005 м, что касается экспериментов №2 и №3, то результаты при математическом моделировании с учетом взаимодействия частиц уже на 22 и 32% более близки к экспериментальным значениям.

2. Численное моделирование движения воздушных потоков в плоскости загрузочного окна при работе питателя роторного снегоочистителя подтвердило наличие обратных воздушных течений, особенно в нижней части загрузочного окна питателя РСО. При увеличении угловой скорости вращения фрезы питателя, площадь сечения загрузочного окна в котором наблюдаются движения воздушного потока в область питателя уменьшается. Максимальное изменение величины нормальной проекции вектора скорости воздушного потока при увеличении угловой скорости вращения фрезы не превышает 1,5 м/с и наблюдается в верхней трети загрузочного окна. Сравнение результатов численного моделирования движения воздушных потоков в плоскости загрузочного окна с результатами измерений позволяют сделать вывод о возможности использования численных методов для исследования и оптимизации на ЭВМ новых конструктивных решений связанных с рабочими органами РСО.

3. Установлено, что формирование снежного вала при уборке снега обладает определенными закономерностями, которые существенно отличаются от тех которые лежат в основе снежных наносов, образующихся естественным образом. Наиболее предпочтительным вариантом описания плотности распределения количества частиц по ширине снежного вала, C_{ni} , явилась функция гамма-распределения. Распределение суммарных масс по участкам сбора, M_i , так же удовлетворительно, описывается гамма-распределением. Получены уравнения регрессии, описывающие зависимость количества частиц, C_{ni} , от расстояния, b_p , и зависимость суммарных масс, M_i , от расстояния, b_p . Коэффициент детерминации составил $R = 0,883$.

5. ПЕРСПЕКТИВНАЯ МОДЕЛЬ РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ

5.1. Конструктивный образ перспективной модели роторного снегоочистителя

Анализ результатов проведенных теоретических исследований показал, что наименьшие затраты мощности наблюдаются при внедрении фрезы в снежный массив при углах захода, $\theta < 20^\circ$ [16]. 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, $\theta \approx 0^\circ$ [16]. При увеличении угла захода, возрастает энергоэффективность процесса транспортирования снежной массы, возрастает. Таким образом, целесообразно использовать фрезы с углами захода близкими к 90° [16]. Аналитические исследования экстремального поведения основных соотношений, описывающих конструктивный образ питателя РСО, при углах захода ленты фрезы близких к 0 и 90° , 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 5.1, на данную конструкцию получен патент на полезную модель [84]. Необходимо отметить наличие схожих конструктивных схем, которые характерны для подкапывающих машин [12, 61, 106], а так же для машин по добыче торфа с вертикальной фрезой.

Уравнения движения i -точки наружной кромки вертикальной режущей полосы описываются системой уравнений, которая получается из (2.7):

$$\begin{cases} x_{0i} = V_{nep}t + R \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t), \\ y_{0i} = R \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t). \end{cases}$$

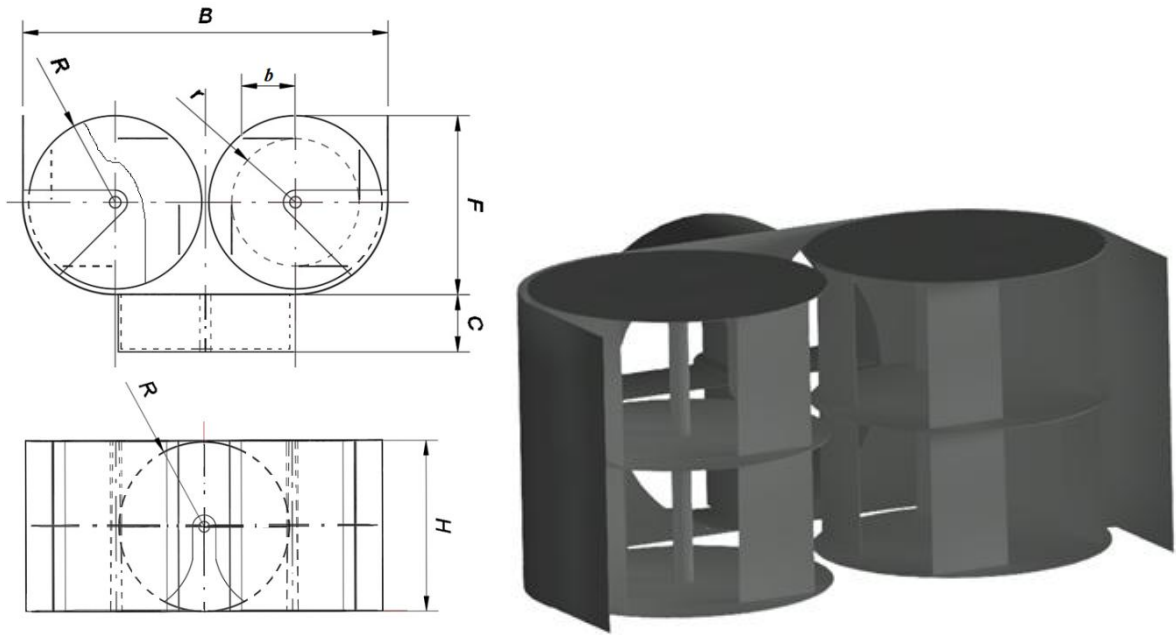


Рисунок 5.1 – Вид сверху, вид спереди и общий вид перспективной энергоэффективной конструкции рабочего органа PCS

Соответственно, уравнение траектории движения наружной кромки вертикальной режущей полосы в плоскости $O_0X_0Y_0$, будет иметь вид [185, 186]:

$$x_{0i} = \frac{V_{nep}}{\omega_{\phi}} \arccos \frac{y_{0i}}{R} + \sqrt{R^2 - y_{0i}^2}.$$

На рисунке 5.2 представлены траектории движения точки наружной кромки i -ой вертикальной полосы и точки $i+1$ вертикальной полосы.

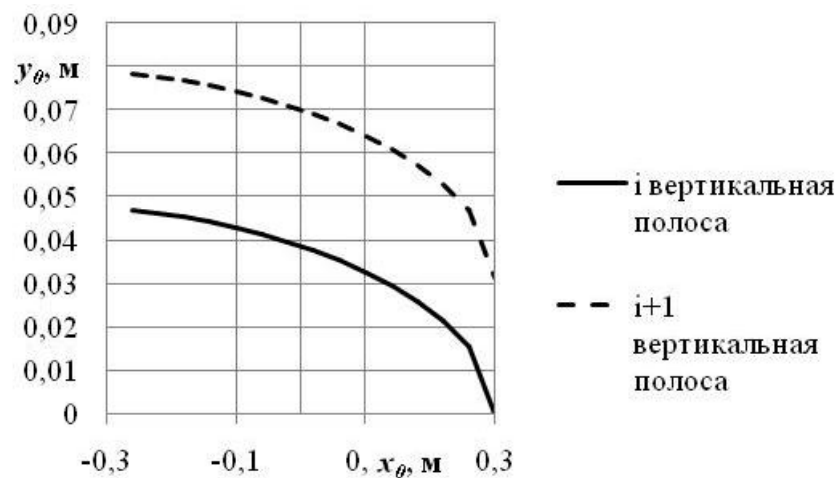


Рисунок 5.2 – Траектории движения точки наружной кромки i -ой вертикальной полосы и точки $i+1$ вертикальной полосы, при $R=0,3$ м; $V_{nep}=0,3$ м/с и $\omega_{\phi}=20$ рад/с

Необходимо отметить, что в отличие от траектории движения фрезы горизонтального питателя, траектория движения режущего органа вертикальной полосы имеет нелинейный характер.

Теоретический объем, W , который вырезает i вертикальная полоса вертикального питателя из снежного массива, может быть представлен как тройной интеграл:

$$W = \int_0^h dz \int_{-R}^R dy \int_0^{\frac{V_{nep}}{\omega_{\phi}} \arccos \frac{y_0 i + \sqrt{R^2 - y_0^2}}{R}} dx .$$

В результате интегрирования теоретический объем, W , который вырезает i вертикальная полоса вертикального питателя из снежного массива, будет определяться выражением:

$$W = 4 \cdot \frac{V_{nep}}{\omega_{\phi}} \cdot \frac{\pi}{n} \cdot R \cdot h. \quad (5.1)$$

где n – количество вертикальных режущих полос вертикального питателя РС.

Сравнение формул вырезаемых объемов вертикальным (5.1) и горизонтальным питателями [18], показывает, что они равны при $\operatorname{tg}\theta=1$, что соответствует углу захода ленты фрезы горизонтального питателя, $\theta=45^{\circ}$. При $\theta>45^{\circ}$ горизонтальный питатель вырезает больший объем. Соответственно, при $\theta<45^{\circ}$ вертикальный питатель вырезает меньший объем снежной массы из снежного массива по сравнению с вертикальным питателем, при прочих равных условиях.

Был проведен сравнительный анализ масс, m_{po} , кг, и моментов инерции, J_{xf} , J_{yf} , J_{zf} , кг/м² энергоэффективной модели рабочего органа РСО (рисунок 5.3, рисунок 5.4) и существующей фрезы питателя ФРС. Сравнение осуществлялось по эквивалентным конструктивным параметрам, обеспечивающим эквивалентную площадь взаимодействия рабочего органа со снежным массивом: ширине и высоте захвата для отдельной половины элементов рабочего оборудования, которая является симметричной частью всего рабочего оборудования образующего рабочий орган РСО.

Определение массовых характеристик осуществлялось в среде T-Flex, где основообразующим материалом являлась конструкционная сталь из стандартной библиотеки программного продукта.

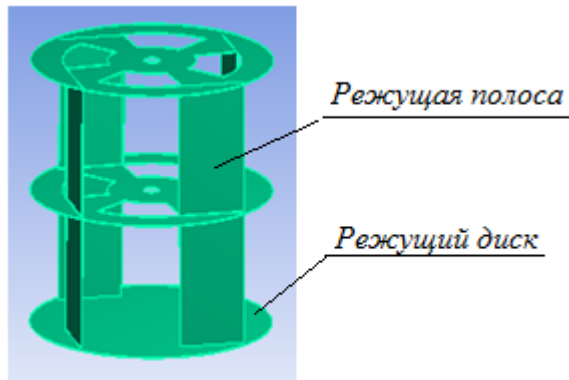


Рисунок 5.3 – Общий вид вертикального ротора РСО

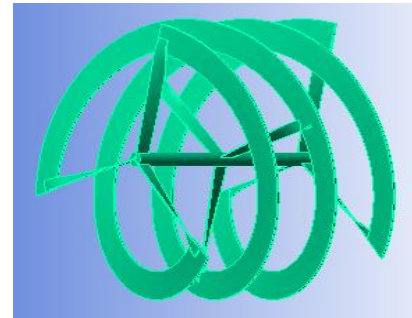


Рисунок 5.4 – Общий вид трехзаходной фрезы РСО

Значения геометрических размеров, масс и моментов инерции сравниваемых частей рабочих органов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Значения геометрических размеров, масс и моментов инерции вертикальной фрезы и фрезы питателя ФРС

Фреза	R , м	b_{po} , м	m_{po} , кг	J_z , кг/м ²	J_y , кг/м ²	J_x , кг/м ²
Трехзаходная фреза с постоянной шириной ленты	0,22	0,3	6,69	0,194	0,275	0,194
Вертикальная фреза	0,15	0,44	2,47	$3,29 \cdot 10^{-2}$	$8,04 \cdot 10^{-2}$	$8,04 \cdot 10^{-2}$

На основании данных таблицы 5.1 следует практически трехкратное уменьшение металлоемкости конструкции вертикальной фрезы. Кроме этого относительно простые пространственные формы вертикальной фрезы по сравнению с фрезой питателя ФРС позволяют произвести замену металлических

элементов на неметаллические, что позволит обеспечить еще более высокое превосходство по критерию энергоемкость и ряду других эксплуатационных показателях.

Значения моментов инерции обеспечивают возможность увеличения угловой скорости вращения вертикальной фрезы, без ущерба для механических частей обеспечивающих передачу крутящего момента. Так же в случае предлагаемой конструкции, увеличение угловой скорости вращения приводит к сокращению времени скольжения снежных частиц по рабочей поверхности и увеличению их скорости движения за счет больших центробежных сил, однако при этом минимизирует вероятность переброса снежной массы, которое наблюдается при увеличении угловой скорости вращения фрезы (шнека), что является ограничивающим фактором интенсификации проведения снегоочистных работ шнеко- фрезерно-роторными снегоочистителями.

В соответствии с выражением (1.1) [11] максимальная величина поступательной скорости при радиусе фрезы, $R= 0,15$ м и $\omega_{\phi}=8$ рад/с, составит 1,2 м/с. В случае двукратного увеличения, $\omega_{\phi}=16$ рад/с, максимальная величина поступательной скорости скоростного снегоочистителя уже составит 2,4 м/с, при том же значении радиуса фрезы R .

Это особенно актуально для снегоочистителей средней и большой мощности.

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 (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5 – Общий вид снегоочистительного оборудования с вертикальным расположением фрезерного питателя, с увеличенной шириной захвата, за счет установки дополнительных рабочих органов

Для подтверждения выдвинутой гипотезы, о том, что фрезы с углом захода, $\theta \approx 0^\circ$, могут повысить энергоэффективность процесса, необходимо провести дополнительные исследования. Необходимо разработать математическую модель предлагаемой конструкции, провести теоретические и экспериментальные исследования.

5.2. Математическая модель перспективного роторного снегоочистителя

Расчетная схема предлагаемой конструкции, на основе которой была составлена математическая модель, представлена на рисунке 5.6.

Для описанной конструктивной схемы на частицы будут действовать те же активные силы, что и в случае горизонтального расположения фрезы питателя (см. п. 2.1.3) [16].

Для составления уравнений движения необходимо найти частные производные по проекциям скоростей и полную производную по времени выражения (5.2). В результате имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_\phi} = T_{qx} = m_i \cdot \frac{d}{dt} (\dot{x}_{\phi i} + \omega_\phi \cdot y_{\phi i}) = m_i \cdot \ddot{x}_{\phi i} + m_i \cdot \omega_\phi \cdot \dot{y}_{\phi i}, \\ \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_\phi} = T_{qy} = m_i \cdot \ddot{y}_{\phi i} + m_i \cdot \omega_\phi \cdot \dot{x}_{\phi i}, \\ \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_\phi} = T_{qz} = 0. \end{array} \right.$$

Так же, необходимо найти частные производные по координатам выражения (5.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial x_\phi} = m_i \cdot (\dot{y}_{\phi i} + \omega_\phi \cdot x_{\phi i}) \cdot \omega_\phi, \\ \\ \frac{\partial T}{\partial y_\phi} = m_i \cdot (\dot{x}_{\phi i} + \omega_\phi \cdot y_{\phi i}) \cdot \omega_\phi, \\ \\ \frac{\partial T}{\partial z_\phi} = 0. \end{array} \right.$$

Окончательно, уравнения движения примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_{\phi i} + \omega_\phi^2 \cdot x_{\phi i} + 2 \cdot \omega_\phi \cdot \dot{y}_{\phi i} = Q_x, \\ \\ \ddot{y}_{\phi i} + \omega_\phi^2 \cdot y_{\phi i} + 2 \cdot \omega_\phi \cdot \dot{x}_{\phi i} = Q_y, \\ \\ \ddot{z}_{\phi i} = Q_z = 0. \end{array} \right.$$

где Q_x , Q_y , Q_z – обобщенные силы по обобщенным координатам системы координат $O_\phi X_\phi Y_\phi Z_\phi$.

Динамика транспортирования снежных частиц будет описываться системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\ddot{x}_{\phi i} + \omega_{\phi}^2 \cdot x_{\phi i} + 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{y}_{\phi i} - \lambda_{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial x_{\phi i}} + f_{\phi} \sqrt{\left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial x_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial y_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial z_{\phi i}} \right)^2} \cos \varphi_{\phi i} \right) - \\
- \lambda_z \cdot \left(\frac{\partial f_z}{\partial x_{\phi i}} + f_{\psi} \sqrt{\left(\frac{\partial f_z}{\partial x_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_z}{\partial y_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_z}{\partial z_{\phi i}} \right)^2} \cos \varphi \right) - \frac{F_{ij}^X}{m_i} = 0, \quad (5.3) \\
\ddot{y}_{\phi i} - \omega_{\phi}^2 \cdot y_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} - \lambda_{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial y_{\phi i}} + f_{\phi} \sqrt{\left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial x_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial y_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial z_{\phi i}} \right)^2} \cos \psi_{\phi} \right) - \\
- \lambda_z \cdot \left(\frac{\partial f_z}{\partial y_{\phi i}} + f_{\psi} \sqrt{\left(\frac{\partial f_z}{\partial x_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_z}{\partial y_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_z}{\partial z_{\phi i}} \right)^2} \cos \psi \right) - \frac{F_{iy}^Y}{m_i} = 0; \quad (5.4) \\
- \lambda_{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial z_{\phi i}} + f_{\phi} \sqrt{\left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial x_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial y_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\epsilon}}{\partial z_{\phi i}} \right)^2} \cos \zeta_{\phi} \right) - \\
- \lambda_z \cdot \left(\frac{\partial f_z}{\partial z_{\phi i}} + f_{\psi} \sqrt{\left(\frac{\partial f_z}{\partial x_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_z}{\partial y_{\phi i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_z}{\partial z_{\phi i}} \right)^2} \cos \zeta \right) - g - \frac{F_{ij}^Z}{m_i} = 0. \quad (5.5)
\end{array} \right.$$

Связи так же будут являться неудерживающими и неголономными. Их математическое описание будет иметь следующий вид [16]:

- для случая безотрывного движения по поверхности режущего диска:

$$f_z = z_{\phi i} - (h_i + r_{\psi i}) = 0; \quad (5.6)$$

- для случая безотрывного движения частицы по поверхности режущей полосы (рисунок 5.7):

$$f_{\epsilon} = x_{\phi i} - r_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t) = 0,$$

$$f_{\epsilon} = y_{\phi i} - r_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t) = 0,$$

$$f_{\epsilon} = x_{\phi i} - R_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t + \xi_0) = 0,$$

$$f_e = y_{\phi i} - R_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t + \xi_0) = 0.$$

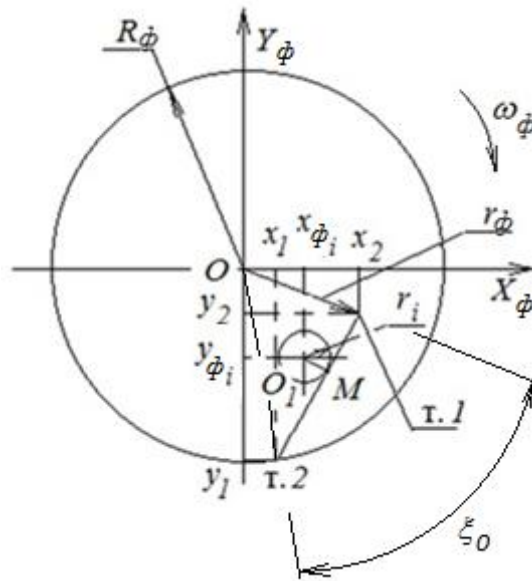


Рисунок 5.7– Расчетная схема траектории движения частицы по поверхности фрезы, вид сверху:

ИЛИ

$$f_e = \frac{x_{\phi i} - r_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t)}{R_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t + \xi_0) - r_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t)} - \frac{y_{\phi i} - r_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t)}{R_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t + \xi_0) - r_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t)} = 0. \quad (5.7)$$

На рисунке 5.8 представлены решения уравнения связи для следующих параметров вертикального питателя:

- $R_{\phi} = 0,15$, м;
- $r_{\phi} = 0,1$, м;
- $\omega_{\phi} = 20$, рад/с;
- $\xi_0 = 20^{\circ}; 30^{\circ}$;

для моментов времени $t = 0; 0,01; 0,02$, с.

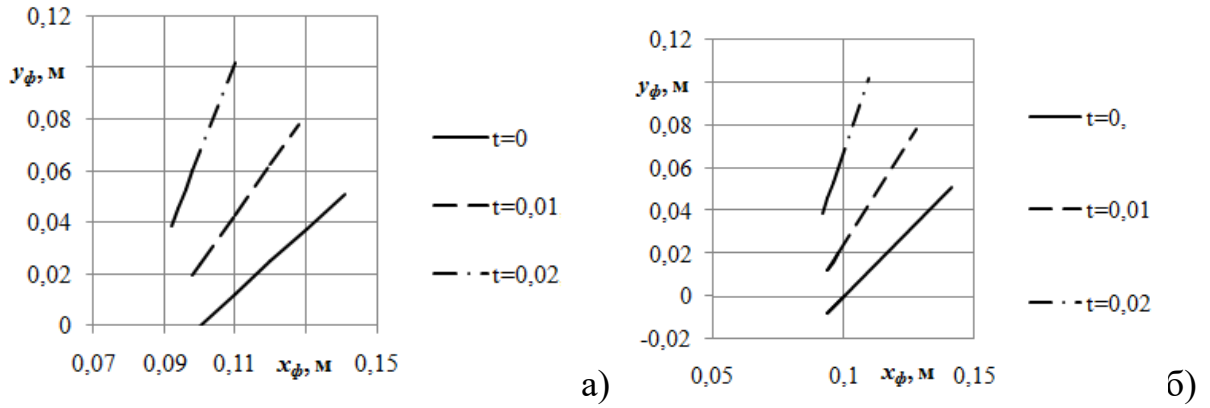


Рисунок 5.8– Решение уравнения связи для а) $\xi_0=20^\circ$; б) $\xi_0=30^\circ$

В случае частицы конечного размера уравнение связи определяется из условия равенства расстояния между координатами положения частицы и линией, лежащей в плоскости вертикальной полосы режущего органа питателя, радиусу снежной частицы, $r_{\text{чи}}$, (см. рисунок 5.6) [16]:

$$f_\varepsilon = \frac{(R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t)) \cdot x_{\phi i} - (R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t)) \cdot y_{\phi i}}{\sqrt{(R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t))^2 + (R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t))^2}} + \frac{r_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t) \cdot R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) \cdot r_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t)}{\sqrt{(R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t))^2 + (R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t))^2}} = r_{\text{чи}},$$

$$f_\varepsilon = \left(\frac{x_{\phi i}}{A_1} - \frac{y_{\phi i}}{A_2} + \frac{R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) \cdot r_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t)}{A_1 \cdot A_2} - \frac{R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) \cdot r_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t)}{A_1 \cdot A_2} \right)^2,$$

$$= r_{\text{чи}}^2 \cdot \frac{A_2^2 + A_1^2}{A_2^2 \cdot A_1^2}$$

$$f_\varepsilon = \left(\frac{x_{\phi i}}{A_1} - \frac{y_{\phi i}}{A_2} - \frac{R_\phi \cdot r_\phi \cdot \sin(\xi_0)}{A_1 \cdot A_2} \right)^2 - r_{\text{чи}}^2 \cdot \frac{A_2^2 + A_1^2}{A_2^2 \cdot A_1^2} = 0, \quad (5.8)$$

где

$$A_1 = R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t),$$

$$A_2 = R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t).$$

Для составления уравнений движения частиц по поверхностям режущего диска и режущей полосы необходимо найти частные производные уравнений связей по координатам.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f_z}{\partial x_\phi} = 0, \\ \frac{\partial f_z}{\partial y_\phi} = 0, \\ \frac{\partial f_z}{\partial z_\phi} = 1. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f_\epsilon}{\partial x_\phi} = \frac{1}{R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t)} = 0, \\ \frac{\partial f_\epsilon}{\partial y_\phi} = -\frac{1}{R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t)} = 0, \\ \frac{\partial f_\epsilon}{\partial z_\phi} = 0. \end{array} \right. \quad (5.9)$$

(5.10)

Из выражений 5.9, 5.10 следуют два очевидных ограничения:

$$R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t) \neq 0,$$

$$R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t + \xi_0) - r_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t) \neq 0.$$

При $\xi_0=0$, $r_\phi=R_\phi$, данные ограничения выполняются, что говорит об отсутствии связи такого типа, т.е. снежная частица не скользит по поверхности вертикальной режущей полосы. При других значениях ξ_0 данные соотношения выполняются при $\omega_\phi=\pi/2-\xi_0$, что интерпретируется как смена знака действия нормальной реакции.

Косинусы углов направления проекций сил нормальных реакций будут равны [16]:

- для режущего диска:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f_2}{\partial x_\phi} / \Delta f_2 = 0, \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_\phi} / \Delta f_2 = 0, \\ \frac{\partial f_2}{\partial z_\phi} / \Delta f_2 = 1; \end{array} \right.$$

- для режущей полосы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f_6}{\partial x_\phi} / \Delta f_6 = \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}}, \\ \frac{\partial f_6}{\partial y_\phi} / \Delta f_6 = -\frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}}, \\ \frac{\partial f_6}{\partial z_\phi} / \Delta f_6 = 0. \end{array} \right.$$

Косинусы углов направления проекций сил трения режущего диска определяются по формулам (2.31 – 2.33), а режущей полосы, сила трения которой лежит в ее плоскости и параллельна плоскости режущего диска, определяются по формулам [16]:

$$\cos \alpha = \frac{\frac{1}{A_2}}{\sqrt{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2}}},$$

$$\cos \beta = \frac{\frac{1}{A_1}}{\sqrt{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2}}},$$

$$\cos \gamma = 0.$$

Для определения численных значений нормальных реакций необходимо выполнить дифференцирование по времени, t , (5.7, 5.8). В результате дифференцирования получим:

$$\frac{df_{\varepsilon}}{dt} = \dot{z}_{\phi i}; \quad (5.11)$$

$$\frac{d^2 f_{\varepsilon}}{dt^2} = \ddot{z}_{\phi i}; \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{df_{\varepsilon}}{dt} = & \left(\frac{x_{\phi i}}{A_1} - \frac{y_{\phi i}}{A_2} - \frac{R_{\phi} \cdot r_{\phi} \cdot \sin(\xi_0)}{A_1 \cdot A_2} \right) \left[\frac{\dot{x}_{\phi i}}{A_1} - \frac{\dot{y}_{\phi i}}{A_2} - x_{\phi i} \cdot \frac{\dot{A}_1}{A_1^2} + y_{\phi i} \cdot \frac{\dot{A}_2}{A_2^2} + \right. \\ & \left. + R_{\phi} \cdot r_{\phi} \cdot \sin(\xi_0) \cdot \frac{\dot{A}_1 \cdot A_2 + \dot{A}_2 \cdot A_1}{A_1 \cdot A_2} \right] + r_{\phi i}^2 \cdot \frac{A_2^3 \cdot \dot{A}_1 + A_1^3 \cdot \dot{A}_2}{A_2^3 \cdot A_1^3} = 0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

где

$$\dot{A}_1 = -\omega_{\phi} \cdot (R_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t + \xi_0) - r_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot t)) = -\omega_{\phi} \cdot A_2,$$

$$\dot{A}_2 = \omega_{\phi} \cdot (R_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t + \xi_0) - r_{\phi} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot t)) = \omega_{\phi} \cdot A_1.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{df_{\varepsilon}}{dt} = & \left(\frac{x_{\phi i}}{A_1} - \frac{y_{\phi i}}{A_2} - \frac{R_{\phi} \cdot r_{\phi} \cdot \sin(\xi_0)}{A_1 \cdot A_2} \right) \left[\frac{\dot{x}_{\phi i}}{A_1} - \frac{\dot{y}_{\phi i}}{A_2} + \omega_{\phi} \cdot \left(x_{\phi i} \cdot \frac{A_2}{A_1^2} + y_{\phi i} \cdot \frac{A_1}{A_2^2} \right) + \right. \\ & \left. + \omega_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot r_{\phi} \cdot \sin(\xi_0) \cdot \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_1^2 \cdot A_2^2} \right] + \omega_{\phi} \cdot r_{\phi i}^2 \cdot \frac{A_1^4 - A_2^4}{A_1^3 \cdot A_2^3} = 0 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Вторая производная примет вид:

$$\begin{aligned}
\frac{d^2 f_e}{dt^2} = & \left[\frac{\dot{x}_{\phi i}}{A_1} - \frac{\dot{y}_{\phi i}}{A_2} + \omega_{\phi} \cdot \left(x_{\phi i} \cdot \frac{A_2}{A_1^2} + y_{\phi i} \cdot \frac{A_1}{A_2^2} \right) + r_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot \sin(\xi_0) \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_1^2 \cdot A_2^2} \right]^2 + \\
& + \left(\frac{x_{\phi i}}{A_1} - \frac{y_{\phi i}}{A_2} - \frac{R_{\phi} \cdot r_{\phi} \cdot \sin(\xi_0)}{A_1 \cdot A_2} \right) \cdot \left(\frac{\ddot{x}_{\phi i}}{A_1} - \frac{\ddot{y}_{\phi i}}{A_2} + 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \left(\dot{x}_{\phi i} \cdot \frac{A_2}{A_1^2} + \dot{y}_{\phi i} \cdot \frac{A_1}{A_2^2} \right) + \right. \\
& + \omega_{\phi}^2 \cdot \left(\frac{x_{\phi i}}{A_1} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{A_2^2}{A_1^2} \right) - \frac{y_{\phi i}}{A_2} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) \right) - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot r_{\phi} \cdot \sin(\xi_0) \frac{A_1^4 + A_2^4}{A_1^3 \cdot A_2^3} \left. \right] - \\
& - \omega_{\phi}^2 \cdot r_{\phi}^2 \cdot \left(\frac{A_1^4 \cdot A_2^2 + A_1^2 \cdot A_2^4 + 3 \cdot A_1^6 + 3 \cdot A_2^6}{A_1^4 \cdot A_2^4} \right) = 0
\end{aligned}$$

Или с учетом следующих обозначений:

$$\begin{aligned}
M_1 &= \frac{\dot{x}_{\phi i}}{A_1} - \frac{\dot{y}_{\phi i}}{A_2} + \omega_{\phi} \left(x_{\phi i} \frac{A_2}{A_1^2} + y_{\phi i} \frac{A_1}{A_2^2} \right) + r_{\phi} R_{\phi} \omega_{\phi} \sin(\xi_0) \frac{A_1^2 - A_2^2}{A_1^2 A_2^2}, \\
M_2 &= \frac{x_{\phi i}}{A_1} - \frac{y_{\phi i}}{A_2} - \frac{R_{\phi} r_{\phi} \sin(\xi_0)}{A_1 A_2}, \\
M_3 &= 2 \omega_{\phi} \left(\dot{x}_{\phi i} \frac{A_2}{A_1^2} + \dot{y}_{\phi i} \frac{A_1}{A_2^2} \right) + \omega_{\phi}^2 \left(\frac{x_{\phi i}}{A_1} \left(1 + 2 \frac{A_2^2}{A_1^2} \right) - \frac{y_{\phi i}}{A_2} \left(1 + 2 \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) \right) - \\
& - 2 \cdot \omega_{\phi} R_{\phi} r_{\phi} \sin(\xi_0) \frac{A_1^4 + A_2^4}{A_1^3 A_2^3}, \\
M_4 &= \frac{A_1^4 A_2^2 + A_1^2 A_2^4 + 3 A_1^6 + 3 A_2^6}{A_1^4 A_2^4},
\end{aligned}$$

окончательно получим:

$$\frac{d^2 f_e}{dt^2} = M_1^2 + M_2 \left(\frac{\ddot{x}_{\phi i}}{A_1} - \frac{\ddot{y}_{\phi i}}{A_2} + M_3 \right) - \omega_{\phi}^2 r_{\phi}^2 \cdot M_4 = 0. \quad (5.15)$$

Уравнения движения (2.2 ... 2.4) применительно к исследуемой конструкции примут вид:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \ddot{x}_{\phi i} &= -\omega_{\phi}^2 \cdot x_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{y}_{\phi i} + \frac{N_{\phi i}}{m_i} \cdot \left(\frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} + f_{\phi} \cdot \frac{A_1}{\sqrt{A_2^2 + A_1^2}} \right) + \\
 &+ \frac{N_{\psi i}}{m_i} \cdot f_{\psi} \cdot \frac{\dot{x}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2}} + \frac{F_{ij}^x}{m_i} ; \\
 \ddot{y}_{\phi i} &= \omega_{\phi}^2 \cdot y_{\phi i} + 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} + \frac{N_{\phi i}}{m_i} \cdot \left(\frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} + f_{\phi} \cdot \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \right) + \\
 &+ \frac{N_{\psi i}}{m_{\psi}} \cdot f_{\psi} \cdot \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2}} + \frac{F_{ij}^y}{m_i} ; \\
 \ddot{z}_{\phi i} &= \frac{N_{\psi i}}{m_i} + \frac{F_{ij}^z}{m_i} - \frac{G}{m_i} .
 \end{aligned} \right. \quad (5.16)$$

Из данной системы уравнений с использованием уравнений связи можно получить выражения нормальных реакций. Для этого из третьего уравнения системы (5.16) выражаем $N_{\psi i}$ [16]:

$$\frac{N_{\psi i}}{m_i} = g - \frac{F_{ij}^z}{m_i} ; \quad (5.17)$$

и подставляем полученное выражение в первое и второе уравнение системы (5.16):

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

Введем следующие обозначения:

$$B_1 = \frac{A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} ,$$

$$B_2 = \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}},$$

$$D_1 = \frac{\dot{x}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2}},$$

$$D_2 = \frac{\dot{y}_{\phi i}}{\sqrt{\dot{x}_{\phi i}^2 + \dot{y}_{\phi i}^2}}.$$

Тогда уравнения движения после подстановки (5.16) примут вид:

$$\ddot{x}_{\phi i} = -\omega_{\phi}^2 \cdot x_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{y}_{\phi i} + \frac{N_{\phi i}}{m_i} \cdot (B_1 + f_{\phi} \cdot B_2) + g \cdot f_u \cdot D_1 - \frac{F_{ij}^z}{m_i} \cdot f_u \cdot D_1 + \frac{F_{ij}^x}{m_i}; \quad (5.18)$$

$$\ddot{y}_{\phi i} = \omega_{\phi}^2 \cdot y_{\phi i} + 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} + \frac{N_{\phi i}}{m_i} (B_2 + f_{\phi} \cdot B_1) + g \cdot f_u \cdot D_2 - \frac{F_{ij}^z}{m_i} \cdot f_u \cdot D_2 + \frac{F_{ij}^y}{m_i}. \quad (5.19)$$

Выражаем $\ddot{y}_{\phi i}$ из (5.15):

$$\ddot{y}_{\phi i} = A_2 \cdot \frac{M_1^2}{M_2} + \ddot{x}_{\phi i} \cdot \frac{A_2}{A_1} + A_2 \cdot M_3 - \omega_{\phi}^2 \cdot r_{ci}^2 \cdot A_2 \cdot \frac{M_4}{M_2}. \quad (5.20)$$

при

$$M_2 \neq 0$$

$$A_1 \neq 0$$

Производим подстановку (5.20) в (5.19) выражаем $\ddot{x}_{\phi i}$:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{\phi i} = & \omega_{\phi}^2 \cdot y_{\phi i} \cdot \frac{A_1}{A_2} + 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} \cdot \frac{A_1}{A_2} + \frac{N_{\phi i}}{m_i} \cdot (B_2 + f_{\phi} \cdot B_1) \cdot \frac{A_1}{A_2} + \\ & + g \cdot f_u \cdot D_2 \cdot \frac{A_1}{A_2} - \frac{F_{ij}^z}{m_i} \cdot f_u \cdot D_2 \cdot \frac{A_1}{A_2} + \frac{F_{ij}^y}{m_i} \cdot \frac{A_1}{A_2} + \omega_{\phi}^2 \cdot r_{ci}^2 \cdot A_1 \cdot \frac{M_4}{M_2} - \\ & - A_1 \cdot \frac{M_1^2}{M_2} - A_1 \cdot M_3 \end{aligned} \quad (5.21)$$

Приравниваем (5.21) и (5.18) и выражаем $N_{\phi i}$:

$$\begin{aligned} \frac{N_{\phi i}}{m_i} [B_2 \cdot (\frac{A_1}{A_2} - f_\phi) + B_1 \cdot (f_\phi \cdot \frac{A_1}{A_2} - 1)] = -\omega_\phi^2 \cdot (x_{\phi i} + y_{\phi i} \cdot \frac{A_1}{A_2}) - \\ - 2 \cdot \omega_\phi \cdot (\dot{y}_{\phi i} + \dot{x}_{\phi i} \cdot \frac{A_1}{A_2}) + g \cdot f_u \cdot (D_1 - D_2 \cdot \frac{A_1}{A_2}) + \frac{F_{ij}^x}{m_i} + \frac{F_{ij}^z}{m_i} \cdot f_u \cdot (D_2 \cdot \frac{A_1}{A_2} - D_1) -; (5.22) \\ - \frac{F_{ij}^y}{m_i} \cdot \frac{A_1}{A_2} - \omega_\phi^2 \cdot r_{ci}^2 \cdot A_1 \cdot \frac{M_4}{M_2} + A_1 \cdot \frac{M_1^2}{M_2} + A_1 \cdot M_3 \end{aligned}$$

Введем обозначение:

$$C = B_2 \cdot (\frac{A_1}{A_2} - f_\phi) + B_1 \cdot (f_\phi \cdot \frac{A_1}{A_2} - 1) \neq 0$$

Тогда окончательно получаем уравнения сил нормальных реакций для конструкции снегоочистителя (см. рисунок 5.1):

$$\begin{aligned} \frac{N_\phi}{m_{ci}} = -\frac{\omega_\phi^2}{C} \cdot (x_{\phi i} + y_{\phi i} \cdot \frac{A_1}{A_2}) - 2 \cdot \frac{\omega_\phi}{C} \cdot (\dot{y}_{\phi i} + \dot{x}_{\phi i} \cdot \frac{A_1}{A_2}) + g \cdot \frac{f}{C} \cdot (D_1 - D_2 \cdot \frac{A_1}{A_2}) + \\ + \frac{F_{ij}^x}{m_i C} + \frac{F_{ij}^z}{m_i \cdot C} \cdot f_u \cdot (D_2 \cdot \frac{A_1}{A_2} - D_1) - \frac{F_{ij}^y}{m_i} \cdot \frac{A_1}{C \cdot A_2} - \omega_\phi^2 \cdot r_{ci}^2 \cdot A_1 \cdot \frac{M_4}{C \cdot M_2} + \\ + A_1 \cdot \frac{M_1^2}{C \cdot M_2} + A_1 \cdot \frac{M_3}{C} \end{aligned} ; (5.23)$$

Таким образом, получены уравнения нормальных реакций (5.17), (5.23) для предлагаемой конструкции РСО, которые совместно с уравнениями (5.18) и (5.19) образуют замкнутую систему уравнений, описывающую работу вертикального питателя РСО [16].

Затраты мощности на транспортирование снежной массы в предлагаемой конструкции питателя РСО, определяются по формуле (3.1).

В результате получена математическая модель перспективного энергоэффективного рабочего органа питателя РСО, которая позволяет моделировать движение снежной частицы в вертикальном питателе под действием приложенных внешних сил.

5.3. Условия применения уравнений работы вертикального питателя роторного снегоочистителя

Рассматривая движение снежной частицы конечного размера в вертикальном питателе РСО, в системе координат, связанной с осью вращения вертикального питателя $O_{\phi}X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$. Возможны несколько вариантов ее движения в вертикальном питателе (рисунок 5.9). Первый – частица скользит по поверхности горизонтального режущего диска. Второй – частица достигла неподвижной стенки кожуха ротора и скользит вдоль нее. Третий – частица скользит вдоль вертикальной режущей полосы. При этом переход от первого варианта движения ко второму, третьему и наоборот, сопровождаются таким явлением, как удар. Для корректного перехода от одной расчетной схемы к другой необходимо определение общих закономерностей, описывающих удар снежной частицы о неподвижную обечайку и вертикальную режущую полосу вертикального питателя, а так же обоснование условия окончания удара и перехода к описанию движения снежной частицы уравнениями, не учитывающими ударных эффектов.

В общем виде существующие подходы, описывающие такой феномен, как удар представлены в [165]. В [58] также представлены теоретические обобщения современной теории удара.

В соответствии с [108], использование классической теории удара, базирующейся на законе сохранения импульса и такой характеристике, как коэффициент восстановления скорости при ударе, позволяет определить общие черты ударного процесса в конкретных рассматриваемых условиях. В работе [63], рассмотрен подход к определению связи между коэффициентом восстановления скорости при ударе и плотностями и прочностной характеристикой материалов взаимодействующих тел. В [58] проведены сравнительные исследования коэффициента восстановления скорости при ударе различных материалов. В теории удара коэффициент восстановления характеризует не упругость тел, а их твердость [58].

Описание установки и методики по измерению скоростей удара твердых тел, базирующаяся на положениях теоретической механики, делающей описываемую систему в процессе удара однозначно определенной, представлено в [98].

Уравнения удара с учетом вращения тел на основе положений теоретической механики описаны в [41, 42]. Так же в работе [108] была рассмотрена задача одновременного удара n - тел. В работе [28] описана система коэффициентов восстановления для описания ударного взаимодействия с точки зрения классической теории удара, в механической системе, на основании которых, применительно к машинам ударного действия, делается вывод о необходимости обеспечения одинаковых масс бойка и наковальни с реализацией их встречного движения до удара. Исследованы вопросы устойчивого движения твердого тела сопровождающегося ударом о горизонтальную плоскость. Получены условия устойчивости и неустойчивости [64]. В [50] показано, что в отсутствии трения условия отрыва на стационарных движениях не выполняются, при малых значениях угла между осью симметрии и вертикалью в окрестности стационарных движений контакт между телом и плоскостью не прерывается. В работе [102] отмечается, что взаимодействие достаточно крупных (по сравнению с высотой шероховатости) сферических тел после удара о шероховатую стенку при сравнительно невысоких скоростях хорошо описывается с помощью модели Рауса, и экспериментально показано, что коэффициент восстановления при ударе шара о неподвижную наклонную поверхность, является функцией угла наклона.

Однако использование положений теоретической механики, обладает рядом недостатков. В частности, в [29] говорится о необходимости рассмотрения конечной длительности фазы удара в связи с возможностью применения в ней конечных управляющих сил импульсного управления, что трансформирует исходную задачу с импульсными воздействиями и разрывными траекториями к эквивалентной с ограниченными входными воздействиями и непрерывными траекториями. Вопрос получения более точного поведения соударяемых тел и перехода к ненулевой длительности удара приводит к необходимости рассмотрения упруговязких и упругопластических тел. Например, в работе [27],

рассмотрены методы, использующие подходы классической механики сплошной среды, а также модели, основанные на теории распространения упругих волн в твердом материале.

В статье [49] описана нелинейная вязкоупругая модель удара тела о неподвижное препятствие Ханта–Кроссли. Определены коэффициент восстановления, потерянная при ударе кинетическая энергия и их зависимость от скорости соударения. Так же в [49] отмечается, что при косом ударе тела о неподвижное препятствие (движение тела до удара и после удара произвольное) следует использовать определение коэффициента восстановления в трактовке Пуассона.

В работах [38, 132] для описания упруго пластического ударного взаимодействия твердых деформируемых тел используется модель Герца. Некоторые механизмы выбора формы и закономерности фрагментации упругих тел простой геометрии, подвергшихся ударному воздействию рассмотрены в [174].

В работе [55], в рамках приближения Герца построена нелинейная математическая модель поперечного удара абсолютно жесткого твердого тела в форме шара массой M с поверхностью льда, моделируемого тонкой пластиной, плавающей на воде большой глубины. Так же установлено, что разрушение льда происходит при достижении контактным напряжением предела прочности льда на сжатие.

В работе [26] предложен способ расчета сферической оболочки при неосесимметричном ударе массивного тела, где контактная сила взаимодействия определялась на основе упругопластической модели местного смятия для параболического ударника.

Аналитическое решение задачи удара цепочки связанных материальных точек, с определением условия окончания фазы удара, в вязкоупругой трактовке, описано в [30].

В работе [109] представлен алгоритм численного разрешения кратного удара, для случая, когда РіС метод не применим [109].

Таким образом, существующие теории контактного взаимодействия позволяют решать разнообразные технические задачи. В зависимости от поставленных целей, используются различные математические модели, описывающие удар.

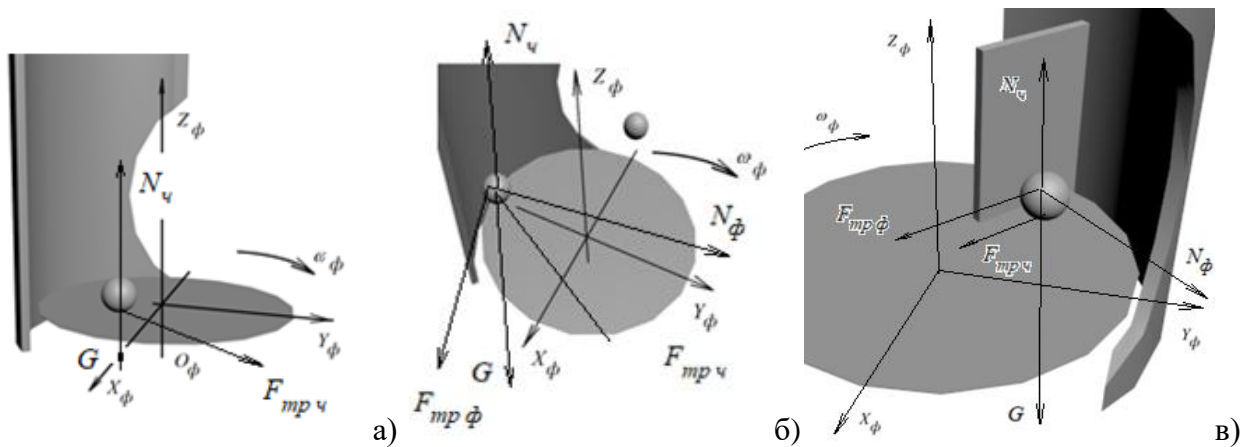


Рисунок 5.9 – Возможные варианты движения снежной частицы в вертикальном питателе РСО:

а) скольжение частицы по поверхности горизонтального режущего диска; б) скольжение снежной частицы вдоль неподвижной стенки вертикального питателя роторного снегоочистителя; в) скольжение снежной частицы вдоль вертикальной режущей полосы: где G – сила тяжести; ω – угловая скорость вращения горизонтального режущего диска; N_q – нормальная реакция горизонтального режущего диска; N_ϕ – нормальная реакция стенки вертикального питателя; $F_{тр\phi}$ – сила трения снежной частицы о горизонтальную поверхность режущего диска; $F_{тр\phi}$ – сила трения снежной частицы о поверхность стенки вертикального питателя РСО

Рассмотрим математические модели движения снежной частицы до удара и после. Для составления расчетных схем ее движения были приняты следующие допущения:

- частица сфера;
- частица скользит по горизонтальному режущему диску;
- частица скользит по вертикальной режущей полосе;
- частица скользит по кожуху вертикального питателя.

Необходимо отметить, что в соответствии с [50], для рассматриваемого случая, где допущения говорят об абсолютной симметрии, отрыва в процессе скольжения частицы по горизонтальной поверхности режущего диска не будет наблюдаться [50].

Уравнения движения снежной частицы в процессе ее скольжения по горизонтальной поверхности режущего диска вертикального питателя РСО имеют вид [9]:

$$\ddot{x}_{\phi i} = -\omega_{\phi}^2 \cdot x_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{x}_{\phi i} + \frac{N_{\phi i}}{m_i} \cdot f_{\phi} \cdot \sin\left(\operatorname{atan} \frac{x_{\phi i}}{y_{\phi i}}\right), \quad (5.24)$$

$$\ddot{y}_{\phi i} = -\omega_{\phi}^2 \cdot y_{\phi i} - 2 \cdot \omega_{\phi} \cdot \dot{y}_{\phi i} + \frac{N_{\phi i}}{m_i} \cdot f_{\phi} \cdot \cos\left(\operatorname{atan} \frac{x_{\phi i}}{y_{\phi i}}\right), \quad (5.25)$$

$$\ddot{z}_{\phi i} = \frac{N_{\phi i}}{m_i} - \frac{G}{m_i}, \quad (5.26)$$

где f_{ϕ} – коэффициент внешнего трения снега по материалу горизонтального режущего диска.

В случае контакта снежной частицы с неподвижной поверхностью вертикального питателя РСО, условие которого имеет вид:

$$x_{\phi i}^2 + y_{\phi i}^2 = R_{\phi}^2, \quad (5.27)$$

где R_{ϕ} – радиус горизонтального режущего диска.

Удар частицы о стенку, в начальной фазе характеризующийся мгновенным изменением значений проекций вектора скорости снежной частицы, v_{x0} и v_{y0} , на оси принятой системы координат, описывается коэффициентом восстановления скорости, k , снежной частицы при ударе и ее коэффициентом мгновенного трения, p . На рисунке 5.10 представлены расчетные схемы определения значений проекций скоростей снежной частицы, v_x и v_y , после удара.

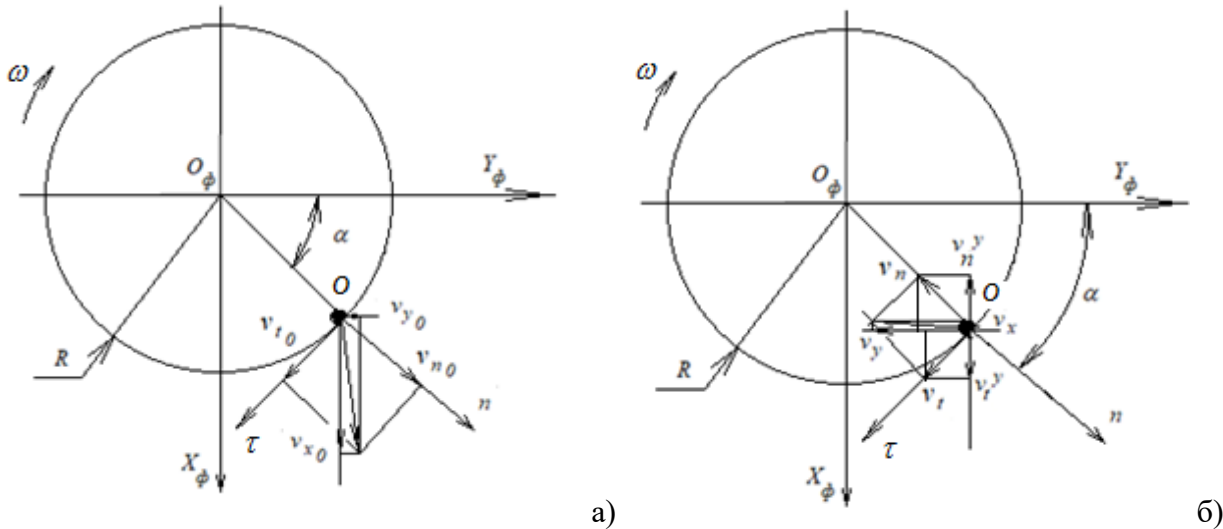


Рисунок 5.10 – Расчетные схемы определения значений проекций скоростей снежной частицы после удара о неподвижную стенку вертикального питателя, вид сверху: а) в начальной фазе удара; б) в конечной фазе удара

В общем виде проекции вектора скорости частицы в начальной фазе удара в системе координат, *онт*, имеют вид:

$$x_{\phi i}^2 + y_{\phi i}^2 = R^2, \quad (5.27)$$

$$v_{n0} = v_{x0} \cdot \sin \alpha + v_{y0} \cdot \cos \alpha, \quad (5.28)$$

$$v_{\tau 0} = v_{x0} \cdot \cos \alpha - v_{y0} \cdot \sin \alpha, \quad (5.29)$$

где

$$\alpha = \arctg \left(\frac{x_{\phi i}}{y_{\phi i}} \right).$$

Предполагаем, что в конечной фазе удара нормальная, v_n , и касательная, v_t , составляющие скорости снежной частицы изменяются скачкообразно по закону:

$$v_n = -k \cdot v_{n0},$$

$$v_t = p \cdot v_{\tau 0}.$$

В соответствии с расчетной схемой выражения новых значений проекций вектора скорости снежной частицы в системе координат, $O_\phi X_\phi Y_\phi$, будут описываться уравнениями:

$$v_n^x = -v_n \cdot \sin \alpha = k \cdot v_{n0} \cdot \sin \alpha,$$

$$v_\tau^x = -v_\tau \cdot \cos \alpha = -p \cdot v_{\tau 0} \cdot \cos \alpha.$$

$$v_n^y = -v_n \cdot \cos \alpha = k \cdot v_{n0} \cdot \cos \alpha,$$

$$v_\tau^y = v_\tau \cdot \sin \alpha = p \cdot v_{\tau 0} \cdot \sin \alpha.$$

Тогда окончательные выражения проекций скоростей частицы после окончания удара примут вид:

$$v_x = -v_n^x - v_\tau^x = -v_n \cdot \sin \alpha - v_\tau \cdot \cos \alpha = k \cdot v_{n0} \cdot \sin \alpha - p \cdot v_{\tau 0} \cdot \cos \alpha,$$

$$v_y = -v_n^y + v_\tau^y = -v_n \cdot \cos \alpha + v_\tau \cdot \sin \alpha = k \cdot v_{n0} \cdot \cos \alpha + p \cdot v_{\tau 0} \cdot \sin \alpha,$$

С учетом (5.24) и (5.25) окончательно получаем:

$$v_x = k \cdot (v_{x0} \cdot \sin \alpha + v_{y0} \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \alpha - p \cdot (v_{x0} \cdot \cos \alpha - v_{y0} \cdot \cos \alpha) \cdot \cos \alpha, \quad (5.30)$$

$$v_y = k \cdot (v_{x0} \cdot \sin \alpha + v_{y0} \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \alpha + p \cdot (v_{x0} \cdot \cos \alpha - v_{y0} \cdot \cos \alpha) \cdot \cos \alpha. \quad (5.31)$$

Уравнения, описывающие движение частицы в условия действия новой неударивающей связи – неподвижной стенки вертикального питателя, согласно [16]:

$$\ddot{x}_{\phi i} = x_{\phi i} \cdot \omega_\phi^2 - 2 \cdot \dot{x}_{\phi i} \cdot \omega_\phi - g \cdot \left(f_\phi \cdot \frac{y_{\phi i}}{R_\phi} \right) + \lambda_x \cdot \left(\frac{x_{\phi i}}{R_\phi} + f_\phi \cdot \frac{y_{\phi i}}{R_\phi} \right); \quad (5.32)$$

$$\ddot{y}_{\phi i} = y_{\phi i} \cdot \omega_\phi^2 - 2 \cdot \dot{y}_{\phi i} \cdot \omega_\phi - g \cdot \left(f_\phi \cdot \frac{x_{\phi i}}{R_\phi} \right) + \lambda_x \cdot \left(\frac{y_{\phi i}}{R_\phi} + f_\phi \cdot \frac{x_{\phi i}}{R_\phi} \right); \quad (5.33)$$

$$\lambda_z = -g, \quad (5.34)$$

где

$$\lambda_x \left(R_\phi + 2 \cdot f_\phi \cdot \frac{x_{\phi i} \cdot y_{\phi i}}{R_\phi} \right) = -\dot{x}_{\phi i}^2 \cdot \left(\frac{R_\phi^2}{y_{\phi i}^2} \right) - \omega_\phi^2 \cdot R_\phi^2 + 2 \cdot g \cdot f_\phi \cdot \frac{x_{\phi i} \cdot y_{\phi i}}{R_\phi}. \quad (5.35)$$

Исходные данные, на основании которых проводились вычисления:

- радиус горизонтального режущего диска, $R_\phi = 0,3$ м;

- угловая скорость вращения рабочего органа вертикального питателя роторного снегоочистителя, $\omega_\phi = 18$ рад/с;
- радиус снежной частицы, $r_{ci} = 0,01$ м;
- коэффициент внешнего трения снежной частицы по поверхности горизонтального режущего диска, $f_q = 0,03$ [7];
- коэффициент внешнего трения снежной частицы по неподвижной стенке вертикального питателя, $f_\phi = 0,03$ [7];
- коэффициент мгновенного трения снежной частицы при ударе, $p = 0,025$ [7];
- коэффициент восстановления нормальной к поверхности неподвижной стенки питателя скорости в точке контакта при ударе, k , принимал следующие значения $k = 0,5; 0,58; 0,6$.

В качестве начальных условий были приняты следующие значения:

- координаты положения снежной частицы в момент времени, $t = 0$, по оси $O_\phi X_\phi$, $x = 0,19$ м, по оси $O_\phi Y_\phi$, $y = 0,19$ м;
- проекции вектора скорости снежной частицы в момент времени, $t = 0$, на оси $O_\phi X_\phi$, $v_x = 0,19$ м, по оси $O_\phi Y_\phi$, $v_y = 0,19$ м;
- шаг вычислений по времени, $\Delta t = 0,001$ с.

В результате решения с использованием уравнений описывающих удар о неподвижную стенку при постоянном значении шага вычислений по времени, Δt , частица постепенно проникает за неподвижную стенку вертикального питателя (рисунок 5.11), что невозможно в реальной системе.

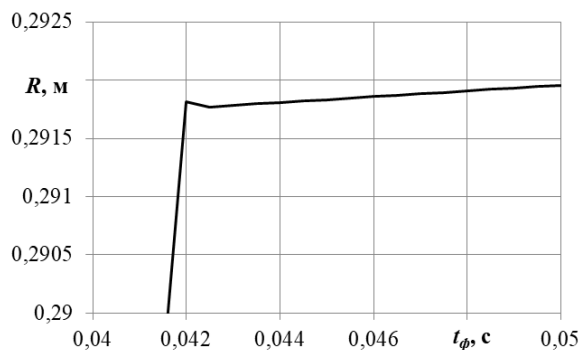


Рисунок 5.11 – Изменение радиуса положения частицы в зависимости от времени после контакта с неподвижной стенкой вертикального питателя

Одним из возможных вариантов получения таких результатов численного решения (5.25), (5.26), (5.27) является несоответствие шага вычислений, Δt . В первом приближении перемещения и скорости могут быть представлены следующими соотношениями:

$$v_x = v_0 + a_x \cdot \Delta t, \quad (5.36)$$

$$x_{\phi i} = x_{\phi 0} + v_0 \cdot \Delta t + \frac{a_x \cdot \Delta t^2}{2}. \quad (5.37)$$

В момент удара значение скорости частицы скачкообразно меняет свой знак на противоположный. Соответственно на следующей итерации вычислений, значения скоростей и перемещений определяются так же выражениями (5.36), (5.37). В зависимости от значений слагаемых, значения которых получены на предыдущей итерации и шага численного интегрирования по времени, Δt , определяется новое значение положения частицы. Произведем оценку влияния, Δt , на текущее положение частицы. Для этого рассмотрим выражение приращения по перемещению, которое из (5.37) имеет вид:

$$\Delta x_{\phi i} = v_0 \cdot \Delta t + \frac{a_x \cdot \Delta t^2}{2}. \quad (5.38)$$

Очевидно, чтобы обеспечить непроницаемость границы, для частицы после удара, необходимо чтобы $\Delta x_{\phi i} \leq 0$:

$$v_0 \cdot \Delta t + \frac{a_x \cdot \Delta t^2}{2} \leq 0. \quad (5.39)$$

Из (5.39) выражаем шаг численного интегрирования:

$$\Delta t \cdot \left(v_0 + \frac{a_x \cdot \Delta t}{2} \right) \leq 0, \quad (5.40)$$

поскольку, Δt , не может быть меньше нуля, соответственно:

$$\Delta t_x \leq \frac{2 \cdot v_0}{a_x}. \quad (5.41)$$

Аналогичные выражения справедливы для проекции ускорения на ось $O_\phi Y_\phi$:

$$\Delta t_y \leq \frac{2 \cdot v_0}{a_y}.$$

Рассмотрим численное решение удара, возникающее при движении снежной частицы в питателе, при описанных выше исходных данных. Результаты вычислений при различных, Δt , представлены на рисунках 5.12, 5.13.

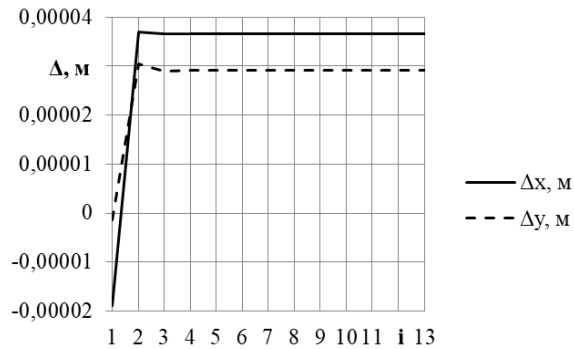


Рисунок 5.12 – Приращение по осям $O_\phi X_\phi$, $O_\phi Y_\phi$ при ударе снежной частицы о неподвижную поверхность, при $\Delta t = 0,0005$ с

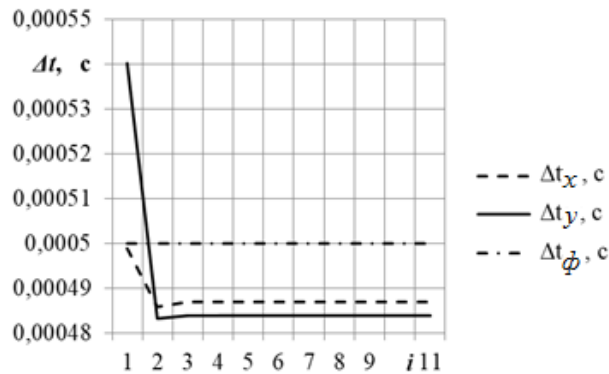


Рисунок 5.13 – Максимальное значение шага численного интегрирования по времени, Δt , по условию (5.37), где Δt_ϕ – фиксированный шаг по времени, при котором проводились вычисления

Из рисунка 5.13 следует, что фактическое значение шага численного интегрирования по времени превышает допустимые значения по условию (5.41), что приводит к «проникновению» частицы через неподвижную обечайку вертикального питателя РСО, что на практике невозможно, т.к. приращения перемещений как по оси $O_\phi X_\phi$, так и по оси $O_\phi Y_\phi$ являются положительными (см. рисунок 5.12).

Для случая обеспечения соблюдения условия (5.41) при ударе снежной частицы о неподвижную стенку вертикального питателя РСО, при тех же начальных условиях, получаем следующие изменения в решении уравнений

движения снежной частицы (5.24), (5.25), (5.26): характер изменения величины шага численного интегрирования по времени, Δt , представлен на рисунке 5.14; на рисунке 5.15, представлено изменение величины абсолютной скорости снежной частицы, $V_{абс}$; на рисунке 5.16, характер изменения приращения расстояния положения частицы от оси вращения рабочего органа вертикального питателя в полярной системе координат связанной с осью вращения вертикального питателя, где:

$$\Delta R_{\phi i} = \sqrt{\Delta x_{\phi i}^2 + \Delta y_{\phi i}^2}.$$

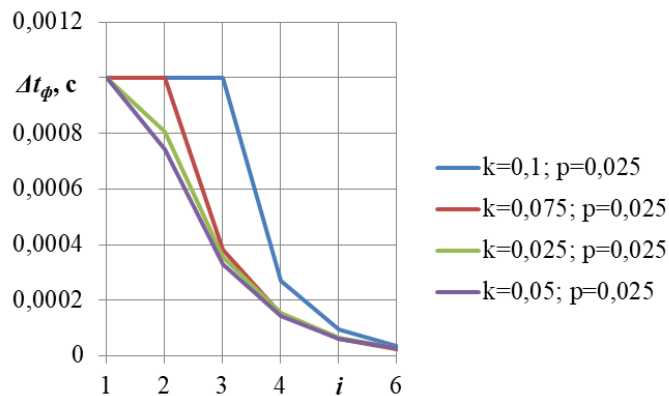


Рисунок 5.14 – Зависимость изменения величины шага численного интегрирования по времени, Δt , от числа итераций при которых соблюдается условие (4)

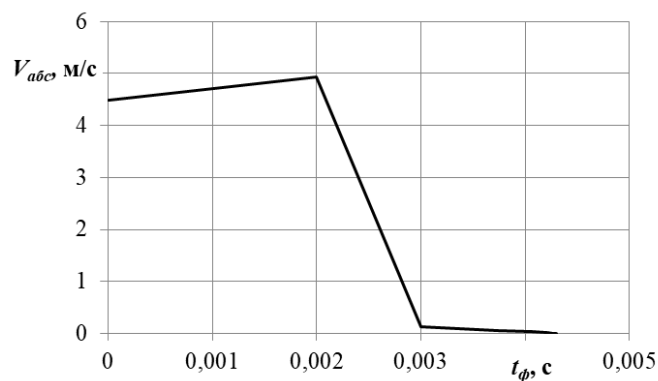


Рисунок 5.15 – Зависимость изменения величины абсолютной скорости снежной частицы, $V_{абс}$, от времени, t

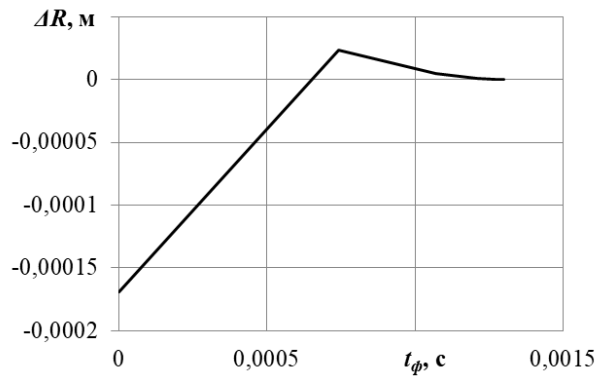


Рисунок 5.16 – Приращение расстояния между положением частицы и осью вращения рабочего органа вертикального питателя, от времени, t

Из рисунка 5.16 следует, что процесс «проникновения» частицы сквозь неподвижную стенку остановлен, при этом наблюдается торможение частицы и стремление величины ее абсолютной скорости к нулю. Таким образом, возникает эффект прилипания снежной частицы к неподвижной стенке вертикального питателя.

В случае изменения значения коэффициента восстановления скорости при ударе, $k=0,75$, частица отскакивает от поверхности вертикального питателя и движется в обратном направлении (рисунок 5.17).

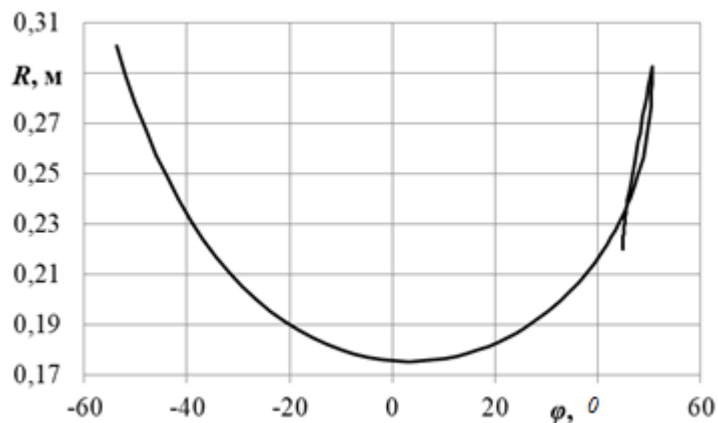


Рисунок 5.17 – Траектория движения снежной частицы при величине $k=0,75$, в полярной системе координат

На рисунке 5.18, представлены траектории движения снежной частицы по поверхности горизонтального режущего диска вертикального питателя роторного снегоочистителя при значениях $k=0,75$, $0,58$ и $0,5$.

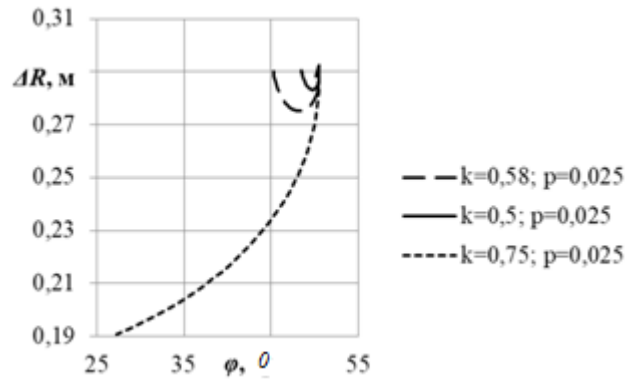


Рисунок 5.18 – Траектория движения снежной частицы при различных значениях k , в полярной системе координат

На рисунке 5.19 виден отскок снежной частицы с ее последующим прилипанием к неподвижной стенке вертикального питателя, при значениях $k=0,58$ и $0,5$.

В связи с этим возникает необходимость определения условия скольжения по второй связи (неподвижной стенки) и отсутствие явления удара, т.е. условия, когда неудерживающая связь становится удерживающей.

Закон сохранения импульса, \vec{S} , при ударе записывается как разница скоростей снежной частицы до удара, v_1 , и после, v_2 :

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \frac{\vec{S}}{m_i}. \quad (5.42)$$

А так же как произведение действующей силы на момент времени:

$$\frac{\vec{S}}{m_i} = \frac{\vec{F}}{m_i} \cdot \Delta t. \quad (5.43)$$

Соответственно, единственной силой является сила нормальной реакции неподвижной обечайки вертикального питателя, $N_{\phi i}$, значение которой однозначно определяется из уравнения (5.35).

Численное решение уравнений движения снежной частицы, носит дискретный характер с определенным шагом по времени, Δt . Иначе говоря, в результате численного решения уравнений движения определяются значения перемещений, скоростей снежной частицы за интервал, Δt . Что касается значений изменений скорости частицы в момент удара, то они происходят мгновенно через интервал

времени, Δt . Рассмотрим, как изменяются значения силы нормальной реакции в моменты времени, когда выполняется условие контакта частицы с неподвижной обечайкой вертикального питателя и скорость изменяется скачкообразно. Результаты вычислений проекций импульсов силы нормальной реакции, S_N , вертикальной режущей полосы на оси $O_\phi X_\phi$, $O_\phi Y_\phi$, по уравнению (5.35) представленных в соответствии с правой частью выражения (5.43), и величина импульса, S , вычисленная по (5.43), представлены на рисунке 5.19.

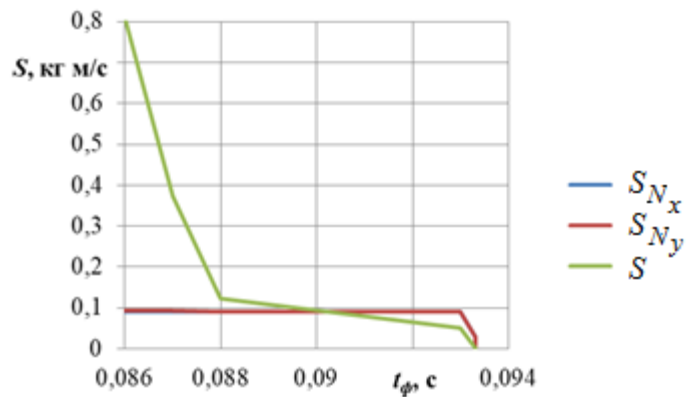


Рисунок 5.19 – Значения мгновенных изменений скорости снежной частицы в момент удара и значений силы нормальной реакции неподвижной обечайки вертикальной фрезы в момент контакта частицы с этой поверхностью

Графики имеют одну общую точку пересечения, после которой величина импульса от силы нормальной реакции неподвижной обечайки вертикальной фрезы, $N_\phi \Delta t$, превышает значение ударного импульса. Таким образом, при условии постоянного значения коэффициента восстановления скорости при ударе, k , принимаем, что с этого момента времени движение частицы описывается уравнениями движения, без учета явления удара. Сказанное выше может быть записано в виде:

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 < \frac{\vec{F}}{m_i} \cdot \Delta t. \quad (5.44)$$

На рисунке 5.20 представлена зависимость абсолютной скорости частицы, при которой величина импульса нормальной реакции стенки вертикального питателя,

$N_{\phi i} \Delta t$, больше изменения скорости частицы при ударе, от коэффициента восстановления скорости при ударе, k .

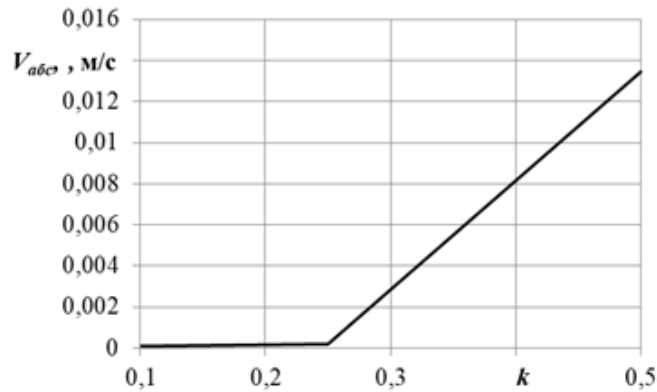


Рисунок 5.20 – Зависимость абсолютной скорости частицы, при которой величина импульса нормальной реакции стенки вертикального питателя, $N_{\phi i} \Delta t$, больше изменения скорости частицы при ударе, от коэффициента восстановления скорости при ударе, k

Из графика следует, что с увеличением значения коэффициента восстановления скорости при ударе, k , абсолютная скорость частицы при которой наблюдается превышение импульса, $N_{\phi i} \Delta t$, возрастает. Аппроксимирующее уравнение, описывающее данное поведение системы, при заданных численных значениях основных параметров снежной частицы и вертикального питателя, имеет вид:

$$V_{абс} = 0,0527 \cdot k^{4,296}.$$

Последующее увеличение значения, k , приводит к отскоку и обратному движению снежной частицы по горизонтальной поверхности режущего диска.

Алгоритм определения движения снежной частицы в условиях наличия одной неударивающей связи и учетом ее удара представлен на рисунке 5.21.

Теоретическая мощность, N_i , затрачиваемая на транспортирование снежной частицы вдоль вертикальной режущей полосы, в соответствии с положениями п. 3.1, определяется по формуле:

$$N_i = [N_{\phi i} \sqrt{x_{\phi}^2 + y_{\phi}^2} + N_{\phi i} |R_{\phi} - r_{\phi i}| \cdot f_{\phi} + f_{\phi} g \cdot |R_{\phi} - r_{\phi i}|] J \omega_{\phi}. \quad (5.45)$$

В случае скольжения вдоль кожуха под действием вертикальной режущей полосы в область загрузочного окна, с учетом принятых выше допущений

теоретическая затрачиваемая мощность, N_i , в таком случае определяется выражением:

$$N_i = [N_{\phi i} |R_{\phi} - r_{\phi i}| \cdot f_{\phi} + f_{\phi} g \cdot |R_{\phi} - r_{\phi i}|] J \omega_{\phi}. \quad (5.46)$$

Значение затрачиваемой мощности, определяемое выражением (5.46) является постоянным.

Была произведена оценка энергоэффективности транспортирования снежной частицы вдоль вертикальной режущей полосы.

Варьируемыми параметрами в данном исследовании являлись: угловая скорость вращения ротора, ω_{ϕ} ; угол наклона, β , образующей вертикальной режущей полосы относительно оси $O_{\phi}X_{\phi}$ и начальное вертикальной режущей полосы, φ . Угловая скорость вращения ротора варьировалась в диапазоне, $\omega_{\phi}=10...40$ рад/с, с шагом варьирования, $h_{\omega}=10$ рад/с. Угол наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы относительно оси $O_{\phi}X_{\phi}$, варьировался в диапазоне, $\gamma = 10...80^{\circ}$, с шагом варьирования, $h_{\gamma}=10^{\circ}$. Внутренний радиус, r_{ϕ} , вертикальной фрезы варьировался в диапазоне $r_{\phi} = 0,15...0,25$ м, с шагом, $r_{\phi}=0,05$ м.

Фиксируемыми параметрами являлись:

- наружный радиус вертикальной фрезы, $R_{\phi}=0,3$ м;
- радиус частицы, $r_{\phi}=0,02$ м;
- коэффициент трения $f_{\phi}=0,03$.

Начальные условия в момент времени, $t=0$, принимались равными:

- $v_x=0$;
- $v_y=0$;
- расстояние от оси вращения вертикальной фрезы до центра масс частицы, $R_i=0,237$ м;
- радиус загрузочного окна, $R_p = 0,3$ м;
- высота установки горизонтального режущего диска относительно основания, $b_p=0,1$ м.

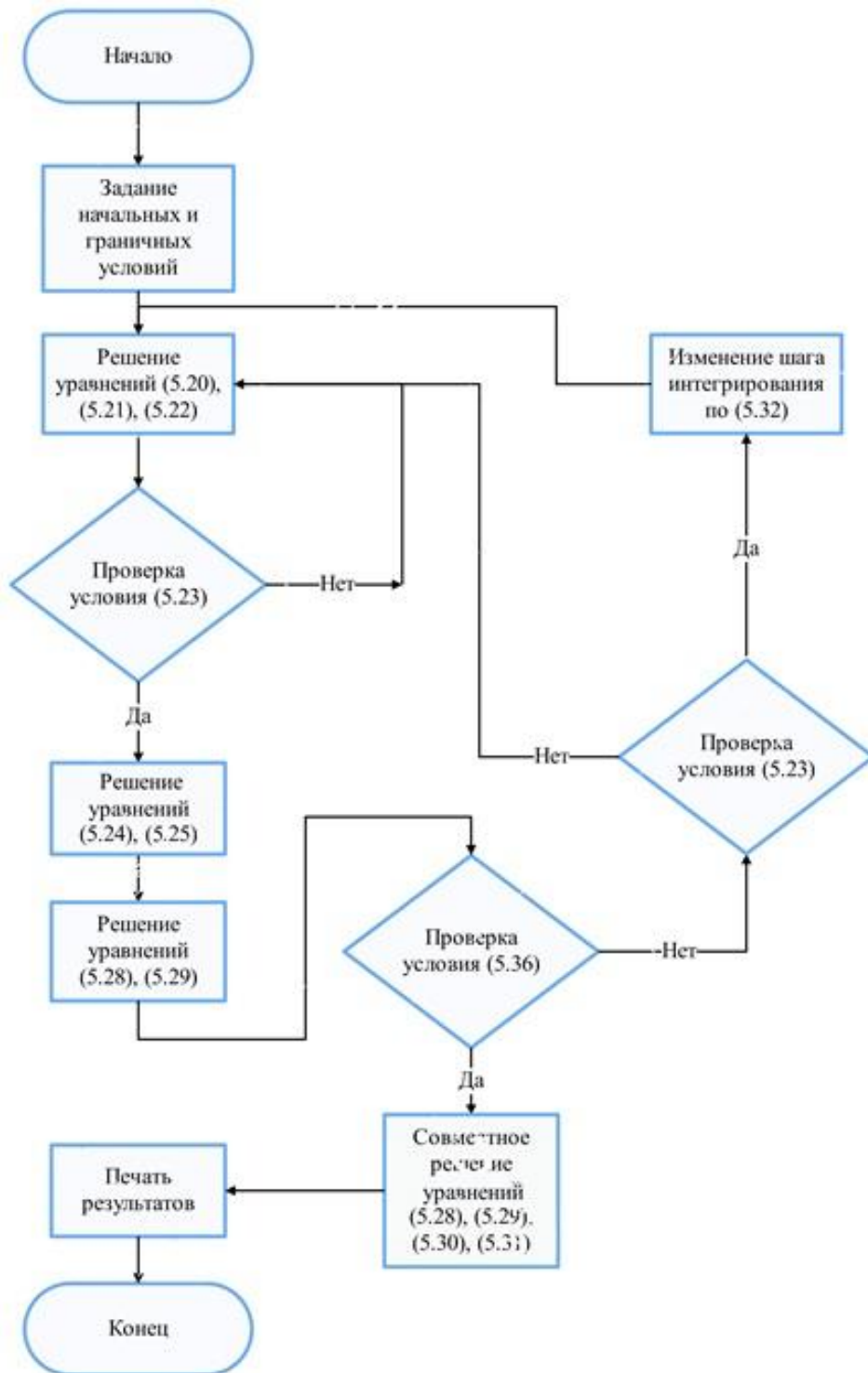


Рисунок 5.21 – Алгоритм перехода от уравнений удара к уравнениям движения с дополнительной связью

На рисунке 5.22 представлена конструктивная схема вертикального питателя при транспортировании снежной частицы вдоль вертикальной режущей полосы.

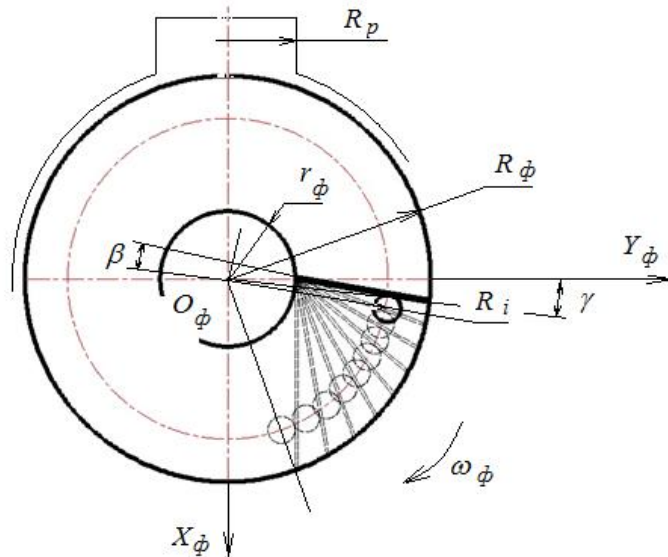


Рисунок 5.22 – Конструктивная схема вертикального питателя при транспортировании снежной частицы вдоль вертикальной режущей полосы

В результате имитационного моделирования, была получена зависимости изменения средней мощности, N_{cp} , необходимой для транспортирования снежной частицы вдоль вертикальной режущей полосы, в зависимости от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_ϕ , для характерного размера транспортируемых частиц, $r_i=0,02$ м, при внутреннем радиусе $r_\phi=0,15$ м (рисунок 5.23).

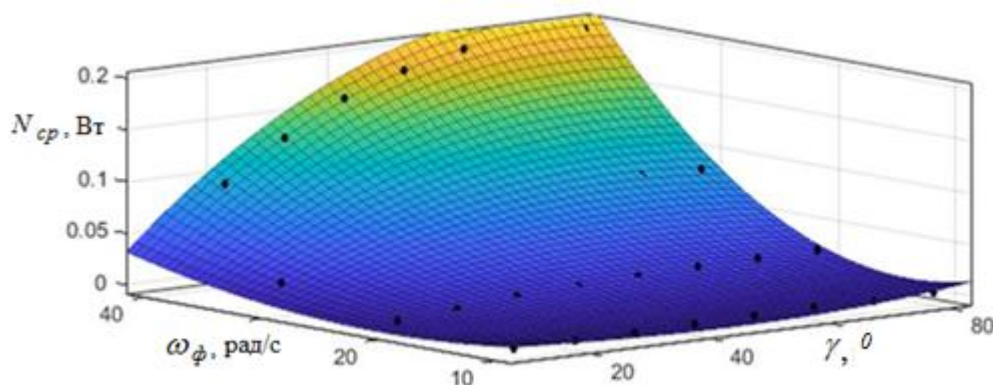


Рисунок 5.23 – Средняя мощность в зависимости от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_ϕ , для характерного размера транспортируемых частиц, $r_{ci}=0,02$ м, при внутреннем радиусе $r_\phi=0,15$ м

Выражение полиномиальной аппроксимации средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от, γ , и, ω_ϕ , при транспортировании снежной массы

с характерным размером частиц, $r_{ci}=0,02$ м, и внутреннем радиусе $r_{\phi}=0,15$ м имеет вид:

$$N_{cp} = 0,03156 - 0,001088 \cdot \gamma - 0,002989 \cdot \omega_{\phi} + 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma^2 + 5,75 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\phi} \cdot \gamma + 5,05 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\phi}^2 + 3,88 \cdot 10^{-8} \cdot \gamma^3 - 1,38 \cdot 10^{-6} \omega_{\phi} \cdot \gamma^2 + 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma \cdot \omega_{\phi}^2 \quad (5.47)$$

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

Для случая транспортирования снежных частиц с характерным размером, $r_{ci}=0,02$ м, и внутреннем радиусе $r_{\phi}=0,2$ м, выражение полиномиальной аппроксимации средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от, γ , и, ω_{ϕ} , описывается следующим выражением:

$$N_{cp} = 0,0236 - 7,13 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma - 0,0038 \cdot \omega_{\phi} - 7,82 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma^2 + 4,98 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_{\phi} \cdot \gamma + 0,000124 \cdot \omega_{\phi}^2 \quad (5.48)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,993$. Описываемая уравнением (5.48) поверхность изображена на рисунке 5.24.

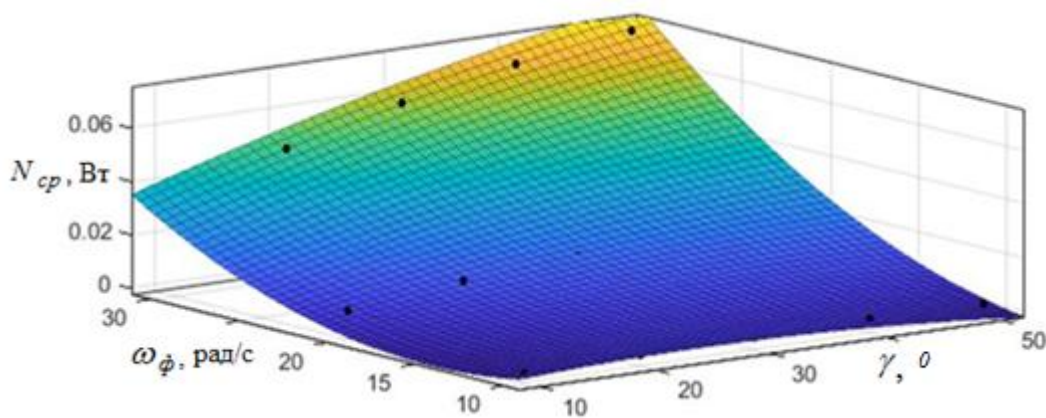


Рисунок 5.24 – Средняя мощность в зависимости от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_{ϕ} , для характерного размера транспортируемых частиц, $r_{ci}=0,02$ м

При внутреннем радиусе $r_{\phi}=0,2$ м, выражение полиномиальной аппроксимации средних значений затрат мощности, N_{cp} , в зависимости от, γ , и, ω_{ϕ} , имеет вид:

$$N_{cp} = 0,03352 - 0,00297 \cdot \gamma - 0,00273 \cdot \omega_{\phi} + 8,97 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma^2 + 0,0001 \cdot \omega_{\phi} \cdot \gamma + 8,79 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\phi}^2 - 7,54 \cdot 10^{-7} \cdot \gamma^3 - 1,77 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_{\phi} \cdot \gamma^2 - 4,91 \cdot 10^{-7} \cdot \gamma \cdot \omega_{\phi}^2 \quad (5.49)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,96$.

На рисунке 5.25 представлена поверхность, описываемая уравнением (5.49).

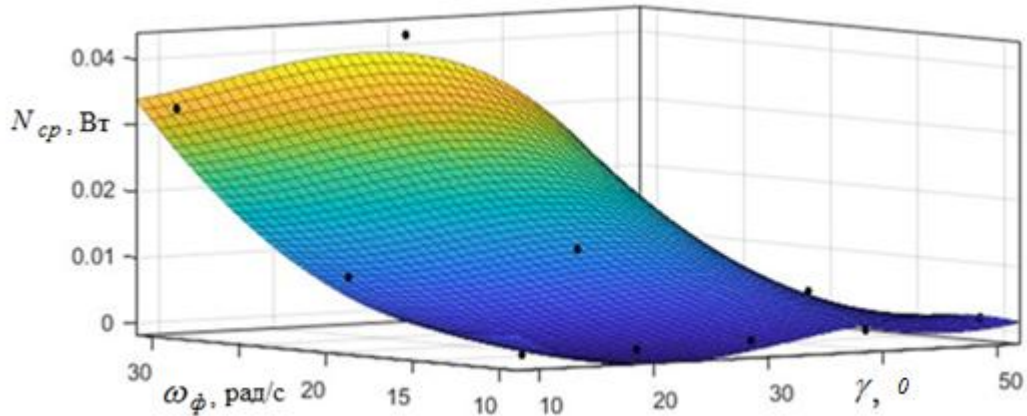


Рисунок 5.25 – Средняя мощность в зависимости от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_{ϕ} , для характерного размера транспортируемых частиц, $r_{чi}=0,02$ м

Выражение полиномиальной аппроксимации значений производительности, Π , в зависимости от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_{ϕ} , для характерных размеров транспортируемых частиц, $r_{чi}=0,02$ м, и внутреннем радиусе $r_{\phi}=0,15$ м, имеют вид:

$$\begin{aligned} \Pi = & 0,6646 - 0,02347 \cdot \gamma - 0,0089 \cdot \omega_{\phi} + 0,00044 \cdot \gamma^2 - 2,98 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_{\phi} \cdot \theta + \\ & + 0,00117 \cdot \omega_{\phi}^2 - 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma^3 + 8,94 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma^2 + 8,94 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_{\phi} \cdot \gamma^2 - \\ & - 1,99 \cdot 10^{-5} \omega_{\phi}^2 \cdot \theta \end{aligned} \quad (5.50)$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,95$.

Поверхность, описываемая уравнением (5.50) с точками значений производительности, по которым проводилась полиномиальная аппроксимация, представлена на рисунке 5.26.

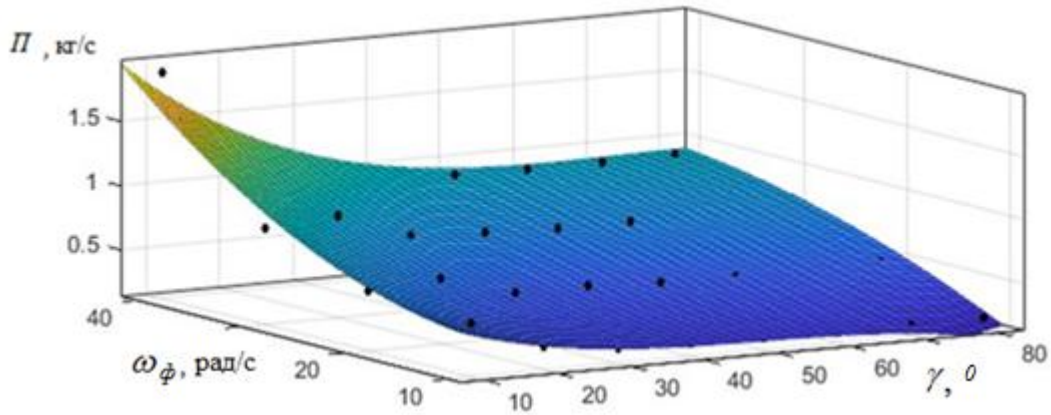


Рисунок 5.26 – Производительность, Π , в зависимости от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_ϕ , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{ci}=0,02$ м, и внутреннем радиусе $r_\phi=0,15$ м

При значениях внутреннего радиуса $r_\phi=0,2$ м и $r_\phi=0,25$ м, полиномиальная аппроксимация значений производительности, Π , в зависимости от угла наклона, φ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_ϕ , для характерного размера транспортируемой частицы, $r_{ci}=0,02$ м, описываются выражениями:

$$\begin{aligned} \Pi_{cp} = & -0,3559 - 0,007459 \cdot \gamma + 0,0582 \cdot \omega_\phi + 0,00015 \cdot \gamma^2 - 0,00017 \cdot \omega_\phi \cdot \theta - \\ & - 0,00072 \cdot \omega_\phi^2 \end{aligned} \quad (5.51)$$

и при $r_\phi=0,25$ м:

$$\begin{aligned} \Pi = & 0,3167 - 0,00747 \cdot \gamma - 0,016 \cdot \omega_\phi + 0,000192 \cdot \gamma^2 + 0,000363 \cdot \omega_\phi \cdot \theta + \\ & + 0,000477 \cdot \omega_\phi^2 - 1,757 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma^3 - 2,837 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_\phi \cdot \gamma^2 - 6,532 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_\phi^2 \cdot \theta \end{aligned} \quad (5.52)$$

Величины достоверности аппроксимации, соответственно, составили $R^2=0,983$ и $R^2=0,914$.

Поверхности, описываемые уравнениями (5.51), (5.52) с точками значений производительности, по которым проводилась полиномиальная аппроксимация, представлены на рисунках 5.27 и 5.28, соответственно.

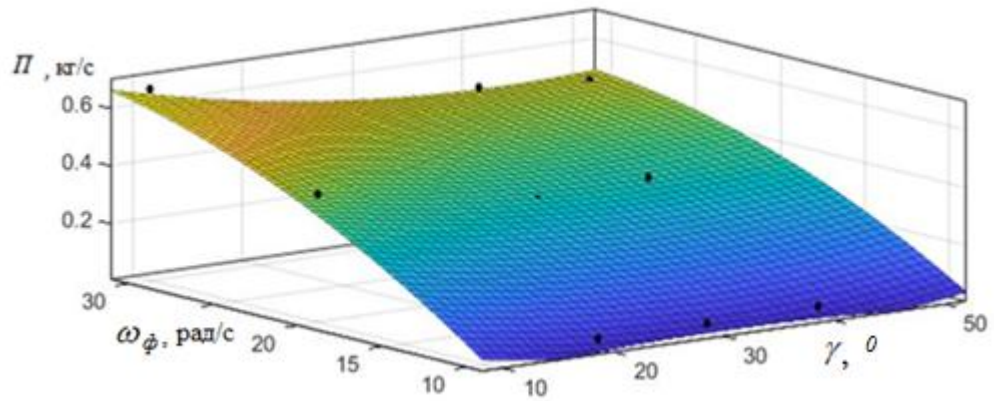


Рисунок 5.27 – Производительность, P , в зависимости от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_ϕ , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{ci}=0,02$ м, и внутреннем радиусе $r_\phi=0,2$ м

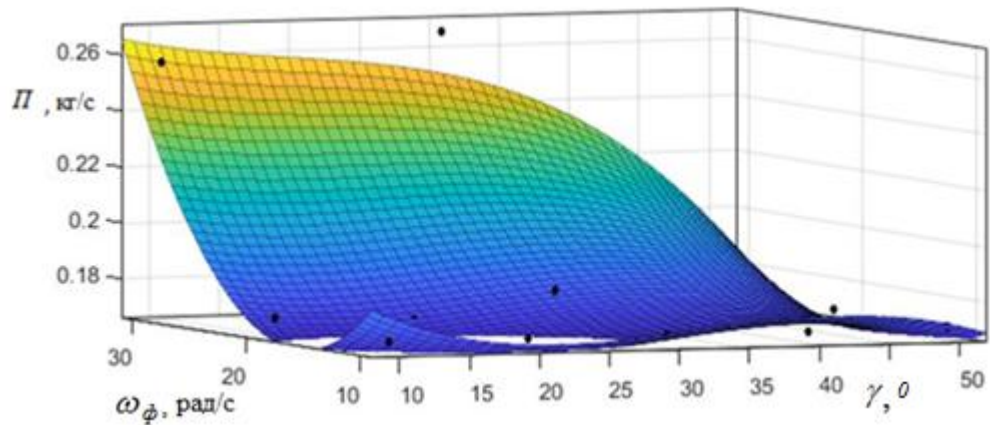


Рисунок 5.28 – Производительность, P , в зависимости от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_ϕ , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_{ci}=0,02$ м, и внутреннем радиусе $r_\phi=0,25$ м

На картограммах 5.29, 5.30, 5.31 представлены зависимости удельных энергозатрат, NP , от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_ϕ , при характерном размере транспортируемой частицы снежной массы, $r_{ci}=0,02$ м, и внутреннем радиусе $r_\phi=0,15$ м, $r_\phi=0,2$ м, $r_\phi=0,25$ м, соответственно.

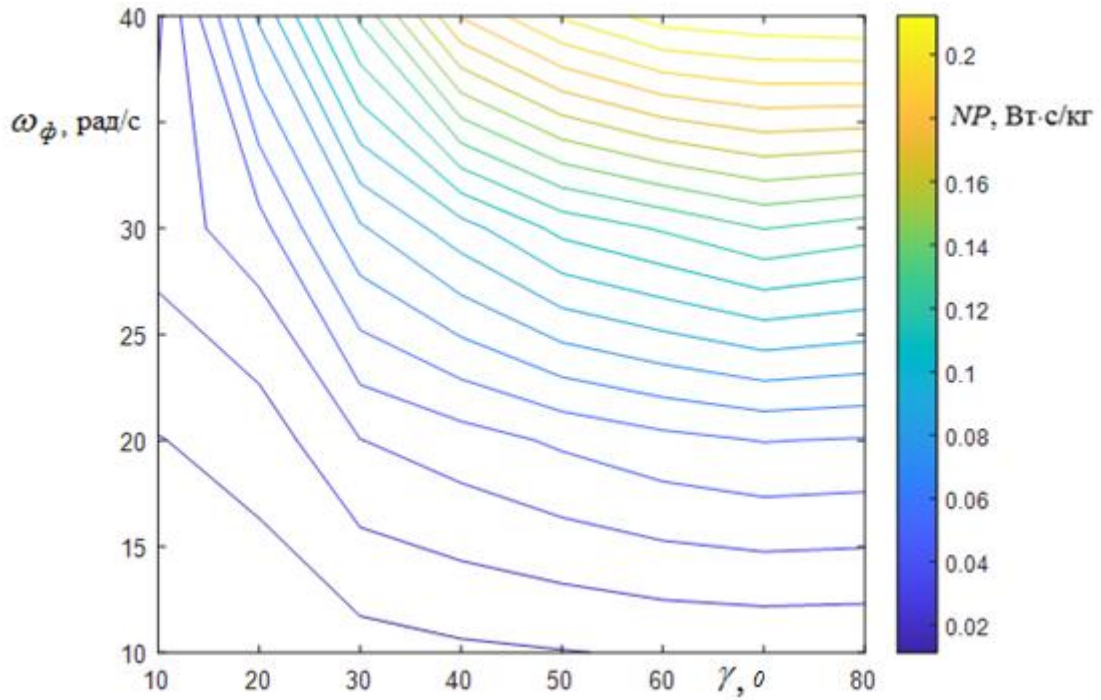


Рисунок 5.29 – Картограмма удельных энергозатрат, NP , от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_ϕ , внутреннем радиусе $r_\phi=0,15$

м

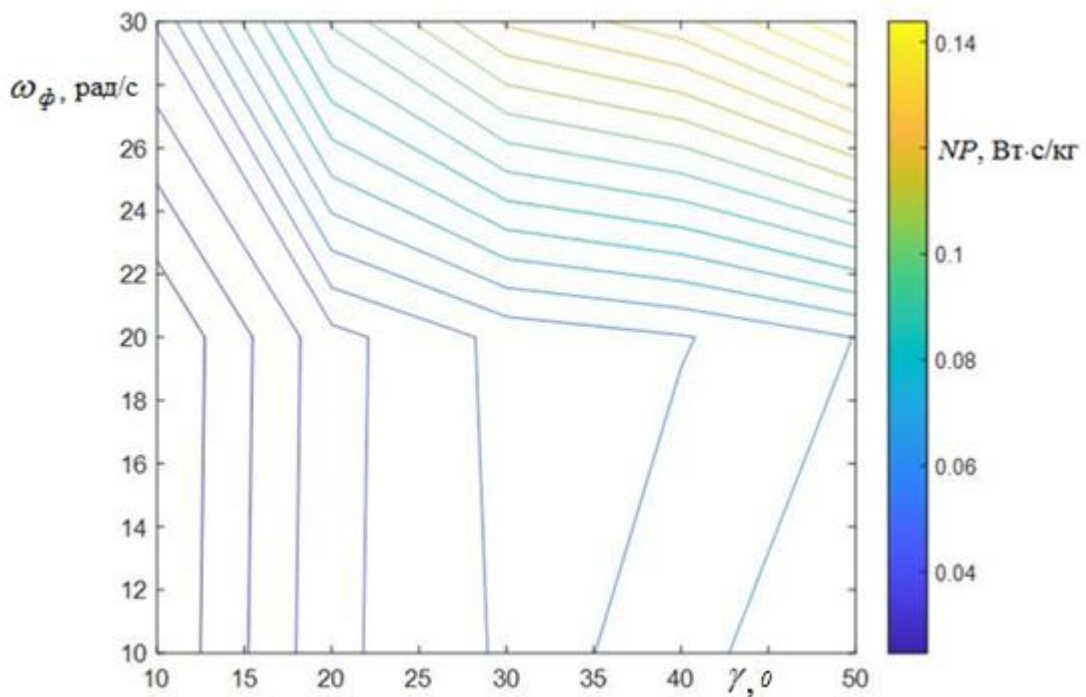


Рисунок 5.30 – Картограмма удельных энергозатрат, NP , от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения ω_ϕ , внутреннем радиусе $r_\phi=0,2$ м

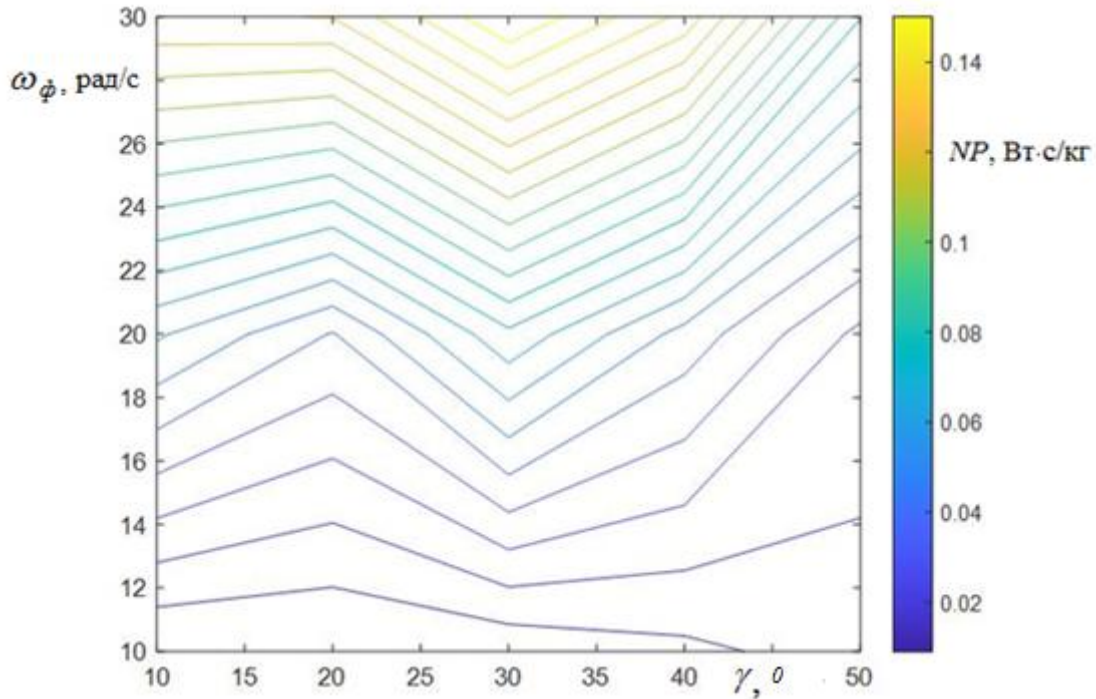


Рисунок 5.31 – Картограмма удельных энергозатрат, NP , от угла наклона, γ , образующей вертикальной режущей полосы и угловой скорости вращения, ω_ϕ , внутреннем радиусе $r_\phi = 0,25$

м

Из рисунков 5.23, 5.24 следует возрастание потребляемой мощности при увеличении угловой скорости вращения, ω_ϕ , вертикальной фрезы и угла наклона, φ , горизонтальной образующей вертикальной режущей полосы в начальный момент движения снежной частицы. Из рисунка 5.25 следует, что существует область углов наклона, $\gamma = 25 \dots 35^\circ$, горизонтальной образующей вертикальной режущей полосы в начальный момент движения снежной частицы, при которых потребляемая мощность на транспортирование частицы вдоль вертикальной режущей полосы максимальна. Величина производительности, очевидно, быстро возрастает с увеличением угловой скорости вращения, что обусловлено нелинейным ростом центробежной силы инерции. Начиная с угловой скорости вращения, $\omega_\phi = 14$ рад/с, вертикальной фрезы, минимальное значение удельных энергозатрат, NP , при прочих равных условиях обеспечивается при угле наклона горизонтальной образующей вертикальной режущей полосы в начальный момент движения снежной частицы в диапазоне, $\gamma = 25 \dots 35^\circ$. При меньших значениях, ω_ϕ , величина угла, γ , уменьшается до 20° . Таким образом, процесс вырезания снежной

$R_p = 0,3$ м и высоте установки горизонтального режущего диска относительно основания, $b_p=0,1$ м, пройденный путь составил, 0,668 м.

Соответственно, наблюдается практически 5% сокращение пути, который проходит снежная частица от момента захвата до границы загрузочного окна в вертикальном питателе.

Для дальнейшего подтверждения адекватности описанной математической модели работы вертикального питателя необходимо произвести теоретическую оценку затрат мощности на работу вертикального питателя РСО. Воспользуемся методикой теоретического определения мощности, N_c , затрачиваемой на вырезание снежной массы из снежного массива, описанной в [51, 111]. Согласно, [51], необходимая мощность представляет собой сумму мощностей, затрачиваемых на внедрение поверхности вертикальной режущей полосы в снежный массив, N_g , отделения снежной стружки, N_o , придание вырезанной снежной массе начальной скорости, N_n , и транспортирование вырезанной снежной массы в область загрузочного окна, N_m .

Мощность, N_g , затрачиваемая на внедрение вертикальной режущей полосы обусловлены действием силы, P_∂ , на площадку деформирования снежного массива и силы трения, $P_{mp\partial}$, вызванной действием силы, P_∂ . Максимальное значение этой силы определяем по формуле [51, 111]:

$$P_\partial = F_\partial \cdot S^{0,6} \cdot 4,1 \cdot \rho^2 \cdot \sqrt{1+|t|},$$

где ρ – плотность снега, г/см³; t – абсолютная температура снега, °С; S – глубина вдавливания, см, F_∂ – площадь вдавливания.

Глубину вдавливания определяем по формуле:

$$S = V_{nep} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \omega_\phi.$$

При температуре снега $t = -10^\circ\text{C}$, и плотности $\rho = 500$ кг/м³, поступательной скорости РС, $V_{nep} = 0,3$ м/с, угловой скорости вращения вертикального питателя, $\omega_\phi = 20$ рад/с, толщине снежного массива, $h = 0,15$ м, максимальное значение силы вдавливания составило, $P_\partial = 25689,04$ Н. Соответственно, $P_{mp\partial} = 770,67$ Н.

Мощность, N_{ϵ} , как работа сил, P_{δ} , и, $P_{тр\delta}$, на участке вдавливания за время поворота вертикального питателя, равно 12,14 Вт.

Сила резания, P_p , имеет вид [51]:

$$P_p = F_{\delta} \cdot b_s^{0,4} \cdot 0,7 \cdot \rho^2 \cdot \sqrt{1+|t|},$$

где b_s – толщина вырезаемой снежной стружки.

Соответственно, $P_p = 293,36$ Н. Сила трения будет равна, $P_{mpp} = 14,67$ Н.

Мощность, N_o , как работа сил, P_p , и, P_{mpp} , на участке вырезания снежной стружки за время поворота вертикального питателя, равно 5,7 Вт.

Мощность, затрачиваемая на придание скорости вырезанной снежной массе, в соответствии с [51], составит, $N_n = 0,16$ Вт.

Мощность, N_m , затрачиваемая на транспортирование вырезанной снежной массы, определялась по формуле (5.45).

Результаты вычислений соответствующих значений мощностей представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Расчетные значения мощностей затрачиваемых на работу вертикального питателя

Параметр	Значение мощностей, Вт
N_{ϵ}	12,14
N_o	5,7
N_n	0,16
N_m	1,25
N_c	19,25

5.4. Оценка эффективности работы перспективной модели роторного снегоочистителя

Проведенные в п. 5.1 теоретические исследования показали, что питатель с вертикальной осью вращения обеспечивает повышение энергоэффективности процесса транспортировки снежной массы до 40%.

Для подтверждения адекватности математической модели и проверки работоспособности предложенного инженерного решения были проведены экспериментальные исследования.

Основными целями данных экспериментальных исследований являлись: подтверждение адекватности математической модели новой перспективной конструкции питателя РСО, оценка эффективности работы вертикального и горизонтального питателей РСО в зависимости от их технологических параметров.

Для оценки работоспособности был изготовлен прототип предлагаемой модели энергоэффективного рабочего органа РСО (рисунок 5.33). Основные геометрические размеры, формирующие конструктивный образ 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, $r = 0,06$ м;
- ширина захвата рабочего органа, $B = 0,23$ м;
- радиус загрузочного окна, $R_z = 0,085$ м.

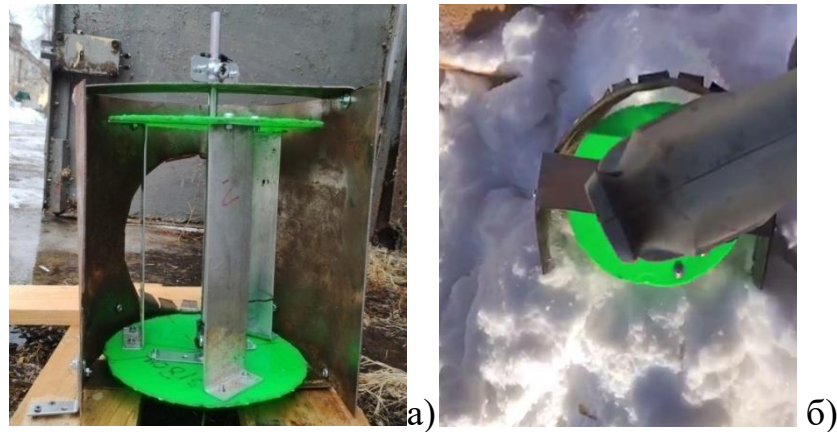


Рисунок 5.33 – Прототип перспективного рабочего органа РСО: а) общий вид; б) вид сверху в процессе работы

Данный прототип был установлен на раму, обеспечивающую поступательное движение рабочего органа. В процессе экспериментальных исследований осуществлялась видеорегистрация работы вертикальной фрезы рабочего органа в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Выходными параметрами являлись: количество транспортируемого материала, M , кг, поступившего в область загрузочного окна питателя РСО; потребляемая приводом фрезы питателя мощность, N , Вт; время, затрачиваемое, на вырезание и транспортирование в область загрузочного окна материала фрезой питателя, t , с. Варьируемыми параметрами являлись угловая скорость вращения фрезы питателя, ω_f , рад/с, поступательная скорость питателя, V_f , м/с.

Средства измерений, используемые при проведении экспериментальных исследований, включали в себя:

- линейка металлическая, цена деления, $\Delta_1=0,001\text{м}$;
- лазерный дальномер, погрешность измерений, $\Delta_2=\pm 0,003\text{м}$;
- измеритель мощности, погрешность измерений, $\Delta_3=0,1\text{Вт}$;
- весы электронные, погрешность измерений, $\Delta_4=0,0005\text{ кг}$;
- камера с возможностью ускоренной съемки.

В качестве привода фрезы питателя использовался электрический мотор мощностью 0,8 кВт.

Натурные испытания предлагаемой конструкции (см. рисунок 5.33) и питателя роторного снегоочистителя проводились, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 23080-78 «Снегоочистители роторные. Правила приемки и методы испытаний».

На первом этапе проведения экспериментальных исследований, на подвижном основании формировалась призма транспортируемого материала с известными геометрическими размерами (рисунок 5.34), причем, толщина массива транспортируемого материала, h , составляла треть диаметра фрезы горизонтального питателя и высоты фрезы вертикального питателя. Формирование массива осуществлялось путем насыпания в емкость снежной массы, последующее ее взвешивание (рисунок 5.35) и выгрузка перед рабочим органом [14].

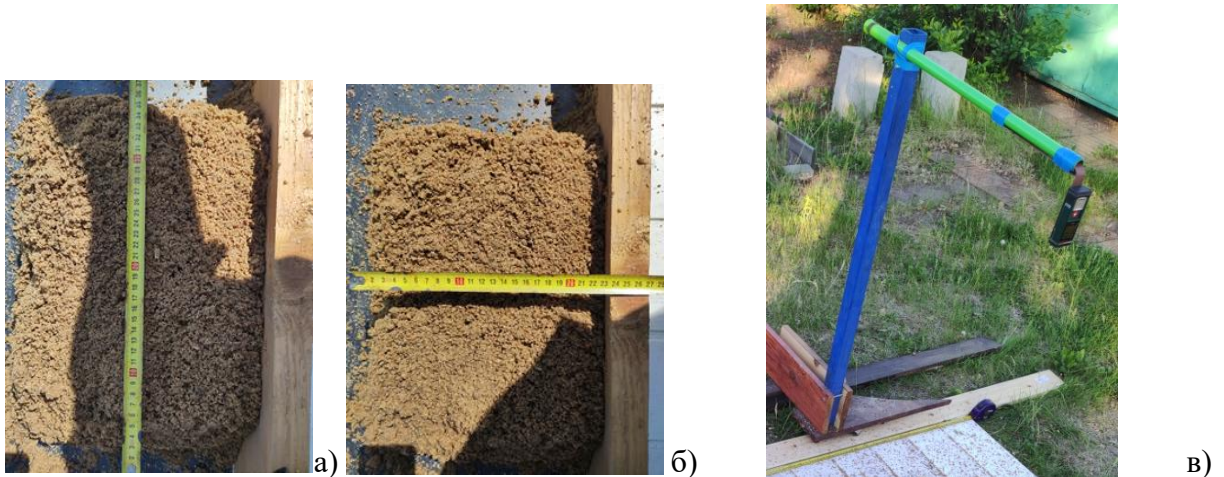


Рисунок 5.34 – Формирование призмы транспортируемого материала при исследовании работы горизонтального питателя, где а) регистрация длины призмы, a , м; б) регистрация ширины призмы, b , м; в) регистрация высоты призмы, h , м

В качестве транспортируемого материала использовались, в том числе, прессованные древесные опилки, подвергавшиеся увлажнению водой непосредственно, перед проведением экспериментальных исследований. Его базовые характеристики представлены в [140].

Минимальное необходимое количество экспериментов, определялось по известным методикам [126, 137, 146, 172]. Значения коэффициента вариации, k_{var} , и доверительной вероятности, p , были приняты равными, $k_{var} = 12\%$, $p = 0,95$. Число степеней свободы равно 4. Значение критерия Стьюдента составляет 2,77.



Рисунок 5.35 – Фрагмент процесса формирования снежной призмы

На втором этапе проводились непосредственно измерения затрачиваемой мощности, N , при разработке сформированной призмы и время, t , затрачиваемое питателем на ее разработку. Данный этап фиксировался на видеокамеру.

На третьем этапе проводилась обработка полученных результатов. Поступивший в загрузочное окно материал, M , собирался и взвешивался на электронных весах. Определялась поступательная скорость движения сформированной призмы, V_{ϕ} , по формуле:

$$V_{\phi} = \frac{L}{t}.$$

Производительность, P , кг/с, находилась по формуле:

$$P = \frac{M}{t}.$$

Также производились вычисления удельной энергоэффективности, NP , кг/(Вт с), по формуле:

$$NP = \frac{N}{P}.$$

На рисунках 5.36, 5.37 и 5.38 представлены зависимости удельной энергоэффективности от поступательной скорости движения, V_{ϕ} , угловой скорости вращения фрезы, ω_{ϕ} , и отношения угловой скорости вращения фрезы к поступательной скорости движения питателя, ω_{ϕ}/V_{ϕ} , соответственно.

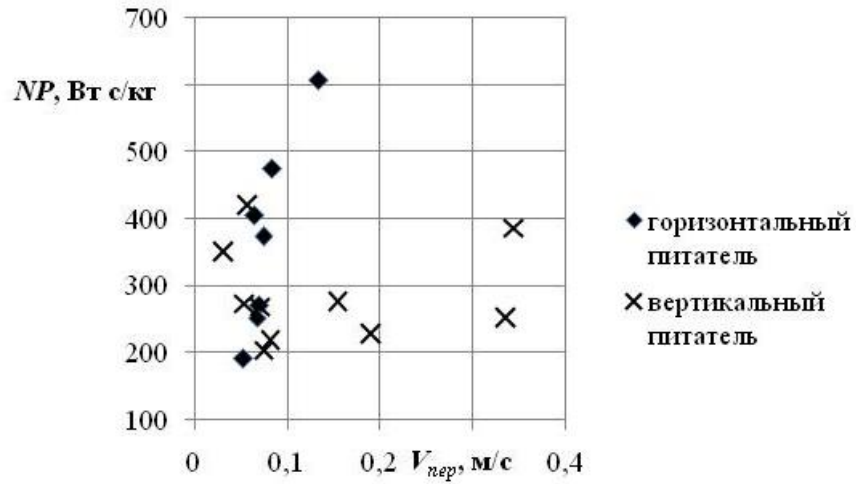


Рисунок 5.36 – Изменение удельной энергоэффективности в зависимости от поступательной скорости питателя РСО.

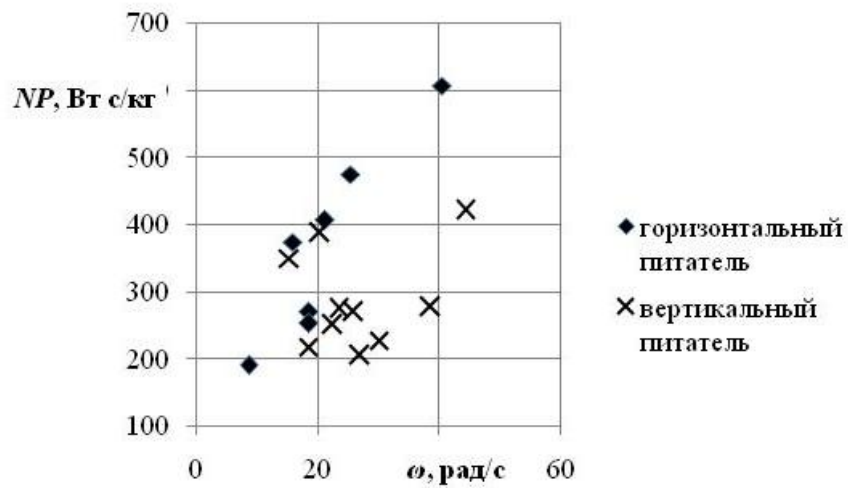


Рисунок 5.37 – Изменение удельной эффективности в зависимости от угловой скорости вращения фрезы питателя РСО.

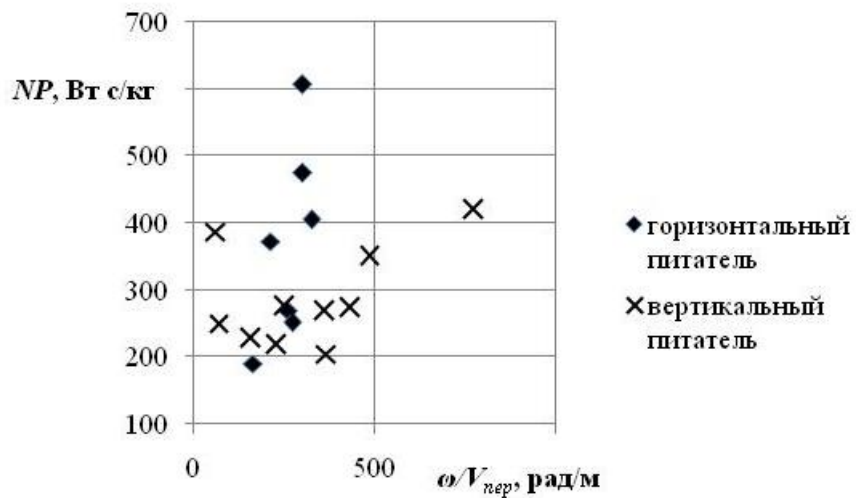


Рисунок 5.38 – Изменение удельной эффективности в зависимости от отношения угловой скорости вращения к поступательной скорости питателя РСО.

Средние значения и их квадратические отклонения варьируемых и выходных параметров работы горизонтального и вертикального питателей представлены в таблицах 5.4 и 5.5, соответственно.

Решение задачи подтверждения адекватности математической модели вертикального питателя осуществлялось сравнением теоретической затрачиваемой мощностью, N_c , с учетом одновременного вырезания снежной массы двумя вертикальными полосами, которое составило (см. таблицу 5.3), $N_c = 19,25 \cdot 2 = 38,5$ Вт, с измеренным значением потребляемой мощности без учета затрат мощности работы вертикального питателя, не осуществляющего разработку снежного массива. Среднее значение относительного расхождения по двум экспериментам составило 11,5 %, что позволяет говорить об адекватности представленной математической модели.

На рисунке 5.36 четко прослеживаются две области, в которых обеспечивается работа горизонтального и вертикального питателей. Экспериментальные исследования показали, что при прочих равных условиях, при поступательной скорости горизонтального питателя, V , более 0,05 м/с, его работа обеспечивается резким увеличением потребляемой мощности, N . Восстановление нормального режима работы происходит, только после уменьшения его поступательной скорости, V , или увеличения затрачиваемой мощности.

Из рисунка 5.37 следует, что при прочих равных условиях, при увеличении угловой скорости вращения фрезы более 18 рад/с, горизонтального питателя наблюдается интенсивный рост переброса транспортируемого материала (рисунок 5.40).



Рисунок 5.40 – Переброс транспортируемого материала при работе горизонтального питателя РС0

Полученные ограничения позволили определить область эффективного использования ФРС малой мощности. Верхняя граница данной области представлена на рисунке 5.38. Данная граница была аппроксимирована следующим уравнением:

$$\frac{N}{P} = -7 \cdot 10^4 \cdot \ln \left(\frac{\omega \phi}{V_{пер}} \right).$$

Величина достоверности аппроксимации составила $R^2=0,8973$.

Работа вертикального питателя при значениях угловой скорости вращения фрезы более 20 рад/с не образует разлет транспортируемого материала, перемещение которого происходит в условиях ограниченного призмой материала и стенками вертикального питателя пространства. При этом вертикальный питатель более эффективно разрабатывает призму материала большей толщины, по сравнению с горизонтальным питателем, при поступательной скорости движения более 0,05 м/с.

При угловой скорости вращения предлагаемой конструкции 20,9 рад/с, за 1,6 с в область загрузочного окна поступило 0,955 кг. В случае питателя ФРС с горизонтальной осью вращения - 1,267 кг за 12 с. При этом измеренная мощность на валу перспективной конструкции составила 250 Вт, а на валу фрезы с горизонтальной осью вращения - 50,1 Вт.

Таким образом, производительность одного модуля предлагаемой конструкции РСО составила 0,597 кг/с, а питателя ФРС 0,106 кг/с. На основании полученных данных можно сделать вывод, что энергоэффективность предлагаемой конструкции на 12% выше, чем у питателя ФРС с горизонтальной осью вращения фрезы.

В соответствии ОДМ 218.5.001-2008, была произведена оценка технико-экономического эффекта от внедрения предлагаемой энергоэффективной конструкции РСО.

Общие затраты на уборку территории от $W_{уб} = 18 \text{ м}^3$ снега с плотностью 300 кг/м³ за директивное время, при стоимости одного Вт 4 руб. представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Общие затраты на уборку территории

	Предлагаемая конструкция	Питатель ФРС
Производительность, кг/с	0,597	0,106
Директивное время на уборку снежных отложений, ч	2,51	14,14
Затраты мощности за директивное время, Вт	627,5	801,405
Стоимость, руб	2510	3205,62

Как видно из представленных результатов экономия от эксплуатации перспективной конструкции составит 692 руб. 62 коп.

Экономический эффект от эксплуатации предлагаемой энергоэффективной конструкции питателя РСО за холодный период года в течение 30 маш. · час. составит 20868 руб. 60 коп.

Выводы

1. Выдвинута гипотеза о том, что наиболее эффективными при разработке снежной массы больших значений плотности и модуля Юнга, являются дисковые фрезы, получающиеся при углах захода, $\theta \approx 0^\circ$, а максимальная транспортирующая способность характерна для фрезы с углами захода близкими к 90° , которая нашла свое экспериментальное подтверждение.

2. Предложена энергоэффективная конструкция питателя включающая в себя вертикальные режущие полосы и горизонтальные режущие диски с вертикальной осью вращения. Предлагаемая конструкция обладает трехкратное уменьшение металлоемкости. Кроме этого относительно простые пространственные формы вертикальной фрезы по сравнению с фрезой питателя ФРС позволяют использовать аддитивные технологии, что позволит обеспечить еще более высокое превосходство по критерию энергоемкость и ряду других эксплуатационных показателях. В случае двукратного увеличения, $\omega = 16$ рад/с, максимальная величина поступательной скорости скоростного снегоочистителя уже составит 2,4 м/с, при том же значении R . Одним из достоинств описанной конструкции является то, что в нее может быть заложен принцип модульности.

2. Составлена математическая модель предлагаемой энергоэффективной конструкции, включающая в себя уравнения ее работы в процессе транспортирования снежных частиц с учетом их взаимодействия, а так же уравнения нормальных реакций рабочего органа.

3. Составлены расчетные схемы возможных вариантов движения снежной частицы в вертикальном питателе. Произведено сравнение ударного импульса и импульса нормальной реакции вертикальной стенки, на основании которого выдвинута гипотеза о наличии границы перехода от ударного взаимодействия к безотрывному скольжению снежной частицы вдоль поверхности стенки вертикального питателя РСО. Получено аппроксимирующее уравнение границы перехода от одной математической модели движения снежной частицы к другой, для рассматриваемых в работе значений параметров снежной частицы и

вертикального питателя. Описан алгоритм перехода от уравнений удара к уравнениям движения с дополнительной связью.

Сравнение результатов имитационного моделирования по удельным энергозатратам транспортирования снежной частицы вдоль вертикальной режущей полосы, и фрезы горизонтального питателя показало их снижение до 40%, в первом случае, по сравнению со вторым. Так же сравнительная оценка показала практически 5% сокращение пути, который проходит снежная частица от момента захвата до границы загрузочного окна в вертикальном питателе по сравнению с горизонтальным расположением питателя.

4. Повышение удельной эффективности работы вертикального питателя обусловлено за счет возможности увеличения поступательной скорости движения и одновременного увеличения толщины призмы разрабатываемого материала. Определена область эффективного использования горизонтального питателя в зависимости его технологических параметров. Вне данной области более энергоэффективную работу продемонстрировал вертикальный питатель. Среднее значение потребляемой мощности составило 86,8 Вт, что на 12% меньше, чем у аналогичного по геометрическим размерам питателя РСО с горизонтальным расположением фрезы. Производительность одного модуля перспективной конструкции роторного снегоочистителя составила 0,597 кг/с, а питателя ФРС 0,106 кг/с. Установлено повышение энергоэффективности перспективной конструкции на 12% выше, чем у питателя ФРС. Ожидаемый экономический эффект от эксплуатации предлагаемой энергоэффективной конструкции 20868 руб. 60 коп.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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, метательных аппаратов 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, метательный аппарат, 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 метательного аппарата 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 энергоэффективный 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

МА – метательный аппарат.

РСО – роторный снегоочиститель.

ФРС – фрезерно-роторный снегоочиститель.

ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Снегоочиститель - Машина для очистки дорог, аэродромов и других площадей от снега способом сдвигания или отбрасывания его в сторону

Роторный снегоочиститель - Снегоочиститель, основной частью рабочего органа которого, является метательный аппарат для отбрасывания снега в сторону

Фрезерно-роторный снегоочиститель - Роторный снегоочиститель с рабочим органом, состоящим из одного или двух роторов и фрезерного питателя

Рабочий орган роторного - Рабочая часть роторного снегоочистителя, предназначенная для захвата снега и отбрасывания его в сторону

Корпус рабочего органа роторного снегоочистителя - Металлоконструкция, предназначенная для монтажа рабочего оборудования роторного снегоочистителя вместе с кожухом(кожухами) ротора (роторов), приводных элементов и опорного устройства

Питатель роторного снегоочистителя - Часть рабочего органа шнеко-роторного и фрезерно-роторного снегоочистителя, предназначенная для отделения снежных масс от разрабатываемого массива, транспортирования и забрасывания их в ротор (роторы)

Фрезерный питатель - Питатель роторного снегоочистителя, выполненный в виде фрез с правой и левой навивкой, расположенных на одной горизонтальной оси

Шнековый питатель - Питатель роторного снегоочистителя, выполненный в виде одного или нескольких горизонтальных шнеков справа и левой навивкой каждый, расположенных друг над другом

Фреза питателя - Винтовая безбарабанная ленточная рабочая часть питателя, предназначенная для вырезания снега из массива и транспортирования к ротору (роторам)

Ротор снегоочистителя - Лопастной метательный аппарат снегоочистителя, предназначенный для захвата снега и отбрасывания его в сторону

Дисковый ротор - Ротор снегоочистителя, выполненный в виде диска с расположенными на нём лопастями

Кожух ротора - Металлоконструкция, в которой заключен ротор (роторы) снегоочистителя, предназначенная для направления снежной массы к выбросному патрубку

Лопасть ротора - Деталь ротора снегоочистителя, предназначенная для захвата и отбрасывания снега

Выбросной патрубок - Устройство, предназначенное для направления потока снега, сошедшего с лопасти ротора снегоочистителя

Производительность снегоочистителя - Количество снега, убираемого снегоочистителем в единицу времени.

Примечание. В зависимости от того, в каких единицах измеряется количество снега, образуются термины "Объемная производительность снегоочистителя" в $m^3/ч$; "Производительность снегоочистителя по массе" в $t/ч$

Дальность отброса снега - Расстояние от продольной оси снегоочистителя до центра тяжести слоя снега, выброшенного рабочим органом в сторону при безветрии

Ширина захвата снегоочистителя - Наибольшая ширина полосы, расчищаемой снегоочистителем за один проход

Высота убираемого слоя снега - Наибольшая высота снежного слоя, разрабатываемого снегоочистителем за один проход

Диаметр фрезы роторного снегоочистителя - Диаметр окружности, описываемой точкой витка фрезы, наиболее удаленной от оси вращения фрезы в поперечном сечении

Диаметр ротора снегоочистителя - Диаметр окружности, описываемой точкой лопасти, наиболее удаленной от оси вращения ротора в поперечном сечении

Ширина ротора снегоочистителя - Максимальная ширина лопасти, измеренная в плоскости, параллельной оси вращения ротора

Пропускная способность питателя роторного снегоочистителя - Объем снега, который питатель роторного снегоочистителя способен пропустить в 1 ч без дополнительного уплотнения

Коэффициент заполнения ротора - Отношение фактической объемной производительности снегоочистителя к пропускной способности ротора

Коэффициент заполнения питателя - Отношение фактической объемной производительности снегоочистителя к пропускной способности питателя

Снежный массив – Полупространство, на котором естественным образом, или в результате проведения снегоочистных работ распределен снег не нулевой толщины

Снежная масса – Отделенная рабочим органом часть снежного массива, для ее перемещения в заданную точку пространства, или иного преобразования

Материальная частица – Материальное тело, обладающее постоянной массой, размерами, формой и внутренней структурой которого можно пренебречь в условиях исследуемой задачи, одна из форм представления части снежной массы

Отдельное крупно-кусковое образование – Материальное тело, обладающее постоянными массой и размерами, формой и внутренней структурой которого можно пренебречь в условиях исследуемой задачи, одна из форм представления части снежной массы

Вертикальный питатель роторного снегоочистителя - Питатель роторного снегоочистителя, выполненный в виде режущих горизонтальных дисков и вертикальных режущих полос, расположенных на одной вертикальной оси

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.А. Халафян STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. Учебник — М: ООО «Бином-Пресс», 2007 г. — 512 с:
2. Абдулкадер, М. Х. Компьютерное моделирование взаимодействия отвала бульдозера с перемещаемым грунтом / М. Х. Абдулкадер // Актуальные вопросы машиноведения. – 2016. – Т. 5. – С. 35-38.
3. Авдеев Н. Е. Многофракционное сепарирование зерновых смесей Текст. / Н. Е. Авдеев, Г. Странадко, Ю. В. Чернухин, А. Некрасов // Комбикорма, 2005. № 5. С. 27.
4. Алешков, Д. С. Повышение эффективности фрезерно-роторного снегоочистителя путем совершенствования его конструкции : специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алешков Денис Сергеевич. – Омск, 2001. – 206 с.
5. Алешков, Д. С. Влияние кинематических характеристик питателя и базовой машины фрезерно-роторного снегоочистителя на процесс отделения стружки / Д. С. Алешков, Н. Ю. Урусова (Аюпова Н.Ю.) – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2012. – Вып. 5(27). – С. 7–10.
6. 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.
7. Алешков, Д. С. Нелинейная множественная регрессия показателей рабочего процесса фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова // . – 2015. – № 3(3). – С. 4-8.
8. Алешков, Д.С. Влияние профиля лопасти ротора на параметры движения снежного массива по лопасти ротора / Д.С. Алешков. — Текст : электронный // NovaInfo, 2016. — № 42. — С. 63-67. — URL: <https://novainfo.ru/article/4888> (дата обращения: 09.03.2023).

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. Геометрические и кинематические характеристики питателя и метательного аппарата фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2018. – Вып. 5(63). – С. 638–648.

11. Алешков, Д. С. Модель формирования снежных валов при работе фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, М. В. Суковин // Вестник евразийской науки. – 2018. – Т. 10. – № 6. – С. 58.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Алешков, Д. С. Теоретическая оценка параметров работы фрезы снегоочистителя отбрасывающего действия в зависимости от угла захода ленты фрезы и размеров частиц / Д. С. Алешков, М. В. Суковин // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 3(3). – С. 42-52. – DOI 10.30987/2782-5957-2022-3-42-52.

18. Аюпова, Н. Ю. Повышение эффективности рабочего процесса питателя фрезерно-роторного снегоочистителя : специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аюпова Наталья Юрьевна. – Омск, 2021. – 182 с.

19. Баловнев В. И. Расчет некоторых геометрических параметров ротора автодорожных снегоочистителей. – М.: Автотрансиздат, 1958. – 20 с.

20. Баловнев В.И., Советбеков Б.С. Оптимизация режимов эксплуатации и выбора транспортно-технологических машин методами анализа четвертой координаты рабочего процесса // Вестник КРСУ, 2014. Т.14. №12. С. 145-148.

21. Баловнев, В. Н. Оценка эффективности дорожных и коммунальных машин по технико-эксплуатационным показателям : учебное пособие / В. И. Баловнев; Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (Гос. техн. ун-т) (МАДИ-ГТУ). – Москва :МАДИ, 2002. – 28 с. – Текст : непосредственный.

22. Барский М.Д. Пневмотранспорт, пылеулавливание и сепарация / М.Д. Барский, Б.С. Дроздов, В.И. Павлов. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1979. – 95с.

23. Бахвалов С.В. Аналитическая геометрия. Учебник для пед. ин-тов. Под ред. С.В. Бахвалова. Изд. 4. М., «Просвещение», 1970.

24. Беляев, Д. А. Малогабаритный грунтомет для борьбы с лесными низовыми пожарами / Д. А. Беляев, В. А. Бакач, И. С. Федорченко // Лесозащита и комплексное использование древесины : Сборник статей Всероссийской научно-

практической конференции, Красноярск, 10 марта 2021 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2021. – С. 27-30.

25. Бермант А.Ф. Краткий курс математического анализа [Текст]: учебное пособие / А.Ф. Бермант, И.Г. Араманович. 15-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2009. – 736 с.:ил.

26. Бирюков, Д. Г. Упругопластический неосесимметричный удар параболического тела по сферической оболочке / Д. Г. Бирюков, И. Г. Кадомцев // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46. – № 1(269). – С. 181-186.

27. Бобков, С. П. Сравнение различных подходов к определению продолжительности удара твердых тел при измельчении / С. П. Бобков, И. В. Полищук // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 6. – С. 66-70. – DOI 10.17588/2072-2672.2016.6.066-070.

28. Бурьян, Ю. А. Закон сохранения энергии при центральном ударе двух тел / Ю. А. Бурьян, Д. Д. Чернявская, Д. И. Чернявский // Омский научный вестник. – 2016. – № 2(146). – С. 5-8.

29. Галяев, А. А. Об одной задаче оптимального управления в фазе удара и унификации моментов окончания взаимодействия / А. А. Галяев // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 12. – С. 11-24.

30. Галяев, А. А. О математической модели одномерного удара цепочки тел, обладающей вязкоупругими свойствами / А. А. Галяев // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – С. 40-49.

31. Гетманова А. Д. Учебник по логике. — М.: Владос, 1995. — С. 50—51.

32. ГОСТ 427-75 «Линейки измерительные металлические. Технические условия (с изменениями № 1, 2, 3)»

33. Гржибовский, А. М. Описательная статистика с использованием пакетов статистических программ STATISTICA и SPSS / А. М. Гржибовский, С. В. Иванов, М. А. Горбатова // Наука и Здравоохранение. – 2016. – № 1. – С. 7-23.

34. Гржибовский, А. М. Корреляционный анализ данных с использованием программного обеспечения STATISTICA и SPSS / А. М. Гржибовский, С. В. Иванов, М. А. Горбатова // Наука и Здравоохранение. – 2017. – № 1. – С. 7-36.
35. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – Москва : Мир, 1989. – 510 с. – Текст : непосредственный.
36. Доценко А. И. Коммунальные машины и оборудование : учеб. пособие для вузов. – М. : Архитектура-С, 2005. – 344 с.
37. Дюнин А. К. Механика метелей. – Новосибирск: изд-во СибАН СССР. 1963 – 24 с.
38. Дягель, Р. В. О нелинейной вязкоупругой модели удара Ханта Кроссли / Р. В. Дягель, В. В. Лапшин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2011. – № 5. – С. 164-173.
39. Е. И. Гурина. Расчет аэродинамических характеристик вентиляторной установки 4вц-15 с помощью cfd-пакета “Fluent”. ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. 2010. Т. 51, N- 06. с. 102-110.
40. Егоров А.Л., Федотов В.В., Федотова Е.А. Обоснование рабочих параметров снегоуборочной машины с уплотняющим рабочим органом. Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. С. 103.
41. Жариков, Е. У. Динамика косоугольного удара двух твердых тел при движении в пространстве / Е. У. Жариков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2005. – № 2(130). – С. 45а-49.
42. Жариков, Е. У. Удар двух тел при движении в пространстве / Е. У. Жариков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – № 1(133). – С. 16-21.
43. Закиров, М. Ф. Исследование влияния шага шнека на мощность привода питателя малогабаритного шнекороторного снегоочистителя / М. Ф. Закиров // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 2(26). – С. 56-57.
44. Закиров, М. Ф. Оптимизация рабочей скорости фрезерно-роторного снегоочистителя / М. Ф. Закиров // Строительные и дорожные машины. – 2015. – № 10. – С. 55-57.

45. Закиров М.Ф. Исследование сопротивления резанию и перемещению снега шнеком малогабаритного шнекороторного снегоочистителя // Техника и технология транспорта. 2019. № S13. С. 10. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-10TKR19.pdf>.

46. Звонкин А.К., Ландо С.К. Графы на поверхностях и их приложения. М.: МЦНМО, 2010

47. Зорин, В.А. Надежность механических систем : учебник / В.А. Зорин. – Москва : ИНФРА-М, 2017

48. Иванов А. Н., Кузнецов Л. А., Поливанов Ю. П. Интенсификация рабочего процесса метательного аппарата роторных снегоочистителей. - М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1981. - Вып. 1. – 43 с.

49. Иванов А.П. Динамика систем с механическими соударениями. М.: Международная программа образования, 1997. 336 с.

50. Иванов, А. П. Об условиях отрыва в задаче о движении твердого тела по шероховатой плоскости / А. П. Иванов // Нелинейная динамика. – 2008. – Т. 4. – № 3. – С. 287-302.

51. Иванов, А. Н. Снегоочистители отбрасывающего действия / А. Н. Иванов, В. А. Мишин. – Москва : Машиностроение, 1981. – 159 с. – Текст : непосредственный.

52. Исследование колебаний кресла на виброзащитной подвеске с эффектом квазиулевого жесткости при синусоидальном возбуждении / М. С. Корытов, В. С. Щербаков, В. В. Титенко, И. Е. Почекуева // Проблемы машиноведения : Материалы V Международной научно-технической конференции, Омск, 16–17 марта 2021 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2021. – С. 53-61. – DOI 10.25206/978-5-8149-3246-4-2021-53-61.

53. Исследование отвалов снегоуборочных машин / Ш. М. Мерданов, В. В. Конев, А. В. Балин, А. А. Шевелев // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства : материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 08 февраля 2016 года / Министерство образования и науки

РФ; Тюменский индустриальный университет. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016. – С. 190-194.

54. Клигунова, З. А. Моделирование процесса перемещения грунта бульдозером / З. А. Клигунова, Г. Г. Воскресенский // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2020. – Т. 1. – № 1. – С. 147-150.

55. Козлов, Д. В. Математическая модель поперечного удара твердого шарообразного тела с поверхностью ледяного покрова / Д. В. Козлов // Полярная механика. – 2016. – № 3. – С. 115-122.

56. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы / Г. Корн, Т. Корн ; [Пер. И. Г. Арамановича (ред. пер.) и др.]. – 6-е изд., стереотипное. – Санкт-Петербург : Лань, 2003. – 831 с. – Текст : непосредственный.

57. Костин, В. П. Теория эксперимента : учебное пособие / В. П. Костин ; Оренбургский государственный университет, Кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2013. – 209 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=259219> (дата обращения: 05.05.2022). – Текст : электронный.

58. Кочетков, А. В. Некоторые вопросы теории удара / А. В. Кочетков, П. В. Федотов // Интернет-журнал Науковедение. – 2013. – № 5(18). – С. 108.

59. Крашенинников М.С. Математическая модель роторно-винтового движителя // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – Т. 8, № 4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/50TVN416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

60. Кузнецов, А. В. Конструкционные особенности устройства ударного действия, предназначенного для борьбы с зимней скользкостью / А. В. Кузнецов, Л. А. Сладкова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 260-267.

61. Кузнецова, В. Н. Моделирование процесса контактного взаимодействия рабочих органов землеройных и землеройно-транспортных машин с мерзлым грунтом / В. Н. Кузнецова, И. С. Кузнецов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2018. – Т. 15. – № 2(60). – С. 189-198.

62. Куклина И.Г. Математическая модель работы шнека специальных машин - длинного межопорного ротора / Е.Е. Дёмина, Д.С. Мокеров Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева № 2 (133) с. 85-101.

63. Лашков, В. А. Коэффициент восстановления скорости при прямом ударе / В. А. Лашков // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2010. – № 4. – С. 127-136.

64. Маркеев, А. П. Об устойчивости поступательного движения твердого тела с ударами о горизонтальную плоскость / А. П. Маркеев, Д. А. Сухоручкин // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 466. – № 5. – С. 550. – DOI 10.7868/S0869565216050121.

65. Математическое моделирование и расчет конструктивных параметров измельчителей с переменным шагом винтовой линии шнека / В. В. Пеленко, В. А. Похольченко, И. И. Усманов [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 556-562. – DOI 10.21443/1560-9278-2017-20-3-556-562.

66. Машины для содержания и ремонта городских и автомобильных дорог: Учебное пособие для вузов по дисциплине «Дорожные машины» для специальностей 170900, 230100, 150600 и 291800 / В.И. Баловнев, М.А. Беляев и др.; Под общ.ред. В.И. Баловнева. 2-е изд. дополн. и перераб. Москва Омск. ОАО «Омский дом печати», 2005. 768 с.

67. Мерданов, Ш. М. Повышение эффективности плужной снегоуборочной машины / Ш. М. Мерданов, В. В. Конев, Л. П. Мальцева // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 5-3. – С. 491-496.

68. Миркин, Б. Г. Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений: обзор : препринт WP7/2011/03 [Текст] /Б. Г. Миркин ; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – М. : Изд. дом Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», 2011. – 88 с.

69. Моделирование процесса непрерывного приготовления смеси смесителем-дозатором экструдера / В. В. Коновалов, В. В. Новиков, Д. Н. Азиаткин, А. С. Грецов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 3. – С. 72-78.

70. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин : учеб. пособие для вузов / В. И. Баловнев. – 2-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1994. – 432 с

71. Мухина, М. Л. Экспериментальное определение аэродинамических характеристик модели автомобиля / М. Л. Мухина // Транспортные системы. – 2019. – № 3(13). – С. 4-10. – DOI 10.46960/62045_2019_3_4.

72. Мхитарян, А. М. Аэродинамика / А. М. Мхитарян. – Москва : Машиностроение, 1976. – 448 с. – Текст : непосредственный.

73. Нгуен Зань Шон. Определение оптимальных параметров и условий использования рыхлителей в строительстве : специальность 05.05.04 "Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нгуен Зань Шон. – Москва, 2005. – 23 с.

74. Нигматулин Р И Динамика многофазных сред. Ч I — М • Наука. Глредфизмат лит, 1987 — 464 с

75. О содержании мониторинга снежных отвалов и подверженных их влиянию земель северных городов (на примере города Томска) / В. Б. Жарников, О. А. Пасько, Н. С. Ушакова, Е. С. Макарцова // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 174-191. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-1-174-191.

76. О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов, “Нестационарный метод “крупных частиц” для газодинамических расчетов”, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 11:1 (1971), 182–207; U.S.S.R. Comput.Math. Math. Phys., 11:1 (1971), 241–271

77. Определение объемного расхода экструдата в зоне прессования одношнекового пресс-экструдера / В. В. Новиков, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 1(75). – С. 91-94.

78. Оптимизация процесса измельчения пищевых материалов в волчках / В. В. Пеленко, Д. П. Малявко, И. И. Усманов [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2016. – № 2. – С. 32-39.

79. Орловский, С. Н. Методика расчета рабочего органа грунтомета для тушения кромки лесного низового пожара / С. Н. Орловский // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2014. – № 4(340). – С. 52-60.

80. Ортега Дж., Пул. У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Пер. с англ.; Под ред. А.А. Абрамова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 288 с.

81. П.С. Золотарев Давления, возникающие в спирально-винтовом транспортере при перемещении сыпучего материала. Технологии и средства механизации сельского хозяйства. Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 6 (68), 2010 с. 90 – 94.

82. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механического удара / Я. Г. Пановко. – Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука» : М., 1977. – 224 с. – Текст : непосредственный.

83. 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)".

84. 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.

85. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления : учебное пособие : в 2-х т. / Н. С. Пискунов. - Издание стереотипное. – Москва : Интеграл-Пресс, 2006. – Т. 1 – 415 с. – Текст : непосредственный.

86. Полигармонический спектральный анализ системы Лоренца / Д. В. Матвеев, А. И. Смирнов, К. Ф. Латыпов, Л. А. Гимадеева // Апробация. – 2016. – № 2(41). – С. 22-25.

87. Прусов А.Ю., Маврин И.Ю. Статистический анализ малогабаритной коммунальной снегоуборочной техники Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2014.Т.1. с. 180-183.

88. Рабочий орган с режущими дисковыми резцами / Р. Б. Желудкевич, Н. В. Иванова, Ю. Ф. Кайзер [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 7. – С. 136-143.

89. Резник Е.И. Двухспиральные винтовые транспортеры / Е.И. Резник // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. — 1970. — № 10. — С. 57-59

90. Салий В. Н., Богомолов А. М. Алгебраические основы теории дискретных систем. — М.: Физико-математическая литература, 1997. Уилсон Р. Введение в теорию графов. — М.: Мир, 1977. — 208 с.

91. 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 ".

92. Селиверстов, Н. Д. Оптимальные параметры бульдозера-рыхлителя в зависимости от условий эксплуатации / Н. Д. Селиверстов // Технология колесных и гусеничных машин. – 2015. – № 4. – С. 34-40.
93. Сладкова, Л. А. Моделирование процессов разрушения льда / Л. А. Сладкова, А. В. Кузнецов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2018. – № 2(16). – С. 22.
94. Согин, А. В. Исследование движения роторно-винтовой машины (РВМ) по воде / А. В. Согин, В. А. Шапкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2006. – № 5. – С. 54-64.
95. Согин, А. В. Исследование режимов резания вязких и сыпучих грунтов фрезой земснаряда проекта 2000М / А. В. Согин, Н. Н. Арефьев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S1. – С. 194-198.
96. Сороченко С. Ф., Тюленев Н. В. Исследование влияния проходного диаметра решета на полноту отделения примесей в пневмосепараторе. Проблемы науки. 2017. № 1 (14). С. 38-41.
97. Стихановский Б.Н. Механика удара: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 200 с.
98. Стихановский, Б. Н. Методика измерения скоростей удара твердых тел / Б. Н. Стихановский, Е. С. Чернова // Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – № 6-2(90). – С. 190-192.
99. Твердохлебов В.А. Определение рационального состава транспортно-технологического комплекса, задействованного в снегоуборочных работах. ИНТЕЛЛЕКТ. ИННОВАЦИИ. ИНВЕСТИЦИИ. 2016. №6. С. 120-124.
100. Трофимова И.Ф. Определение оптимального количества плужных снегоочистителей для механизированной очистки городских магистралей и аэродромов от свежесвыпавшего снега. Вестник Московского автомобильно-дорожного университета (МАДИ). 2011. №1. С. 91-94.
101. Тургумбаев, Ж. Ж. Результаты лабораторных исследований по оценке физико-механических свойств снега / Ж. Ж. Тургумбаев, Ж. Т. Гапарова, И. Т.

Башиков // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2012. – № 26. – С. 116-121.

102. Упругий удар тела о наклонную поверхность / Н. Л. Великанов, В. А. Наумов, С. И. Корягин, Д. А. Тарасов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2013. – № 10. – С. 36-42.

103. 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.

104. Ушаков К.А., Бушель А.Р. Исследование работы осевого вентилятора при всасывании из переходящего потока. Труды ЦАГИ, вып. 976. М.: изд. БНИ ЦАГИ, 1965, с. 216-242

105. Федосеев, А.Н. Экономико-математические методы и прикладные модели: учеб. пособие / В.В. Федосеев, А.Н. Гармаш, Д.М. Дайнитбегов и др.; под ред. В.В. Федосеева. – Москва: ЮНИТИ, 1999. – 391 с.

106. Федотенко, Ю. А. Экспериментальные исследования режущих элементов рабочего органа подкапывающей машины / Ю. А. Федотенко, И. А. Реброва, Д. В. Булаева // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 1(35). – С. 38-42.

107. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Хокни, Р., Иствуд, Дж. ;пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 640 с.

108. Чернявский, Д. И. Определение уравнения закона сохранения энергии при Центральном ударе нескольких тел / Д. И. Чернявский, Д. Д. Чернявская // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – № 1. – С. 252-260.

109. Численное моделирование процесса разрушения хрупких тел при ударе / В. Н. Аптуков, Л. В. Ландик, П. А. Романов, А. В. Фонарев // Вестник Пермского

университета. Математика. Механика. Информатика. – 2012. – № 2(10). – С. 15-19.

110. Шайдаков В.И., Аэродинамика винта в кольце М.: Изд-во МАИ, 1996г.

111. Шалман, Д. А. Снегоочистители / Д. А. Шалман. – Ленинград : Машиностроение, 1973. – 216 с. – Текст : непосредственный.

112. Шульшедов В.А. Инновационные механизмы логистики в сфере экологического содержания города. В сборнике: Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса Материалы 5-ой Международной научно-практической интернет-конференции. под общей редакцией А.Н. Новикова. 2016. С. 181-188.

113. Щербаков, А. С. Метод расчета сопротивления копания полусферическим отвалом бульдозера / А. С. Щербаков, Е. В. Курилов, Я. В. Гааг // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2012. – Т. 1. – С. 30-37.

114. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики. Статика. Кинематика. Динамика : учебное пособие / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – 8-е изд., стереотипное. – Санкт-Петербург : Лань, 2001. – 764 с. – Текст : непосредственный.

115. A study of snow drifting on a flat roof during snowfall based on simulations in a cryogenic wind tunnel Shengguan Qiang, Xuanyi Zhou, Kenji Kosugi, Ming Gu.

116. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part II: system design for snow disposal N Perrier, A Langevin, JF Campbell- Computers & Operations Research, 2006 – Elsevier.

117. A. Carbone, B. M. Chiaia, B. Frigo, & C. Turk, Multi-scale modelling of snow microstructure Journal for Multiscale Computational Engineering, 11 (2): 177–184 (2013).

118. Aleshkov D., Sukovin M. Aerodynamic characteristics of the milling and rotary snowblower feeder in the loading gate area // International review of mechanical engineering (IREME). 2017. Vol. 11, no. 9. P. 701-708.

119. Azieva, L.D..(2020). Examples of solving problems for the heat equation in Matlab. *TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF SCIENCE AND EDUCATION*.10.18411/lj-07-2020-23.
120. Balevičius, R., Mróz, Z. A finite sliding model of two identical spheres under displacement and force control. Part I: Static analysis. *Acta Mechanica*. 2013;224:1659-1684. DOI: 10.1007/s00707-013-0839-9.
121. Bang, B., Nielsen, A, Sundsb0, P.A and Wiik, T., 1994, Computer Simulation of Wind Speed, Wind Pressure and Snow Accumulation around Buildings (SNOW-SIM), *Energy and Buildings* 21, 235-243.
122. Bartenev, I., Malyukov, S., Malyukova, M. Forest fire extinguishing: theoretical study of the screw drum parameter influence on the efficiency of a forest fire soil-sweeping machine. *IOP Conference Series: Earthand Environmental Science*. 2020;595:012013. 10.1088/1755-1315/595/1/012013.
123. Bekakos, Chrysostomos & Papazafeiropoulos, George & O'Boy, Dan & Prins, Jan. (2016). Pneumatic tyres interacting with deformable terrains. *Journal of Physics: Conference Series*. 744. 10.1088/1742-6596/744/1/012213.
124. Beyers, Meiring & Sundsbø, P.A. & Harms, Thomas. (2004). Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 92. 725-747. 10.1016/j.jweia.2004.03.011.
125. Bobillier, Gregoire & Bergfeld, Bastian & Capelli, Achille & Dual, Jürg & Gaume, Johan & van Herwijnen, Alec & Schweizer, Juerg. (2020). Micromechanical modeling of snow failure.*The Cryosphere*. 14. 39-49. 10.5194/tc-14-39-2020.
126. Boote, D., Vergassola, G., Di Matteo, V., Strength Analysis of Superyacht Superstructures with Large Openings, (2017) *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 11 (1), pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.15866/ireme.v11i1.9289>
127. Boutanios, Ziad. (2018). Two-way Coupled Eulerian-Eulerian Finite Volume Simulation of Drifting Snow
128. Chambers, Christopher & Miller, Alan. (2014). Inefficiency Measurement. *American Economic Journal: Microeconomics*. 6. 10.1257/mic.6.2.79.

129. Chernak R, Kustiner L E, Phillips L. The snowplow problem [J] *The UMAP Journal*, 1990, 11: 241-250.
130. Cresseri, Silene & Jommi, Cristina. (2005). Snow as an elastic viscoplastic bonded continuum: a modelling approach. *Italian Geotechnical Journal*. 4.
131. Cuthill, Fergus. (2017). Influence of snow microstructure and properties on the grip of winter tyres.
132. D I Chernyavsky and D D Chernyavsky 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1901 012113
133. Déry, S. J. and Yau, M. K.: 1999b, 'A Bulk Blowing Snow Model', *Boundary-Layer Meteorol.* 93 237–251; Dover, S. E.: 1993
134. Development prototype of the utility model “mobile mechanized ice AX (snowplow) MMI-2010” / G.K. Masanov, B. A. Zhakishev, Zh. K. Taybasarov, N. S. Imambaev // *Science and World*. – 2019. – No 5-2(69). – P. 54-56.
135. Dmitruk, Andrei & Koshevoy, Gleb. (1991). On the existence of a technical efficiency criterion. *Journal of Economic Theory*. 55. 121-144. 10.1016/0022-0531(91)90061-8.
136. Dornyak, Olga & Bartenev, Ivan & Drapalyuk, Mikhail & Stupnikov, Dmitry & Malyukov, Sergey & Pozdnyakov, Evgeny. (2020). Mathematical Model of Forest Fire Soil-thrower Movement. *KnE Life Sciences*. 10.18502/cls.v5i1.6168.
137. Doudkin, Mikhail & Kim, Alina & Moldakhanov, Bekbolat & Kustarev, Gennady & Andryukhov, Nikita & Rogovsky, Valery & Doudkina, Yelena. (2021). Experimental Studies of the Physical Model of the Milling-Rotary Snow Cleaner. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 15. 453. 10.15866/ireme.v15i9.20952.
138. Du, Sen & Petrie, John & Shi, Xianming. (2017). Use of Snow Fences to Reduce the Impacts of Snowdrifts on Highways: Renewed Perspective. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2613. 45-51. 10.3141/2613-06.
139. Dur, Onur & Evrensel, Cahit. (2015). Computational Modeling of Wake Flow to Improve Visibility during High Speed Snow Plowing. *Cold Regions Science and Technology*. 118. 10.1016/j.coldregions.2015.05.006.

140. 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.

141. Gay, M., Fily, M., Genthon, C., Frezzotti, M., Oerter, H., and Winther, J. G., Snow grain-size measurements in Antarctica, *J. Glaciology*, vol. 48, no. 163, pp. 527–535, 2002.

142. Gerling, B. & Löwe, Henning & van Herwijnen, Alec. (2017). Measuring the Elastic Modulus of Snow. *Geophysical Research Letters*. 44. 10.1002/2017GL075110.

143. Golubev, V. N. and Frolov, A. D., Modelling the change in structure and mechanical properties in dry-snow densification to ice, *Annals of Glaciology*, vol. 26, pp. 45–50, 1998.

144. Guala, Michele & Manes, Costantino & Clifton, Andy & Lehning, Michael. (2008). On the saltation of fresh snow in a wind tunnel: Profile characterization and single particle statistics. *Journal of Geophysical Research*. 113. 10.1029/2007JF000975.

145. Guo, Yu & Curtis, Jennifer. (2015). Discrete Element Method Simulations for Complex Granular Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 47. 21-46. 10.1146/annurev-fluid-010814-014644.

146. Hawashin, D., Alkhateri, M., Alnuaimi, N., Saif, F., Omer, Z., Shareef, H., Performance Evaluation of Recent Metaheuristic Optimization Algorithms for Photovoltaic System Parameter Extraction, (2021) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 16 (1), pp. 60-67. doi: <https://doi.org/10.15866/iree.v16i1.18955>

147. Hougaard, Jens & Keiding, Hans. (1998). On the Functional Form of an Efficiency Index. *Journal of Productivity Analysis*. 9. 103-111. 10.1023/A:1018342231742.

148. Huber, Christoph & Weigand, Bernhard & Reister, Heinrich & Binner, Thomas. (2015). Modeling and Numerical Calculation of Snow Particles Entering the Air Intake of an Automobile. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*. 8. 10.4271/2015-01-1342.

149. Jäntschi, Lorentz. (2022). Correlations and regressions with MATLAB.
150. Kang, Luyang & Zhou, Xuanyi & Hooff, Twan & Blocken, Bert & Gu, Ming. (2018). CFD simulation of snow transport over flat, uniformly rough, open terrain: Impact of physical and computational parameters. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 177. 213-226. 10.1016/j.jweia.2018.04.014.
151. Kirchner, H. O. K., Michot, G., Narita, H., and Suzuki, T., Snow as a foam of ice: Plasticity, fracture and the brittle-to-ductile transition, *Philos. Mag. A*, vol. 81, no. 9, pp. 2161–2181, 2001.
152. 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.
153. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows // *Comput. Methods Appl. Mech. Engng*. 1974. V. 3. P. 269–289.
154. Lee, J.H. & Gard, K. & Misra, D.. (2011). Using acoustic sounding to measure bulk density and depth of snow. 17th International Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems 2011, ISTVS 2011.490-498.
155. Lee, Jonah. (2011). Finite element modeling of interfacial forces and contact stresses of pneumatic tire on fresh snow for combined longitudinal and lateral slips. *Journal of Terramechanics*. 48. 171-197. 10.1016/j.jterra.2010.12.003.
156. Li L, Sandu C, Lee J, Liu B. Stochastic modeling of tire-snow interaction using a polynomial chaos approach. *JTerramech* 2009; 46: 165-88/
157. Li, Cheng & Lim, Kaeul & Berk, Tim & Abraham, Aliza & Heisel, Michael & Guala, Michele & Coletti, Filippo & Hong, Jiarong. (2020). Settling and Clustering of Snow Particles in Atmospheric Turbulence.
158. Modeling of dry snow adhesion during normal impact with surfaces Tobias Eidevåg, Per Abrahamsson, Matthias Eng, Anders Rasmuson.
159. Muthumani, Anburaj. (2014). Strategies for Snow and Ice Control at Extreme Temperatures: Review of Current Practice.

160. Nakhla, H. & Thompson, B.. (2002). Calculation of Debris Trajectories During High-Speed Snowplowing. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED. 257. 10.1115/FEDSM2002-31429.
161. Nixon W and Frisbie T 1993 Field measurements of plow loads during ice removal operations Iowa department of transportatiton. Yosida Z 1974 Theoretical studies on snow removal by a plough. Flow-type kick up of snow caused by a plough moving at high speeds *Low Temp SciSer A* 32. P. 39–70.
162. Numerical Modelling of Blowing Snow, Ph.D. Thesis, Department of Applied Mathematics, University of Leeds, U.K., 233 pp.
163. Numerical study on granule aggregation and breakage in fluidized bed granulation by a novel PBM with DEM-CFD coupling approach Kentaro Hayashi, Hideya Nakamura, Satoru Watano.
164. Ostoja-Starzewski, M., Random field models of heterogeneous materials, *Int. J. Solids Struct.*, vol. 21, pp. 2429–2455, 1998.
165. Pluta, Zdzisław&Hryniewicz, Tadeusz. (2013). On the Quantum Theory of Impact Phenomenon for the Conditions of Elastic Deformation of Impacted Body. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*. 12. 45-59. 10.18052/www.scipress.com/ILCPA.12.45.
166. Sector design for snow removal and disposal in urban areas A. Labelle,,J.F. Campbell. Campbell, J., Langevin, A. The Snow Disposal Assignment Problem. *J Oper Res Soc* 46, 919–929 (1995). <https://doi.org/10.1057/jors.1995.131>.
167. Shenvi, Mohit & Sandu, Corina & Untaroiu, Costin. (2022). Review of compressed snow mechanics: Testing methods. *Journal of Terramechanics*. 100. 25-37. 10.1016/j.jterra.2021.11.006.
168. Shoop SA, Kestler K, Haehnel R. Finite element modeling of tires on snow. *TireSciTechnol* 2006; 34: 2-37.
169. Sugiura, Konosuke & Nishimura, K. & Maeno, Norikazu & Kimura, Tadashi. (1998). Measurements of snow mass flux and transport rate at different particle diameters in drifting snow. *Cold Regions Science and Technology*. 27. 10.1016/S0165-232X(98)00002-0.

170. Sundsbo P.A. and Hansen E.W.N., 1996, Numerical modelling and simulation of snowdrift around fences. Proceeding for the 3rd International Conference of snow engineering. Sendai. Japan.

171. Thompson, Brian & Nakhla, Hany. (2002). Modeling of Airborne Debris around Overplow Deflectors during High-Speed Snowplowing. *Journal of Cold Regions Engineering*. 16. 119. 10.1061/(ASCE)0887-381X(2002)16:3(119).

172. Tonon, D., Garcia, E., Thermodynamic Analysis of a Spark Ignition Internal Combustion Engines by Computational Simulations, (2018) *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 12 (8), pp. 705-713. doi: <https://doi.org/10.15866/ireme.v12i8.15082>.

173. Uematsu et al., 1991; Sato et al., 1993; Liston et al., 1993.

174. Villiermaux, Emmanuel & Vandenberghe, Nicolas. (2013). Geometry and fragmentation of soft brittle impacted bodies. *SoftMatter*. 9. -. 10.1039/C3SM50789K.

175. Willibald, Carolin & Löwe, Henning & Theile, Thimo & Dual, Jürg & Schneebeli, Martin. (2020). Angle of repose experiments with snow: role of grain shape and cohesion. *Journal of Glaciology*. 1-9. 10.1017/jog.2020.36.

176. Wind tunnel model tests of snow precipitation and redistribution on rooftops, terraces and in the vicinity of high-rise buildings Author links A.Flaga G.Bosak A.Pistol.

177. Xingzhihui1a L. Structure design of small road snow remover // *Journal of Physics: Conference Series*. – 1939. – T. 2021.– C. 012054.

178. Yu, Z.-X & Zhu, Fu & Cao, Rui Zhou & Xiaoxiao, Chen & Zhao, Lei & Zhao, Shichun. (2019). Wind tunnel tests and CFD simulations for snow redistribution on roofs 3D stepped flat roofs. *Wind and Structures An International Journal*. 28. 31-47. 10.12989/was.2019.28.1.031.

179. Zakirov, M. (2020). The research of resistance to snow cutting and moving with an auger of a small-sized rotary-auger snowplow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 786. 012043. 10.1088/1757-899X/786/1/012043.

180. Zakirov, M. F. The research of resistance to snow cutting and moving with an auger of a small-sized rotary-auger snowplow / M. F. Zakirov // *IOP Conference Series:*

Materials Science and Engineering : International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года. – Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012043. – DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012043.

181. Zhang, Qiang & Xu, Wei-ya & Liu, Qin-ya & Meng, Qingxiang. (2017). A novel non-overlapping approach to accurately represent 2D arbitrary particles for DEM modelling. *Journal of Central South University*. 24. 190-202. 10.1007/s11771-017-3420-1.

182. Zhao L., Yu Z., Zhu F., Qi X., Zhao S. CFD-DEM modeling of snowdrifts on stepped at roofs. *Wind and Structures*. 2016;23(6):523542.

183. Zheng, Zumei & Zang, Mengyan & Chen, Shunhua & Zhao, Chunlai. (2016). An improved 3D DEM-FEM contact detection algorithm for the interaction simulations between particles and structures. *Powder Technology*. 305. 308-322. 10.1016/j.powtec.2016.09.076.

184. Ziad B. Two-way coupled Eulerian-Eulerian finite volume simulation of drifting snow [Disertacija]. Zagreb: Sveučilišteu Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018 [pristupljeno 23.12.2021.] Dostupnana: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:198563>.

185. 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.

186. 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.

Приложение А

(справочное)

**СПЕЦМАШИНА**

Интеллектуальные Технологии Машиностроения

Адрес: ул. Урицкого, 36, офис 105, Курган, Россия, 640002

Телефон: +7 (3522) 44-36-20

Эл. почта: office@itm-spm.ru

Акт

внедрения инженерной методики проектирования рабочего оборудования
роторного снегоочистителя

В ООО «Интеллектуальные технологии машиностроения «Машины специального назначения»» (ООО «ИТМ«Спецмашина») внедрена методика проектирования рабочего оборудования роторного снегоочистителя, разработанная Алешковым Д.С.

Методика позволяет определять основные конструктивные и технологические параметры двухступенчатых фрезерно-роторных снегоочистителей с использованием ЭВМ.

Методика включает в себя обобщенные расчетные схемы, математическую модель работы элементов рабочего оборудования роторного снегоочистителя, алгоритм определения основных геометрических и кинематических параметров питателя и метательного аппарата, силовых параметров их работы в процессе транспортирования снежной массы на основе программного продукта.

Применение методики позволяет снизить трудоемкость разработки рабочего оборудования роторного снегоочистителя и обеспечить заявленные технические характеристики в процессе эксплуатации.

Заместитель генерального директора
ООО «ИТМ«Спецмашина»

МП



/Е.А. Емельянов/

8-912-833-06-12

e-mail: emelyanov_ea@itm-spm.ru

Приложение Б

(справочное)

**СПЕЦМАШИНА**

Интеллектуальные Технологии Машиностроения

Адрес: ул. Урицкого, 36, офис 105, Курган, Россия, 640002

Телефон: +7 (3522) 44-36-20

Эл. почта: office@itm-spm.ru

Отзыв

на описание конструкции двухступенчатого роторного снегоочистителя
отбрасывающего действия

В ООО «Интеллектуальные технологии машиностроения «Машины специального назначения»» (ООО «ИТМ«Спецмашина») рассмотрено описание конструкции двухступенчатого роторного снегоочистителя отбрасывающего действия с вертикальным питателем, разработанная Алешковым Д.С.

Данная конструкция представляет собой оригинальную альтернативу горизонтальному питателю роторного снегоочистителя. Обладает рядом конкурентных преимуществ таких как низкая металлоемкость, технологичность в изготовлении, возможность использования полимерных материалов в конструкции вертикального ротора. На основании заявленных характеристик может быть использована в качестве навесного оборудования на машины средней мощности, подходит для разработки больших снежных массивов, возможно использование как самостоятельно, так и в отряде дорожных машин при устройстве зимников.

Ожидаемые эксплуатационные технические характеристики такой конструкции не будут уступать, аналогичным моделям роторных снегоочистителей. Рекомендовано изготовление опытного образца.

Заместитель генерального директора
ООО «ИТМ«Спецмашина»



/Е.А. Емельянов/

8-912-833-06-12
e-mail: emelyanov_ea@itm-spm.ru

Приложение В
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 215725

**Снегоочиститель отбрасывающего действия с
вертикальным ротором**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)" (RU)*

Авторы: *Алешков Денис Сергеевич (RU), Суковин Михаил Владимирович (RU), Агапов Максим Евгеньевич (RU), Трофимов Борис Сергеевич (RU), Корчагин Павел Александрович (RU), Тетерина Ирина Алексеевна (RU)*

Заявка № **2022116926**

Приоритет полезной модели **23 июня 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации **23 декабря 2022 г.**

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает **23 июня 2032 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b50077e14e427112a79e5b24145a5c7
Идентификатор: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2011-02-26 по 26-05-2023

Ю.С. Зубов



Приложение Г
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022681022

**Расчет снежного вала при работе роторного
снегоочистителя**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)" (RU)*

Авторы: *Алешков Денис Сергеевич (RU), Суковин Михаил Владимирович (RU), Трофимов Борис Сергеевич (RU), Тетерина Ирина Алексеевна (RU)*

Заявка № **2022680210**

Дата поступления **01 ноября 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 ноября 2022 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b80077c14c39f0394eb024145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.11.2022 по 26.05.2023.

Ю.С. Зубов

Приложение Д
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 177929

Питатель фрезерно-роторного снегоочистителя

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)" (RU)*

Авторы: *Щербаков Виталий Сергеевич (RU),
Алешков Денис Сергеевич (RU)*

Заявка № 2017125543

Приоритет полезной модели 17 июля 2017 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 16 марта 2018 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 17 июля 2027 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 Г.П. Ильин



Приложение Е
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 151371

**ФРЕЗА ПИТАТЕЛЯ ФРЕЗЕРНО-РОТОРНОГО
СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014137230

Приоритет полезной модели 15 сентября 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 02 марта 2015 г.

Срок действия патента истекает 15 сентября 2024 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Приложение Ж

(справочное)

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ

Основные параметры снегоочистителей

В соответствии с ГОСТ 15840-70, к основным параметрам снегоочистителей относятся параметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры роторных снегоочистителей

Характеристика	Определение
Производительность роторного снегоочистителя: -объемная производительность; - производительность снегоочистителя по массе.	P , м ³ /ч Q , т/ч
Эффективная производительность снегоочистителя	$P_{эф}$, м ³ /ч·м $Q_{эф}$, т/ч·м
Дальность отброса снега	L , м
Ширина захвата снегоочистителя	B , м
Высота убираемого слоя снега	h , м

Так же ГОСТ 15840-70 вводит основные параметры роторных снегоочистителей (см. таблица 2).

Таблица 2 – Основные параметры фрезерного питателя роторного снегоочистителя

Характеристика	Определение
Диаметр фрезы	D_f , м
Диаметр ротора	D_p , м
Ширина ротора снегоочистителя	B_p , м

Фрезерный питатель роторного снегоочистителя

Методика адаптирована на фрезы маломощных и средней мощности фрезерно-роторных снегоочистителей. Алгоритм методики представлен на рисунке 1.

Порядок выбора основных параметров заключается в следующем:

1) В качестве исходных данных следует принимать основные параметры, согласно ГОСТ 15840-70, представленные в таблицах 1 и 2. В данной методике исходными параметрами являются производительность снегоочистителя по массе, Q , кг/с, и ширина захвата, B , м.

2) По заданной, Q , определяем по рисунку 2, ориентировочное значение поступательной скорости роторного снегоочистителя, V , м/с, и радиус фрезы R_f , м, питателя. Необходимо учесть, что заданную производительность по массе, необходимо разделить на 2, т.к. все вычисления выполняются для одной половины питателя, что обусловлено наличием вертикальной плоскости симметрии.

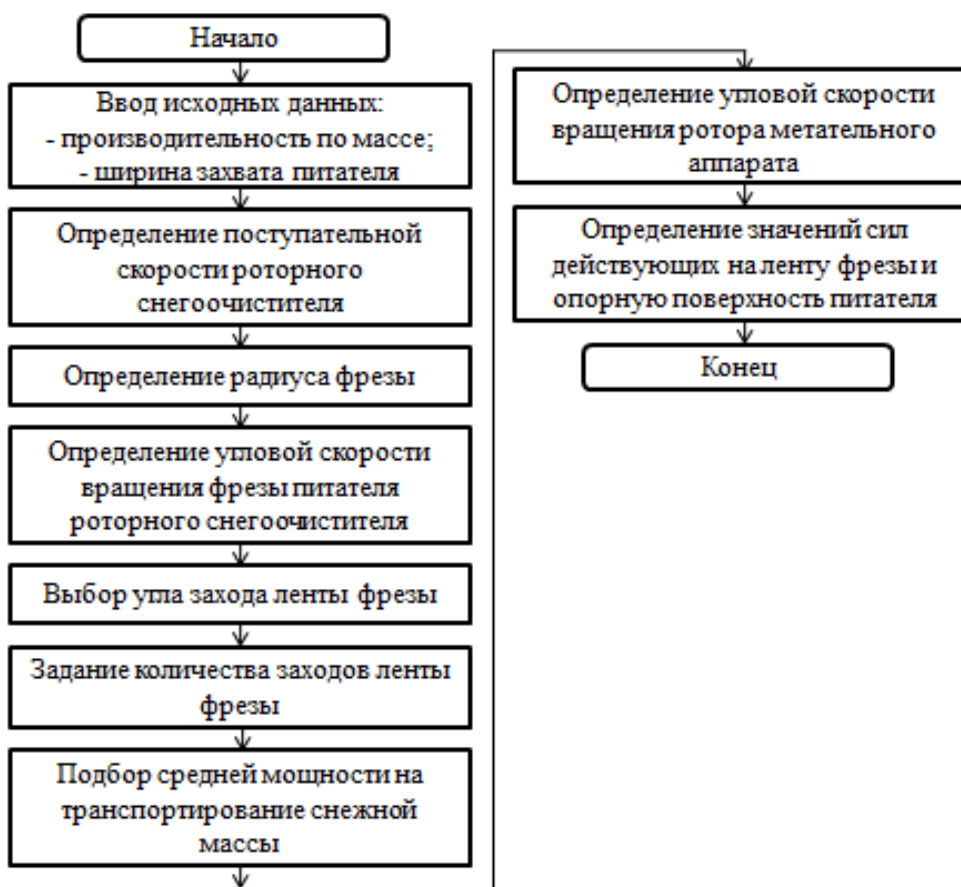


Рисунок 1 - Алгоритм определения основных параметров питателя роторного снегоочистителя

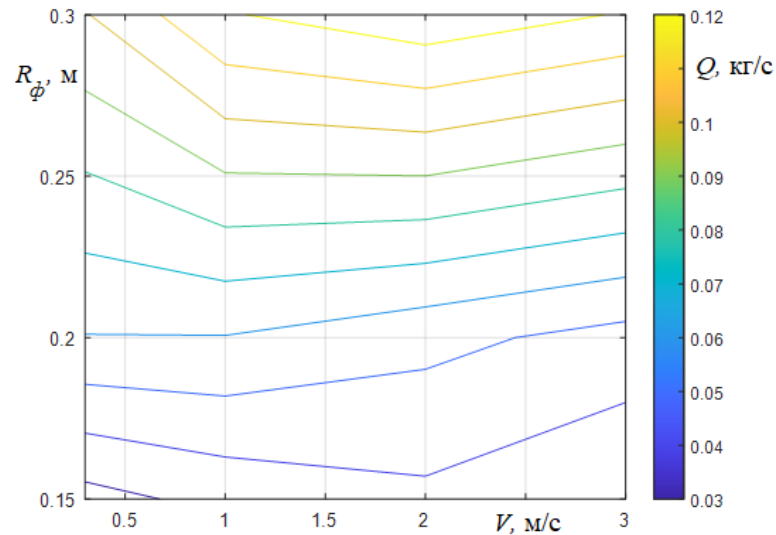


Рисунок 2 – Картограмма производительности по массе от радиуса трехзаходной фрезы и поступательной скорости роторного снегоочистителя

3) Для каждого диаметра фрезы, R_ϕ , м, имеется своя оптимальная величина поступательной скорости, V , м/с, с точки зрения отношения затрат мощности на производительность, NP , Вт·с/кг. Задаваясь радиусом фрезы, R_ϕ , м, по рисунку 3 подбираем величину поступательной скорости роторного снегоочистителя, V , м/с, из условия его максимальной энергоэффективности.

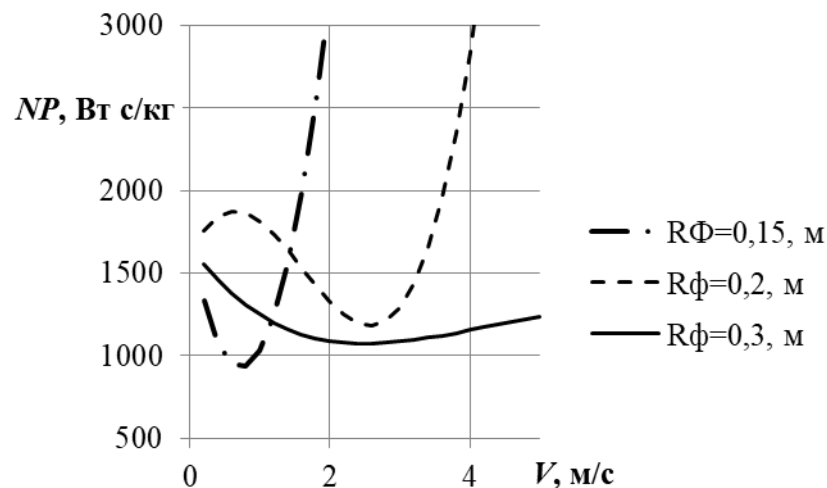


Рисунок 3. – Зависимость энергоэффективности от поступательной скорости роторного снегоочистителя, V , при различных радиусах горизонтальной фрезы, R_ϕ , м

4) Для полученных значений, V , и, R_{ϕ} , уточняется величина весовой производительности, Q , кг/с, по формуле:

$$Q = -0,1154 + 0,06778 \cdot V + 1,17 \cdot R_{\phi} - 0,0001 \cdot V^2 - 0,6113 \cdot V \cdot R_{\phi} - 1,619 \cdot R_{\phi}^2 + 0,0006 \cdot V^3 - 0,038 \cdot V^2 \cdot R_{\phi} + 1,716 \cdot V \cdot R_{\phi}^2$$

5) Определяем минимальное значение угловой скорости вращения фрезы питателя, ω_{ϕ} , рад/с, из условия:

$$\omega_{\phi} \geq \frac{V}{R_{\phi}}$$

Чем больше значение, ω_{ϕ} , тем менее эффективно транспортируется снежная масса в загрузочное окно.

6) Угол захода ленты фрезы, выбирается из условия равенства длины фрезы одному полному витку. Для определения угла захода ленты фрезы используется уравнение:

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{B}{2R_{\phi}}$$

7) При назначении числа заходов ленты фрезерного рабочего органа роторного снегоочистителя необходимо помнить, что на каждый заход потребляемая мощность возрастает. Так, для фрез с углом захода, $\theta=20^{\circ}$, угловой скоростью 10 рад/с и размером снежных частиц 0,01м, от 5 Вт при $R_{\phi}=0,15$ м, до 25 Вт при $R_{\phi}=0,3$ м. Для фрез с углом захода, $\theta=10^{\circ}$, увеличение затрачиваемой мощности на каждый заход достигает 90 Вт. Наиболее распространенная конструктивная схема – использование $n_3 = 2$ заходных фрез для роторных снегоочистителей малой мощности и $n_3 = 3$ заходных фрез для роторных снегоочистителей средней мощности.

8) Используя картограммы удельных энергозатрат от угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_c=0,01 \dots 0,03$ м, при числе заходов

фрезы, $n_3=3$ (рисунки 4, 5), определяем угол захода ленты фрезы, θ , роторного снегоочистителя.

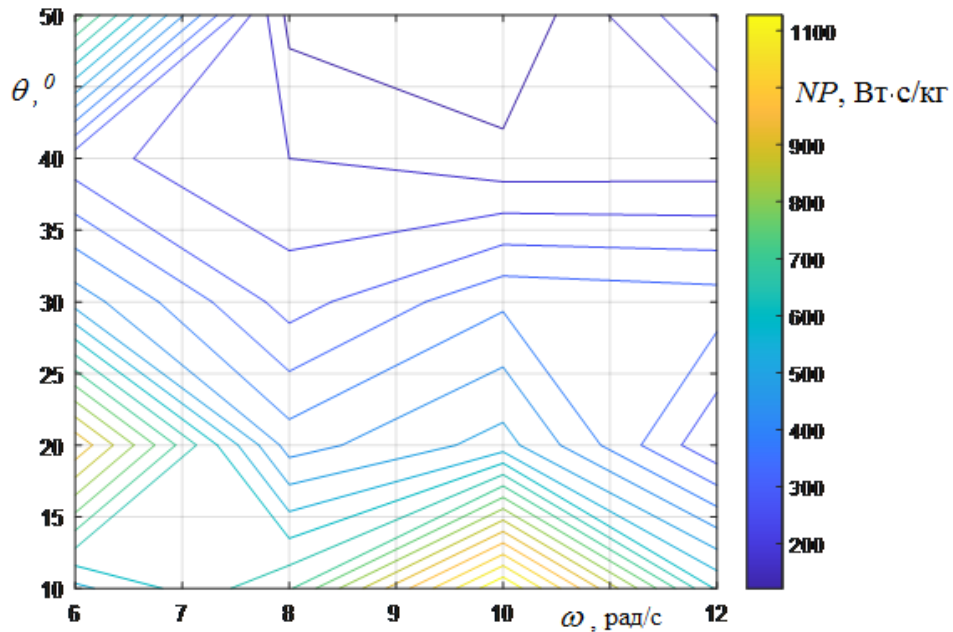


Рисунок 4 – Картограмма удельных энергозатрат угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_q=0,01$ м, при числе заходов фрезы, $n_3=3$

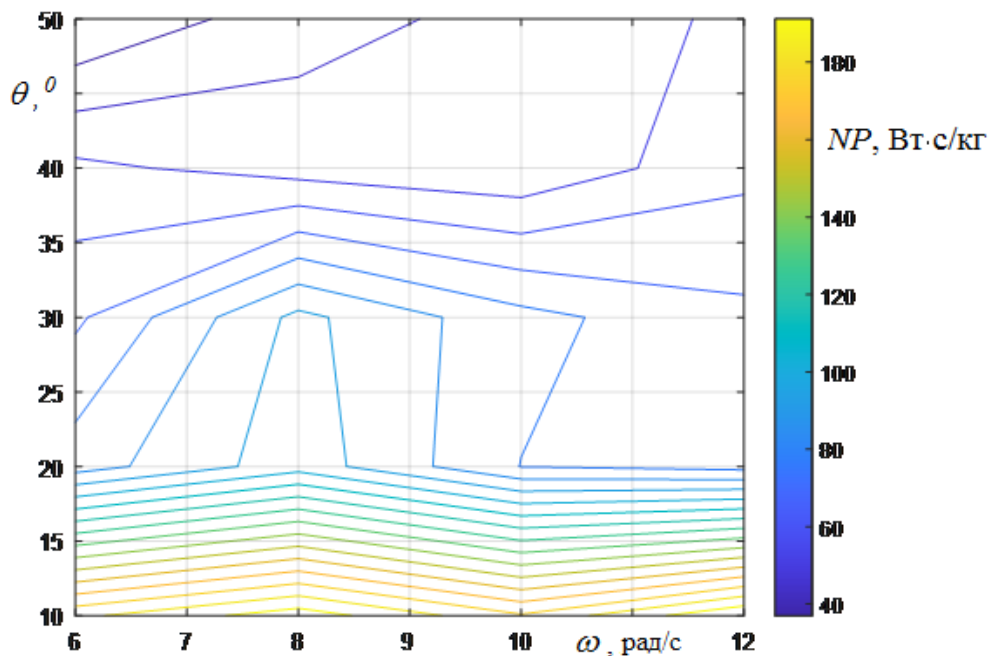


Рисунок 5 – Картограмма удельных энергозатрат угла захода ленты фрезы, θ , и угловой скорости вращения фрезы, ω , для характерного размера транспортируемых частиц снежной массы, $r_q=0,03$ м, при числе заходов фрезы, $n_3=3$

Также среднее значение мощности необходимое для транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой питателя роторного снегоочистителя оценивается по графикам Приложения 3.

9) Определяем ориентировочное значение угловой скорости вращения, ω_p , рад/с, ротора метательного аппарата роторного снегоочистителя из условия захвата всех частиц, поступивших в межлопастное пространство ротора за один оборот фрезы питателя, по рисунку 6. Чем больше величина, ω_p , тем больше дальность отброса снежной массы.

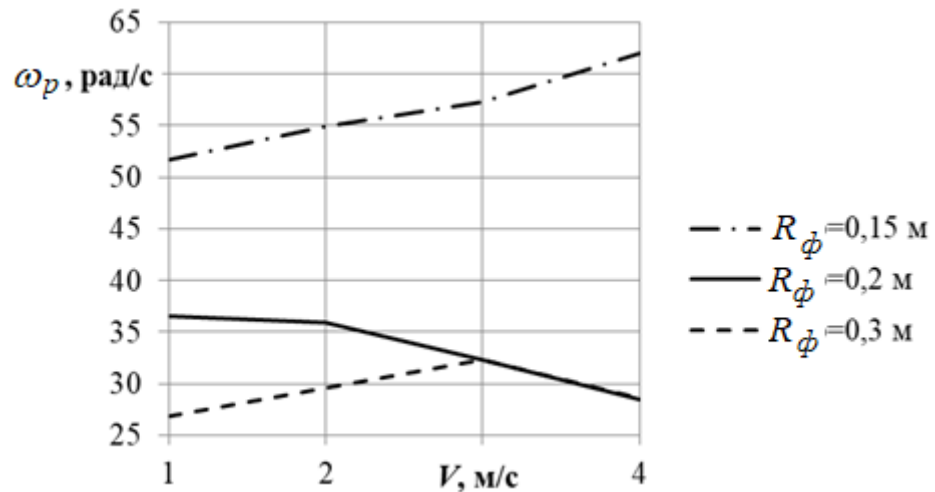


Рисунок 6 – Угловая скорость вращения, ω_p , рад/с, ротора метательного аппарата роторного снегоочистителя в зависимости от радиуса фрезы, R_{ϕ} , и поступательной скорости роторного снегоочистителя, V

10) Силы, действующие на фрезу и опорную поверхность (отвал питателя) роторного снегоочистителя, могут быть оценены по картограммам Приложения 3.

Приложение 3

(справочное)

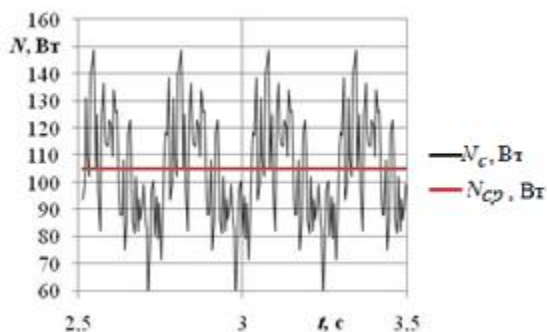


Рисунок 1.1 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=10^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=6$ рад/с

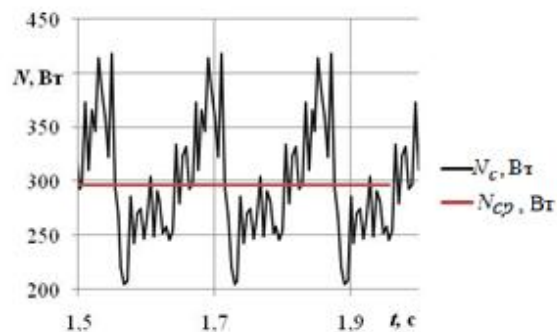


Рисунок 1.3 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=10^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=10$ рад/с

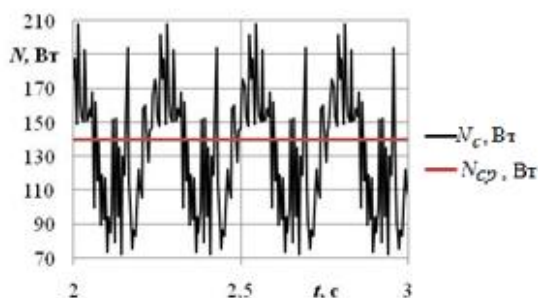


Рисунок 1.2 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=10^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=8$ рад/с

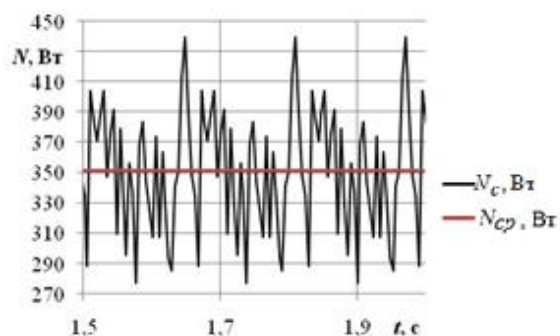


Рисунок 1.4 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=10^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=12$ рад/с

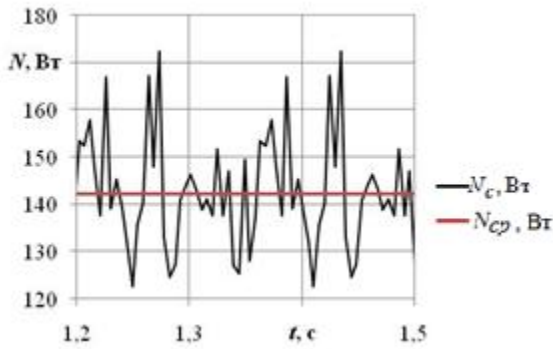


Рисунок 1.5 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=6$ рад/с

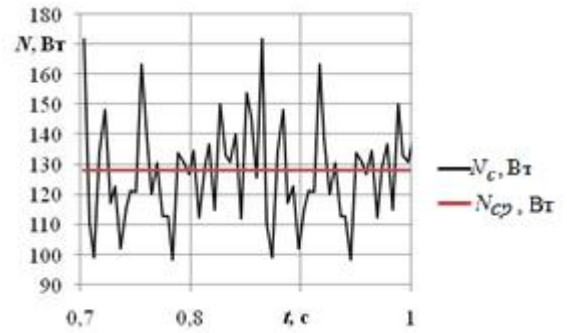


Рисунок 1.7 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=10$ рад/с

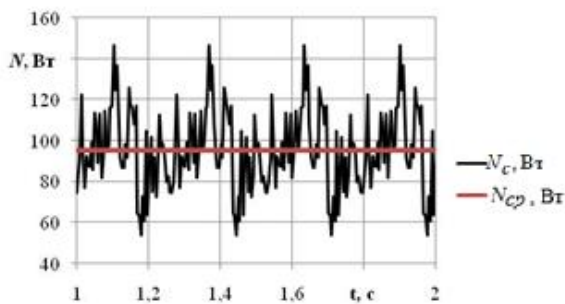


Рисунок 1.6 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=8$ рад/с

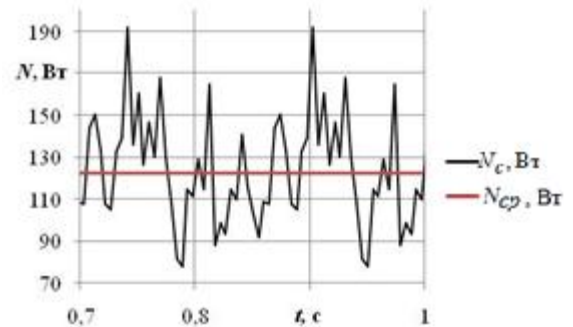


Рисунок 1.8 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=12$ рад/с

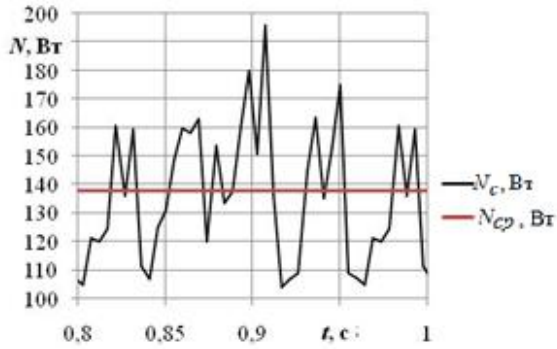


Рисунок 1.9 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=6$ рад/с

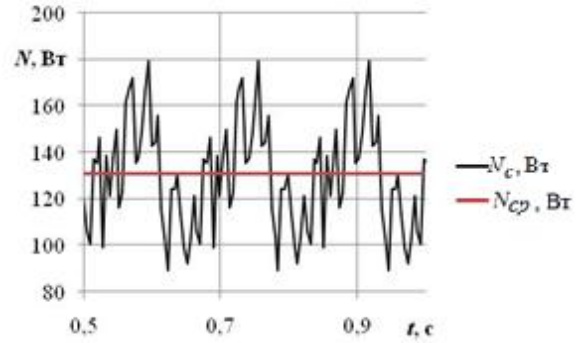


Рисунок 1.11 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=10$ рад/с

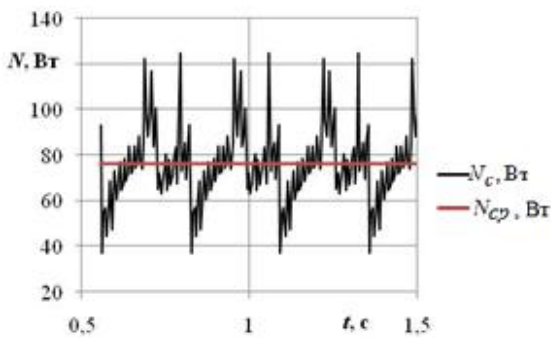


Рисунок 1.10 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=8$ рад/с

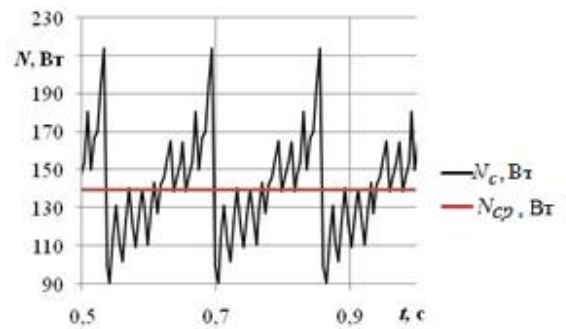


Рисунок 1.12 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=12$ рад/с

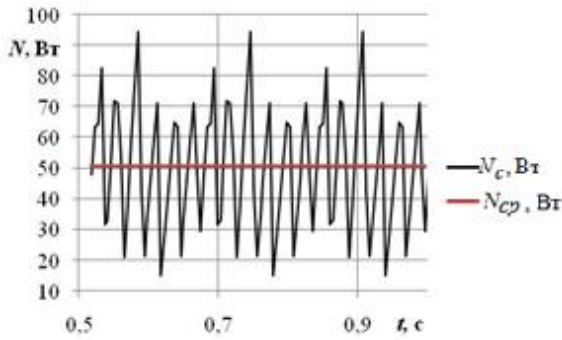


Рисунок 1.13 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=40^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 6$ рад/с

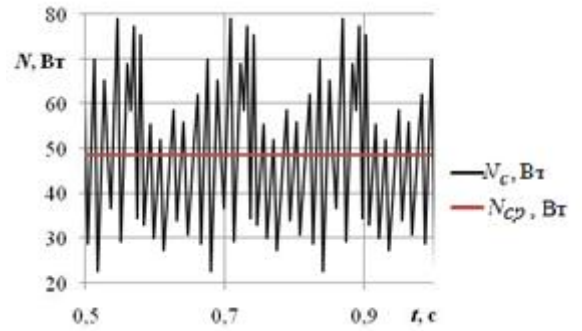


Рисунок 1.15 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=40^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 10$ рад/с

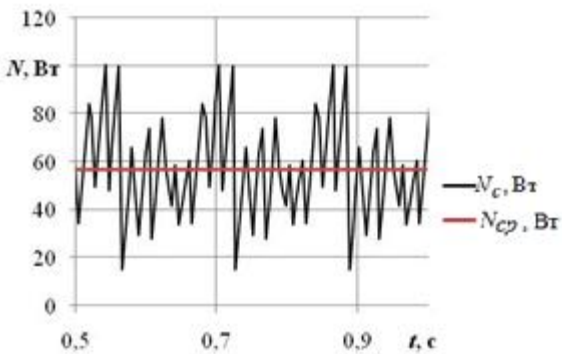


Рисунок 1.14 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=40^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 8$ рад/с

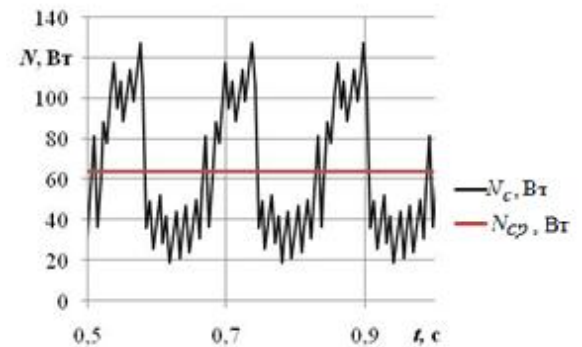


Рисунок 1.16 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=40^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 12$ рад/с

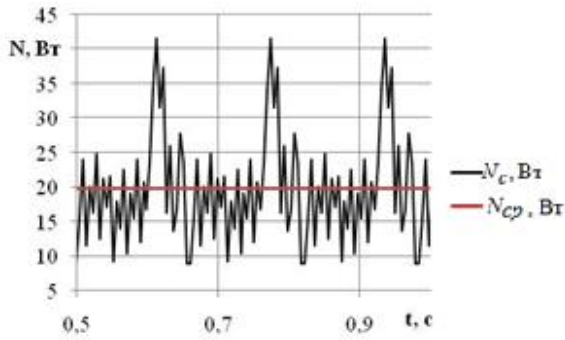


Рисунок 1.17 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=50^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 6$ рад/с

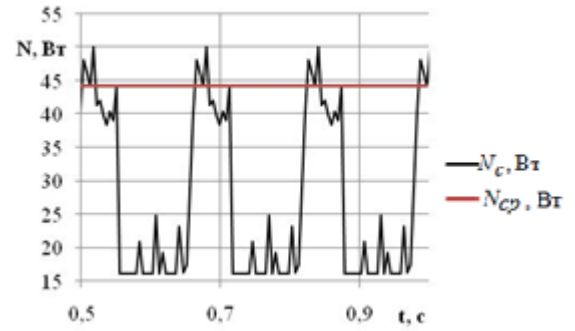


Рисунок 1.19 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=50^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 10$ рад/с

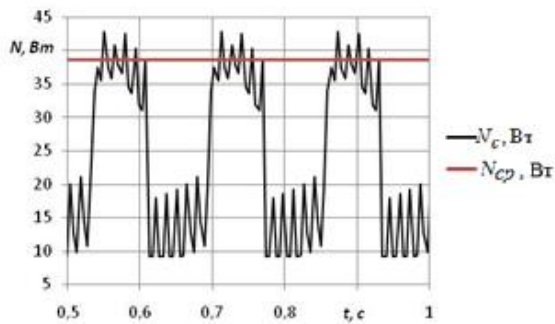


Рисунок 1.18 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=50^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 8$ рад/с

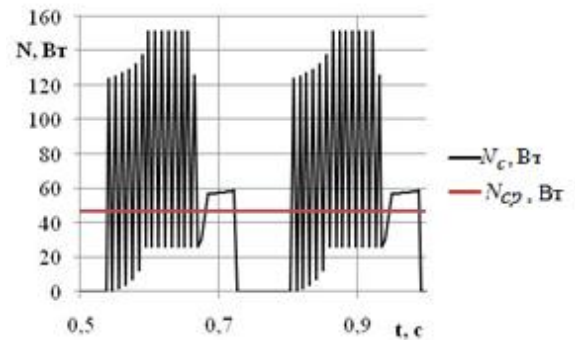


Рисунок 1.20 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=50^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 12$ рад/с

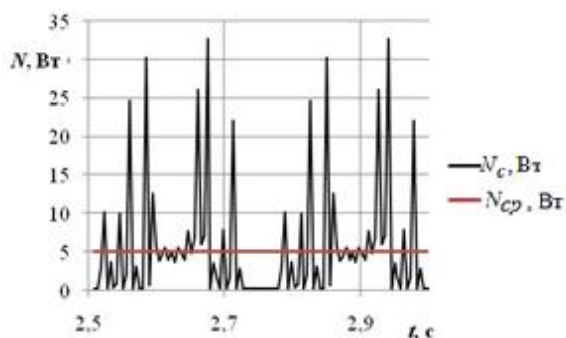


Рисунок 1.21 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=10^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 6$ рад/с

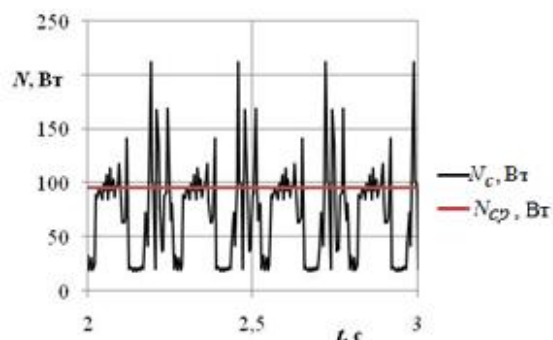


Рисунок 1.23 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=10^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 10$ рад/с

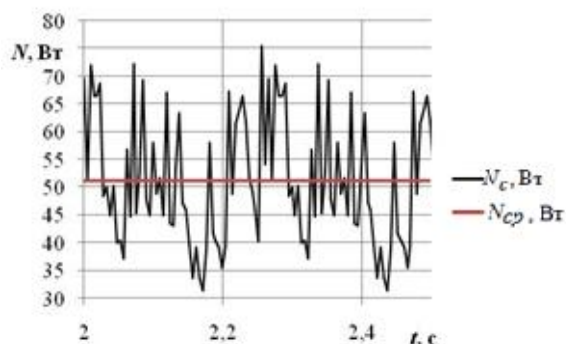


Рисунок 1.22 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=10^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 8$ рад/с

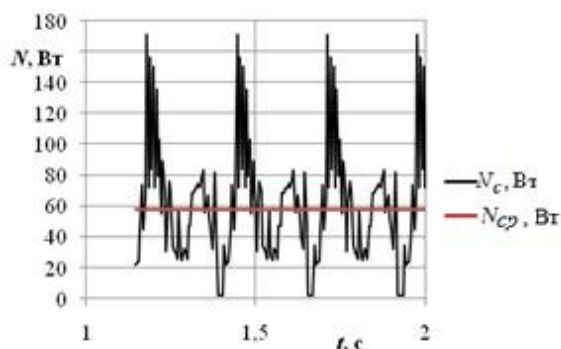


Рисунок 1.24 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=10^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 12$ рад/с

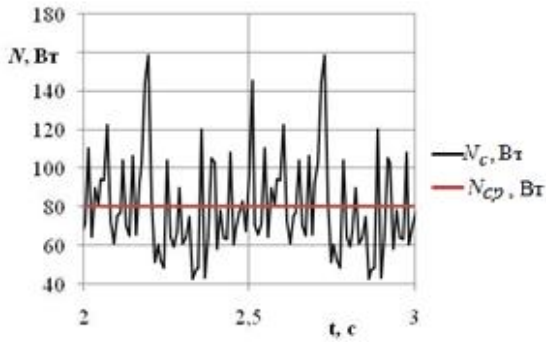


Рисунок 1.25 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 6$ рад/с

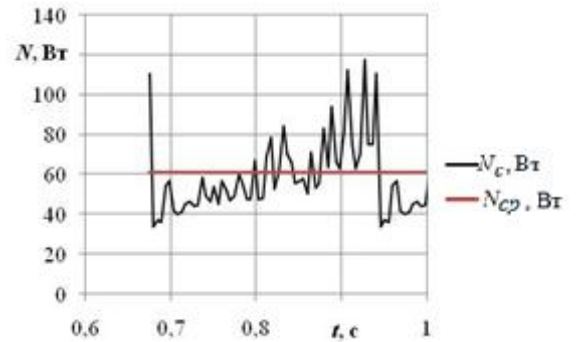


Рисунок 1.27 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 10$ рад/с

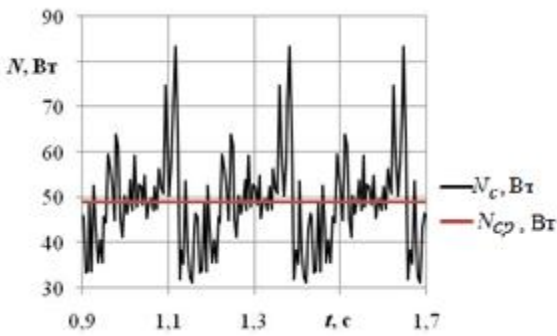


Рисунок 1.26 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 8$ рад/с

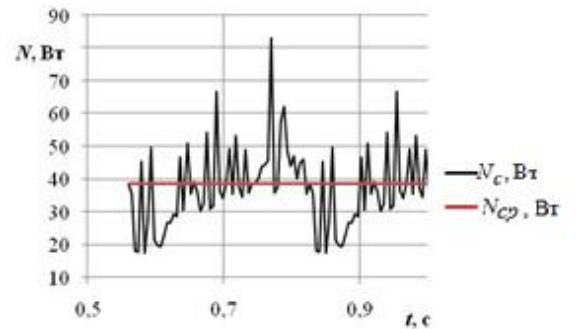


Рисунок 1.28 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 12$ рад/с

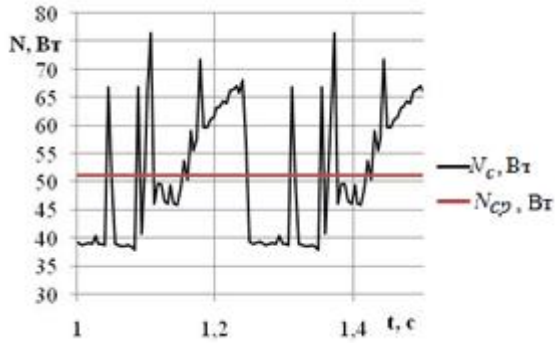


Рисунок 1.29 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 6$ рад/с

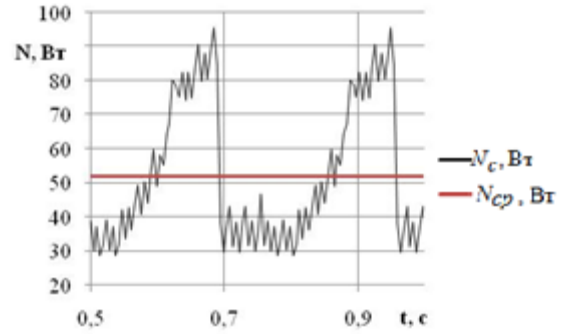


Рисунок 1.31 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 10$ рад/с

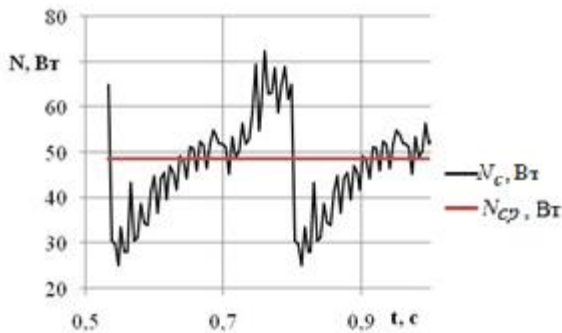


Рисунок 1.30 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 8$ рад/с

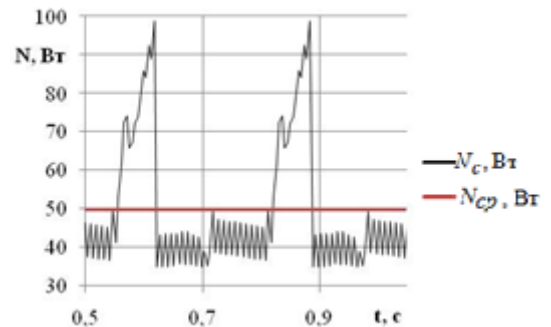


Рисунок 1.32 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 12$ рад/с

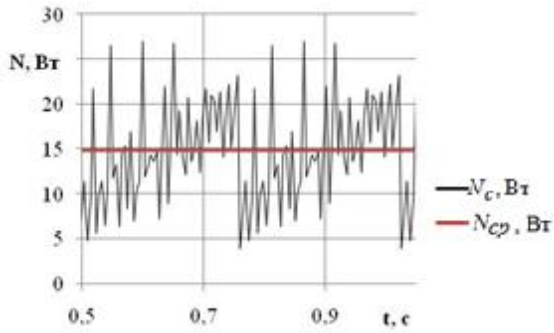


Рисунок 1.33 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=40^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 6$ рад/с

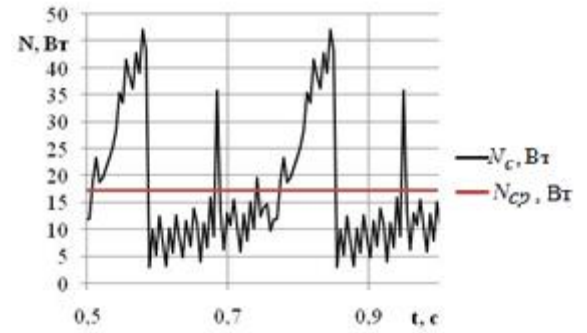


Рисунок 1.35 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=40^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 10$ рад/с

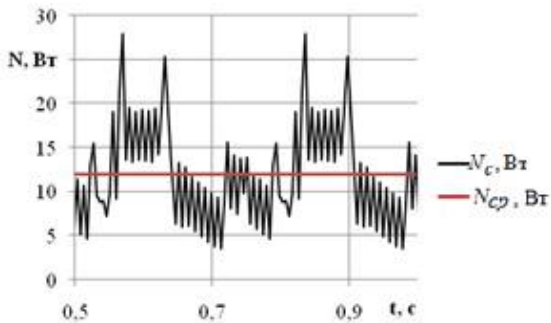


Рисунок 1.34 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=40^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 8$ рад/с

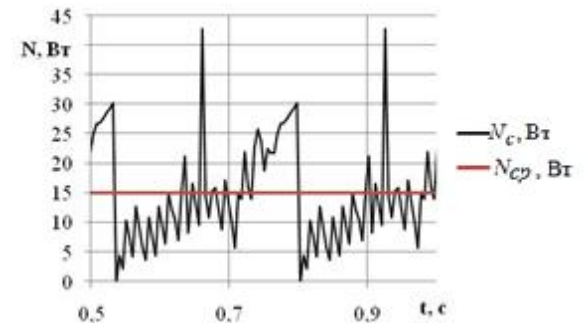


Рисунок 1.36 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=40^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 12$ рад/с

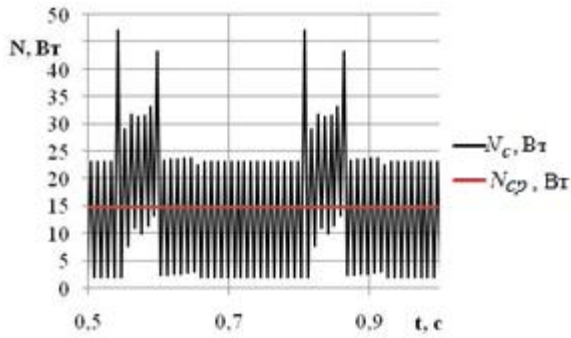


Рисунок 1.37 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=50^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 6$ рад/с

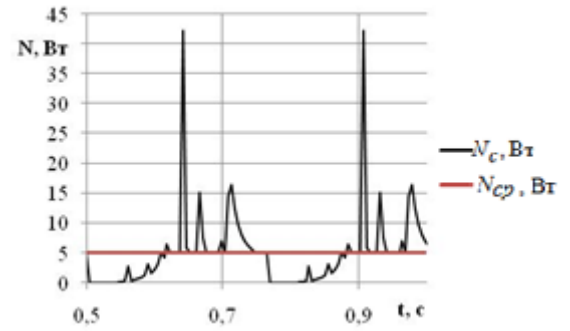


Рисунок 1.39 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=50^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 10$ рад/с

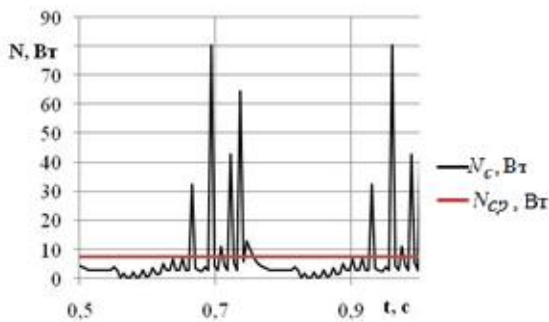


Рисунок 1.38 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=50^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 8$ рад/с

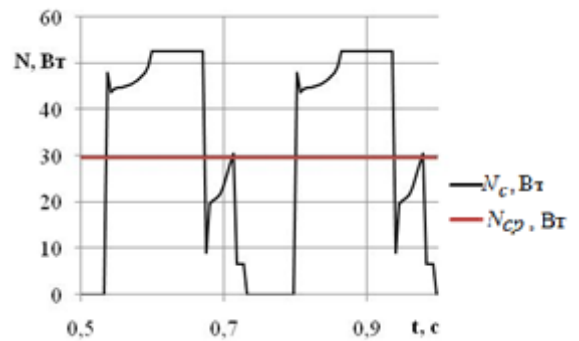


Рисунок 1.40 – Изменение суммарной мощности, N_c , и средней мощности, N_{cp} , в зависимости от времени при установившемся процессе транспортирования снежной массы трехзаходной фрезой с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,01$ м, при угле захода $\theta=50^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi = 12$ рад/с

Приложение И

(справочное)

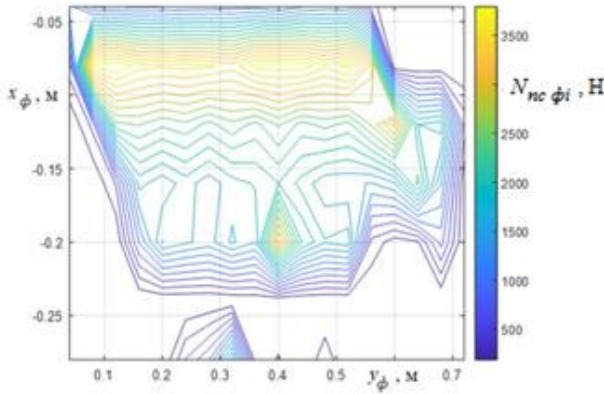


Рисунок 1.1 – Изменение силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{nc\phi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi}=6$ рад/с

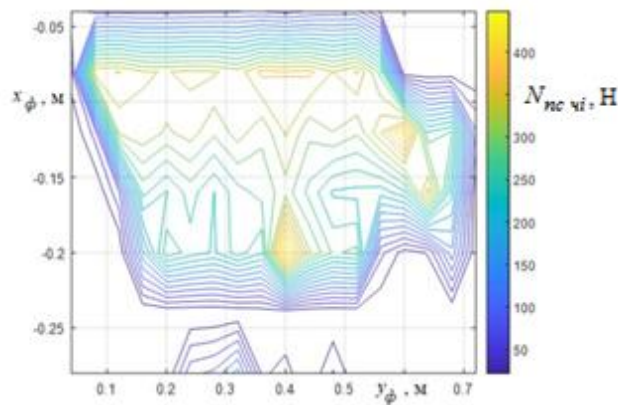


Рисунок 1.2 – Изменение силы нормальной реакции опорной поверхности питателя, $N_{nc\chi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi}=6$ рад/с

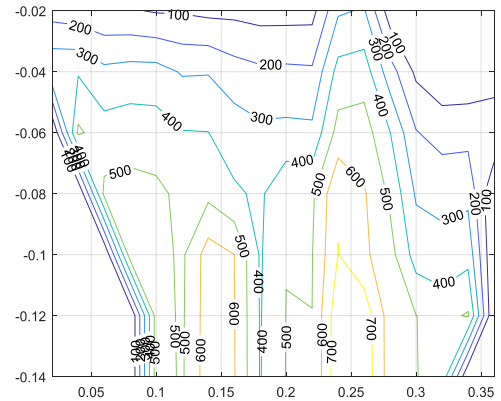


Рисунок 1.3 – Изменение силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{nc\phi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi}=8$ рад/с

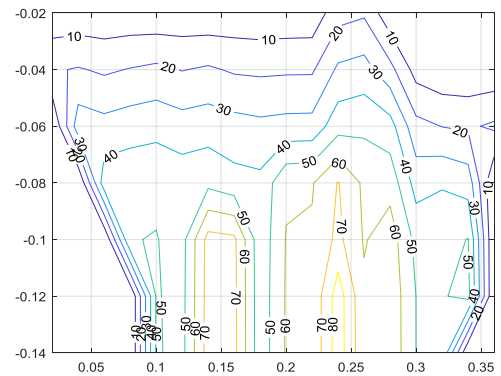


Рисунок 1.4 – Изменение силы нормальной реакции опорной поверхности питателя, $N_{nc\chi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi}=8$ рад/с

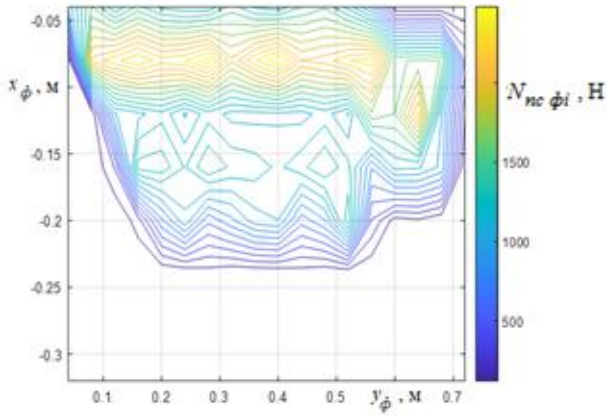


Рисунок 1.5 – Изменение силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{nc \phi_i}$, в зависимости от координат x_ϕ , м, и y_ϕ , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=10$ рад/с

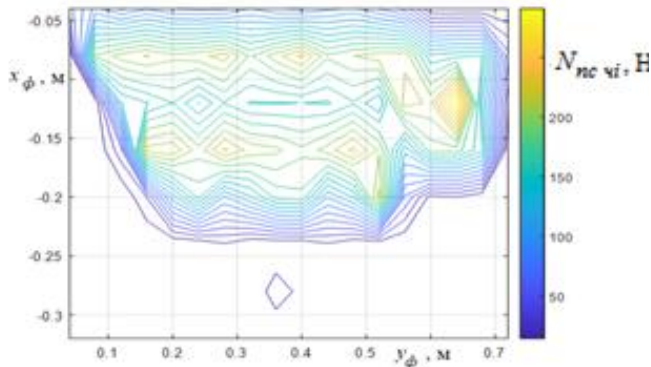


Рисунок 1.6 – Изменение силы нормальной реакции опорной поверхности питателя, $N_{nc \chi_i}$, в зависимости от координат x_ϕ , м, и y_ϕ , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=10$ рад/с

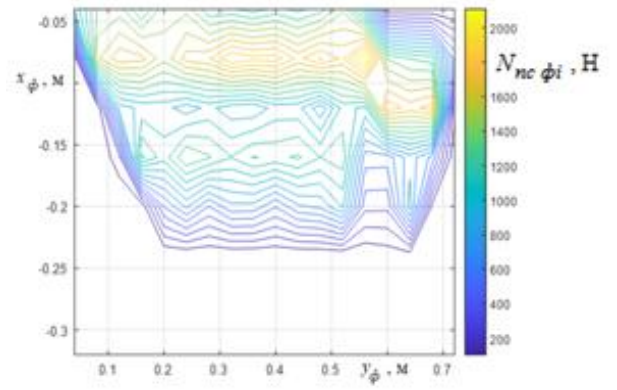


Рисунок 1.7 – Изменение силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{nc \phi_i}$, в зависимости от координат x_ϕ , м, и y_ϕ , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=12$ рад/с

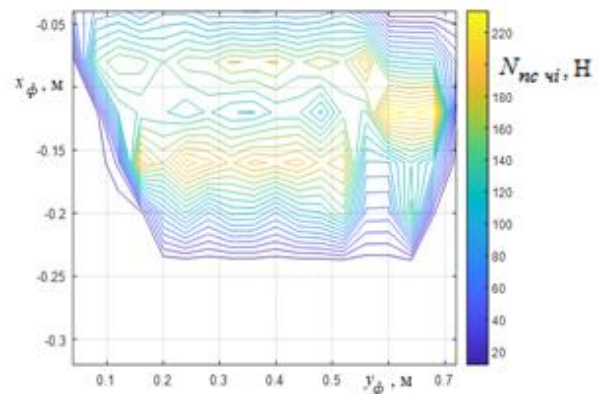


Рисунок 1.8 – Изменение силы нормальной реакции опорной поверхности питателя, $N_{nc \chi_i}$, в зависимости от координат x_ϕ , м, и y_ϕ , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=20^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_\phi=12$ рад/с

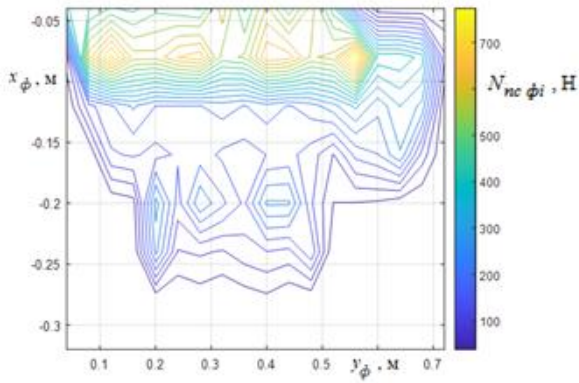


Рисунок 1.9 – Изменение силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{nc \phi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi} = 6$ рад/с

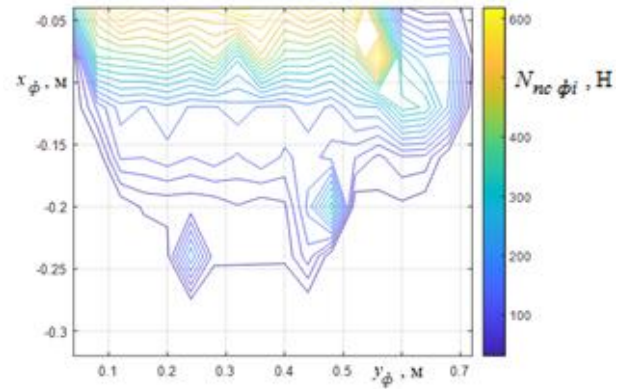


Рисунок 1.11 – Изменение силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{nc \phi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi} = 8$ рад/с

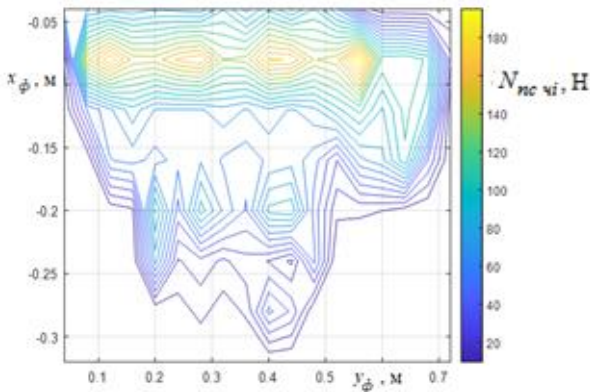


Рисунок 1.10 – Изменение силы нормальной реакции опорной поверхности питателя, $N_{nc \chi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi} = 6$ рад/с

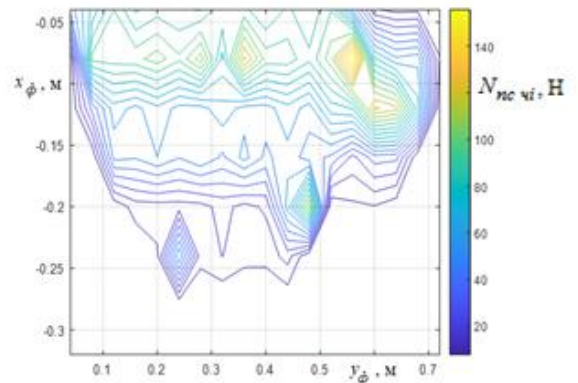


Рисунок 1.12 – Изменение силы нормальной реакции опорной поверхности питателя, $N_{nc \chi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi} = 8$ рад/с

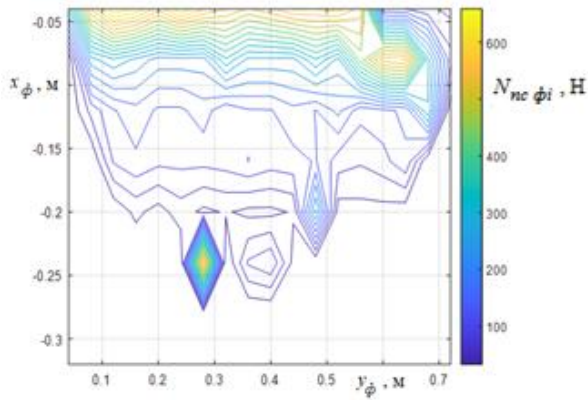


Рисунок 1.13 – Изменение силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{nc \phi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi} = 10$ рад/с

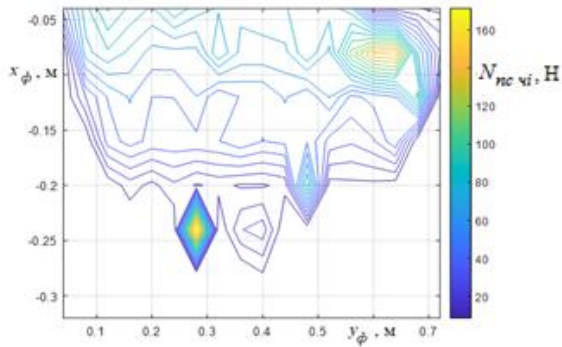


Рисунок 1.14 – Изменение силы нормальной реакции опорной поверхности питателя, $N_{nc \chi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi} = 10$ рад/с

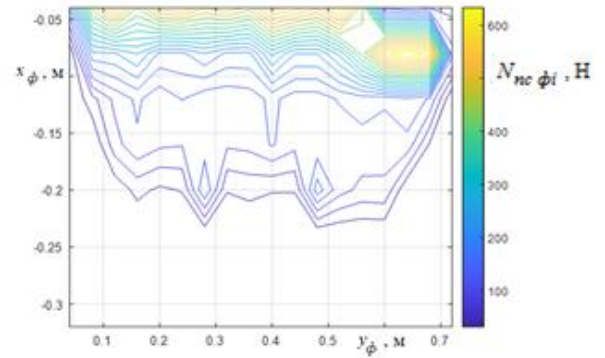


Рисунок 1.15 – Изменение силы нормальной реакции ленты фрезы, $N_{nc \phi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi} = 12$ рад/с

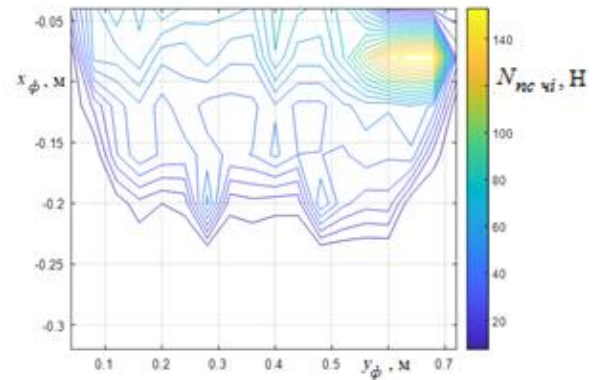


Рисунок 1.16 – Изменение силы нормальной реакции опорной поверхности питателя, $N_{nc \chi i}$, в зависимости от координат x_{ϕ} , м, и y_{ϕ} , в процессе транспортирования снежной массы лентой фрезы с характерным размером частиц $r_{ci} = 0,02$ м, при угле захода $\theta=30^0$ и угловой скорости вращения рабочего органа $\omega_{\phi} = 12$ рад/с