

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

На правах рукописи



Аюпова Наталья Юрьевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПИТАТЕЛЯ
ФРЕЗЕРНО-РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ**

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

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

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:
кандидат технических наук,
доцент Д. С. Алешков**

Омск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Обзор и классификация роторных снегоочистителей.....	11
1.2. Обзор предшествующих исследований по выбору параметров фрезерно- роторных снегоочистителей.....	27
1.3. Обзор предшествующих исследований по физико-механическим свойствам снега.....	35
1.4 Цель и задачи исследования.....	48
Основные выводы по главе.....	49
2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ. СТРУКТУРА РАБОТЫ.....	50
2.1 Общая методика исследований.....	50
2.2 Методика теоретических исследований.....	54
2.3 Методы экспериментальных исследований и обработка полученных данных.....	56
2.4 Структура работы.....	59
Основные выводы по главе.....	61
3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ПИТАТЕЛЯ ФРЕЗЕРНО- РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ.....	63
3.1 Исследование кинематики движения фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.....	63
3.2 Определение теоретического объема снежной массы, вырезаемого фрезой питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.....	71
3.3 Динамика снежного массива в питателе фрезерно-роторного снегоочистителя.....	82
Основные выводы по главе.....	97
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	99
4.1 Критерии эффективности.....	99

4.2 Методика оптимизации основных конструктивных и технологических параметров.....	105
4.3. Определение влияния числа заходов ленты фрезы на удельную мощность рабочего процесса питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.....	109
4.4 Определение положения снежной частицы в области загрузочного окна питателя.....	111
4.5 Функциональные зависимости. Регрессионные модели.....	114
4.6 Определение траектории движения снежных частиц при сходе с ленты фрезы.....	125
Основные выводы по главе.....	132
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРЕЗЕРНО-РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ.....	134
5.1 Объект экспериментального исследования фрезерно-роторного снегоочистителя.....	134
5.2 План эксперимента и измерительные приборы.....	136
5.3 Анализ результатов экспериментального исследования фрезерно-роторного снегоочистителя.....	143
5.4. Рекомендации по технической (инженерной) реализации.....	147
Основные выводы по главе.....	150
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	151
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	153
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	156
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	176

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В нашей стране, учитывая географическое положение, проблема борьбы со снежными заносами существовала всегда. В связи с тем, как растут города, как резко увеличивается число автомобилей и автомобильных перевозок, проблема зимнего содержания производственных территорий, улиц, автомобильных дорог, загородных скоростных магистралей, взлетно-посадочных полос аэродромов актуальна, особенно в условиях освоения арктических территорий России [91, 92]. Таким образом, вопросы интенсификации технологического процесса очистки от снега являются одними из приоритетных.

Снег на территории Российской Федерации составляет в среднем 26...30% годового количества осадков, и не менее 75...80% снега удаляется снегоочистителями непосредственно с дорог. Снежный покров в Российской Федерации лежит около 6 месяцев. Актуальность проблемы существенно возрастает, когда она рассматривается применительно к зимним условиям эксплуатации в разных районах Сибири и Крайнего Севера.

В зимний период 2018-2019 года максимальная высота снежного покрова в среднем по России значительно превысила климатическую норму и вошла в десятку наибольших значений за рассматриваемый период. Максимальная высота снежного покрова превысила норму на большей части европейской территории. На азиатской территории страны значительные положительные аномалии максимальной высоты снежного покрова отмечены на севере Западной Сибири, в северных районах Якутии, на Чукотке. В 2019 г. аномальные снегопады были отмечены на территориях Архангельской, Вологодской, Новгородской области и в Республике Коми [48].

При проведении снегоочистных работ задействуется множество разнообразной дорожно-строительной техники: плужные снегоочистители, плужно-щеточные, плужно-роторные, шнекороторные, фрезерно-роторные, всевозможные погрузчики, самосвалы.

Одним из актуальных направлений борьбы со снежными заносами является использование фрезерно-роторных снегоочистителей (ФРС), что обусловлено их способностью выполнять практически полный цикл снегоуборочных работ, включая очистку подстилающей поверхности, последующую погрузку или отбрасывание снега в сторону на значительное расстояние, без образования снежных валов на обочине [16], что минимизирует заносимость подстилающей поверхности.

Степень разработанности темы

Вопросом исследований фрезерно-роторных снегоочистителей и усовершенствованием их конструкции занимались ряд ученых. Солонов Г.В., Эвентов И.М., Карабан Г.Л., Шалман Д.А. и др. провели экспериментально-теоретические исследования и обобщили материалы для инженерного расчета и конструирования фрезерно-шнекороторных снегоочистителей, привели материалы по технико-экономическому анализу и расчету экономической эффективности от применения новых конструкций снегоочистительных машин. Баловнев В.И. рассмотрел влияние снежной массы как материальной частицы и крупнокускового образования на работу ротора, кроме этого заложил основы физического моделирования снежной среды. Иванов А.Н., Мишин В.А. построили математическую модель движения материальной снежной частицы в питателе фрезерно-роторного снегоочистителя. Касинов Б.Н., Ермилов А.Б., Абрамов Л.Н., Бардачидзе И.А., Алешков Д.С. Соколов А.М. и др. продолжили рассмотрение и разработку вопроса взаимодействия снежной частицы с ротором метательного аппарата фрезерно-роторного снегоочистителя.

Объект исследования – рабочий процесс питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Предмет исследования – закономерности рабочего процесса взаимодействия питателя фрезерно-роторного снегоочистителя со снежным массивом.

Целью диссертационной работы является снижение удельной мощности работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

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

1. Усовершенствовать математическую модель динамической системы «фрезерно-роторный снегоочиститель – питатель – снежный массив».
2. Сформулировать критерий эффективности рабочего процесса питателя.
3. Выявить основные закономерности влияния конструктивных и технологических параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя на движение снежной массы.
4. Разработать методику определения основных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Научная новизна диссертационной работы

1. Усовершенствованная математическая модель динамической системы «фрезерно-роторный снегоочиститель – питатель – снежный массив» позволила произвести имитационное моделирование на ЭВМ процесса движения снежной массы.
2. Создана система моделирования работы фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, которая состоит из математической модели движения снежной частицы в питателе, алгоритма и методики определения основных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.
3. Получены аналитические зависимости между технологическими параметрами питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, физическими свойствами снежного массива и удельной мощностью рабочего процесса фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя. В результате проведенного регрессионного анализа факторов работы фрезы питателя впервые получены функциональные зависимости изменения длины участка ленты фрезы в области загрузочного окна и положения снежной частицы в питателе фрезерно-роторного снегоочистителя, позволяющие осуществлять прогноз основных технологических параметров фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

Теоретическая значимость работы заключается в реализации комплексного подхода при проектировании питателя фрезерно-роторного снегоочистителя – определению его технологических параметров из условия минимизации

энергоёмкости процесса транспортирования снежной массы в питателе фрезерно-роторного снегоочистителя. Методика определения основных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя используется при определении рациональных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя на этапе его проектирования.

Разработанные имитационная модель питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, алгоритм синтеза конструктивных параметров фрезерно-роторного снегоочистителя и пакет прикладных программ для ЭВМ могут быть использованы при проектировании фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя для определения ее основных характеристик в процессе обоснования технологических параметров питателя и фрезерно-роторного снегоочистителя.

Дальнейшее практическое использование полученных результатов позволяет повысить технико-экономические показатели работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя. Практические решения, базирующиеся на технической реализации полученных теоретических результатов, подтверждены патентом Российской Федерации на полезную модель.

Диссертация соответствует специальности 05.05.04 – «Дорожные, строительные и подъёмно-транспортные машины», пункту: 2 – методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения.

Методология и методы исследований

Комплексный метод научных исследований являлся основой выполнения диссертационного исследования. Теоретические исследования базировались на использовании методов теории численных решений математических задач с использованием вычислительной техники и имитационного моделирования взаимодействия фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя со снежным массивом, а так же научных положений теоретической механики применительно к фрезе питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Экспериментальные исследования заключались в проведении пассивного полнофакторного эксперимента с использованием экспериментальной установки питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

В процессе проведения диссертационных исследований использовались следующие пакеты прикладных программ: AutoCAD, MATLAB, Microsoft Visual Studio C#, STATISTICA, Windows Movie Maker.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованная математическая модель динамической системы «фрезерно-роторный снегоочиститель – питатель – снежный массив», включающая в себя систему дифференциальных и алгебраических уравнений.

2. Результаты теоретических исследований математической модели работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

3. Результаты исследований влияния технологических параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя на минимизацию потерь снежной массы при ее транспортировании и кинематические параметры снега в загрузочном окне.

4. Регрессионные зависимости изменения длины рабочего участка ленты фрезы в зависимости от конструктивных параметров питателя.

5. Методика определения основных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

6. Конструкция фрезы питателя, обеспечивающая снижение удельной мощности рабочего процесса питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Степень достоверности исследований обеспечена применением математических методов численных решений математических задач, аппроксимации и статистической обработки результатов исследования; достаточной степенью обоснованности принятых в работе допущений; проведением экспериментальных исследований и последующим сравнением полученных данных с результатами проведенных теоретических исследований, основанных на имитационном моделировании работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя; удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов работы

Результаты научных исследований докладывались на:

Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки (с международным участием) ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, 2012; Международной 66-й научно-практической конференции ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, 2012; Международной молодежной научно-практической конференции, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, 2014; Международной научно-практической конференции ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, 2014; III Международной научно-практической конференции, г. Курган, 2015; IV Международной научно-практической конференции ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, 2019; Научно-методических семинарах ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, 2012 – 2019.

Реализация результатов работы

Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ», используются при курсовом и дипломном проектировании при подготовке бакалавров по направлению 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», а также по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» на факультете «Нефтегазовая и строительная техника» ФГБОУ ВО «СибАДИ». Методика определения основных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя передана в АО «Омсктрансмаш».

Публикации по работе

По результатам проведенных диссертационных исследований было опубликовано 12 печатных научных работ, из которых 4 статьи в научно-рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы (161 наименование) и приложения. Общий объем диссертации

составляет 182 страницы основного текста, 107 рисунков, 17 таблиц, 4 приложения на 6 страницах.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Обзор и классификация роторных снегоочистителей

ФРС используются для проведения работ по очистке от свежесвыпавшего и уплотненного снега. Объектами его работы являются внутригородская дорожная и уличная сети, автомагистрали, взлетно-посадочные полосы аэродромов, и другие территории, а также для прокладывания зимних дорог в снежной целине [13].

На рисунке 1.1 представлены основные классификационные признаки роторных снегоочистителей. В работе рассматриваются фрезерно-роторные снегоочистители, которые по своим классификационным признакам соответствуют выделенным цветом прямоугольникам.

Проведем анализ современных тенденций развития снегоочистителей отбрасывающего действия на примере существующих моделей, которые образуют некоторое ограниченное множество U [14].

Шнекороторный снегоочиститель КО-605М (рисунок 1.2) выполнен по однодвигательной схеме и представляет собой колесное транспортное средство, смонтированное на базе автомобиля УРАЛ-43203-1211-10. Основной двигатель установлен на раме базовой машины. Автомобильный двигатель демонтирован.

У КО-605М главное отличие от других машин – это усовершенствованная конструкция метательного аппарата, загрузочная область которого выполнена коноидально, что обеспечивает свободный вход снежной массы в межлопастное пространство. Ротор метательного аппарата – дисковый, лопастной, что позволяет увеличить пропускную способность метательного аппарата и обеспечить одинаковую по величине и направлению скорость снежной массы в момент ее схода с лопасти ротора метательного аппарата ФРС [2, 50, 51, 81, 134, 141].

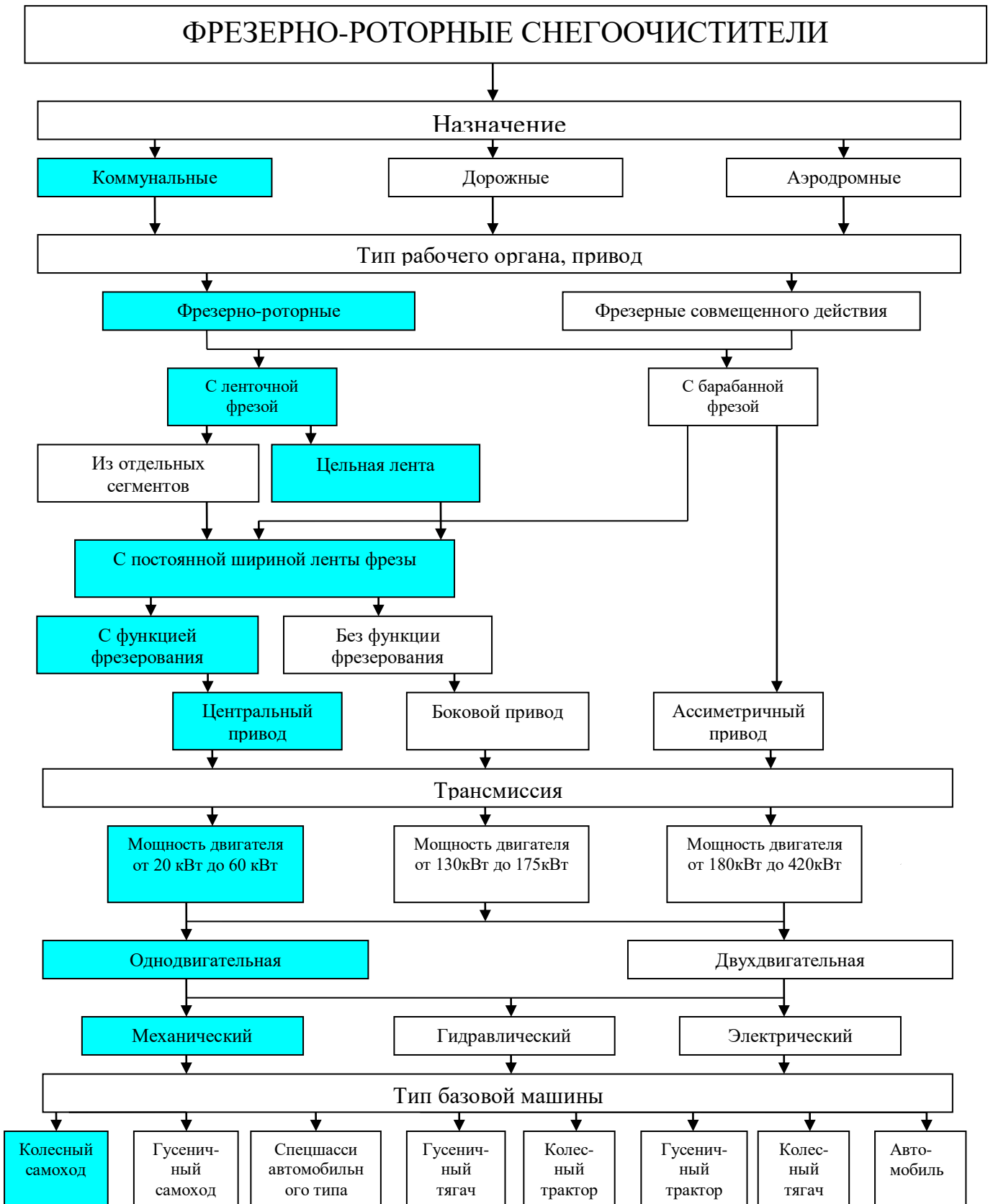


Рисунок 1.1. – Классификация роторных снегоочистителей



Рисунок 1.2 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель КО-605М

Учитывая особенности рабочего процесса снегоочистителя КО-605М, конструктивное решение метательного аппарата предотвращает выброс снежной массы с лопастей обратно в питатель и создает однородный компактный снежный поток с минимальной площадью рассева. Использование такой конструкции метательного аппарата привело к увеличению производительности шнекороторного снегоочистителя на 30...40%, а дальности отбрасывания снега на 25...45% без увеличения мощности установленного двигателя. Также, одномоторная схема снегоочистителя КО-605М, обеспечивает простоту технического обслуживания и управления работой [2, 53, 54, 87, 134, 141].



Рисунок 1.3 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель ДЭ-226

Минский завод «Ударник» в 1986 году взамен шнекороторного снегоочистителя Д-902 приступил к производству модернизированной модели ДЭ-226 с механическим приводом рабочего органа (рисунок 1.3), основной

областью работы которого является очистка от снега взлетно-посадочных полос аэродромов и автомагистралей, отбрасывания снежных валов, образованных другими снегоочистителями [2, 53, 54, 87, 134, 141].

На нем в качестве базового шасси применялся дизельный Урал-4320. Приводной двигатель рабочего оборудования был заменен на более мощный – 294 кВт [2, 53, 54, 87, 134, 141].



Рисунок 1.4 – Шнекороторный снегоочиститель
ДЭ-220М

Шнекороторный снегоочиститель ДЭ-220М (рисунок 1.4) предназначен для очистки от снега грунтовых, автомобильных и тракторных дорог, а также для отбрасывания снежных валов, образованных другими снегоочистителями, для расчистки снежной целины по зимним трассам.

Снегоочиститель ДЭ-220А представляет собой самоходную машину, смонтированную на гусеничном тракторе ДТ-75МВ-ХС4, привод рабочего органа и передвижение снегоочистителя осуществляется от базового двигателя трактора. С целью расширения эксплуатационных возможностей, метательный аппарат ДЭ-220А оборудован съемной направляющей насадкой, за счет чего обеспечивается регулирование дальности отброса снега.

Для очистки от снега дорог, разбрасывания снежных валов, прокладывания по снежной целине зимних дорог предназначен ФРС К-703МА-ОС, оборудованный ленточной фрезой (рисунок 1.5) и выполненный на базе универсального тракторного модуля К-703МА [2, 53, 54, 87, 141].

Одним из самых мощных и высоко производительных отечественных снегоочистителей отбрасывающего действия является фрезерно-роторный снегоочиститель К-703МА-ОС. Отвал питателя, обечайка ротора метательного аппарата конструктивно представляют собой общий корпус, размещенный на задней полураме базовой машины. С помощью поворотной обечайки метательного аппарата, производится варьирование угла отбрасывания, а регулирование направления отбрасывания снежного потока вправо или влево за счет вращения направляющего насадка [2, 53, 54, 87, 141].



Рисунок. 1.5 – Фрезерно-роторный снегоочиститель К-703МА-ОС

ФРС КО-816-1, оборудованный ленточной фрезой (рисунок 1.6) на базе шасси КАМАЗ предназначен для очистки от снега дорожного полотна автомагистралей, аэродромов, и других производственных территорий, также для отбрасывания снежных валов, образованных в процессе работы скоростных плужных снегоочистителей [2, 52, 53, 54, 87, 134, 141].

Снегоочиститель представляет собой колесное транспортное средство, выполненное на шасси повышенной проходимости, по одно двигательной схеме [2, 52, 53, 54, 87, 134, 141].



Рисунок 1.6 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель КО-816-1

Приводы питателя, метательного аппарата и трансмиссии ходовой части машины механические и осуществляется от двигателя через раздаточный редуктор и систему карданных валов. Особенность КО-816-1: комбинированная двухпоточная трансмиссия [2, 52, 53, 54, 87, 134, 141].



Рисунок 1.7 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель ДЭ-250

ФРС ДЭ-250, оборудованный ленточной фрезой (рисунок 1.7) на шасси: «Урал-4320-41». Функциональное назначение ФРС ДЭ-250, аналогично КО-816-1 (рисунок 1.6). Снегоочиститель имеет отдельный привод механизма передвижения и рабочих органов от самостоятельных силовых установок [2, 52, 53, 54, 87, 141]. Оборудован направляющим аппаратом.



Рисунок 1.8 – Фрезерно-роторный снегоочиститель
на базе трактора ВТЗ-2048А ФРС

ФРС на базе трактора ВТЗ-2048А ФРС выполнен в качестве сменного навесного оборудования (рисунок 1.8), он предназначен для уборки тротуаров, улиц, площадей от снежного покрова высотой до 0,4 м [2, 52, 53, 54, 87, 141].

ФРС широко применяется в современном коммунальном хозяйстве. Установленный на трактор рабочий орган снегоочистителя производит фрезерование обледенелого снега по краю дороги торцевыми фрезами. На тракторе навесной ФРС крепится на кронштейнах специальной рамы. Совмещение очистки участка от снежного наката и уборкой снега придает снегоочистителю дополнительную функциональность [2, 52, 53, 54, 87, 141].

ФРС СНФ-200, оборудованный ленточной фрезой, (рисунок 1.9) на базе трактора МТЗ-82.1 предназначен для уборки городских улиц, тротуаров с твердым и грунтовым покрытием от свежесыпавшего и слежавшегося снега, а также для погрузки его в транспортные средства. Снегоочиститель может использоваться для удаления снежных валов, образованных бульдозерами и плужными снегоочистителями. При необходимости снегоочиститель может обеспечивать перекидку снега или укладку его в валы [2, 52, 53, 54, 87, 141]. Оборудован направляющим аппаратом, обеспечивающим возможность транспортировки снежной массы непосредственно в кузов транспортного средства. Применяются такие снегоочистители при разработке снега большой плотности (600 ... 700 кг/м³).



Рисунок 1.9 – Снегоочиститель
фрезерно-роторный СНФ-200



Рисунок 1.10 – Снегоочиститель
фрезерно-роторный Амкодор 9512

ФРС Амкодор 9512 имеет ленточную фрезу (рисунок 1.10) и установлен на шасси автомобиля МАЗ-543403 и предназначен для очистки магистралей, автодорог, аэродромов, от свежевывавшего и слежавшегося снега, а также для отбрасывания снежных валов, образованных другими снегоочистителями [2, 53, 54, 87, 141].

На рисунке 1.11 изображена модель NR30P. Это первый в своём классе компактный роторный снегоочиститель с отапливаемой кабиной. Предназначен для работы в узких дорожных проездах и на тротуарах. Ширина захвата 1,4 м. Мощность силового агрегата 20 кВт, производительность до 150 т/ч. Максимальная дальность отбрасывания снега 20 м [135].



Рисунок 1.11– Роторный
снегоочиститель NR30P

Модель NR40 (NR42) (рисунок 1.12) с ленточной фрезой предназначена для уборки снега с тротуаров, при этом допускается уборка за несколько проходов. Роторное оборудование имеет реверсивный гидравлический привод. На машине может быть установлен бульдозерный отвал и другое оборудование долговременного использования [135].



Рисунок 1.12 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель NR40



Рисунок 1.13 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель Snowbooster B4

Snowbooster B4, компания производитель Boschung, (рисунок 1.13) на спецшасси с гидростатическим приводом рабочего органа очень компактный и эффективный ФРС. Его конструкция идеально подходит для зимнего обслуживания различных территорий в тяжелых условиях эксплуатации. Компактные размеры и высокая маневренность снегоуборочной машины позволяют ей оптимально работать в труднодоступных стесненных местах. Снегоуборочные машины Snowbooster B4 – это современные и мощные снегоочистители [135].



Рисунок 1.14 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель Амкодор 9511

ФРС «Амкодор 9511» представляет собой самоходную машину, смонтированную на специально разработанном шасси (рисунок 1.14). Эта снегоуборочная машина предназначена для скоростной очистки автомагистралей и взлетно-посадочных полос аэродромов, а также для очистки внутригородских и шоссежных дорог от свежесвыпавшего и плотного снега плотностью до $0,6 \text{ т/м}^3$ [135].



Рисунок 1.15 – Фрезерно-роторный снегоочиститель Fresia

Удобные и компактные ФРС Fresia серии F90 - высокоэффективные машины для борьбы со снежными заносами. Специальное шасси тяжелого типа оснащается дизельным двигателем IVECO Cursor 10 с турбонаддувом. Снегоочиститель имеет полный привод, что обеспечивает превосходную маневренность (рисунок 1.15) [135].

Фрезерно-роторный снегоочиститель LARUE D65, выполненный в виде моноблока, представляет собой навесное устройство, состоящее из фрезерно-роторного рабочего органа для двухступенчатой обработки снега и приводящей его в движение силовой установки (автономного дизельного двигателя). Оборудование может устанавливаться на фронтальные погрузчики со статической опрокидывающейся нагрузкой от 9000 кг (рисунок 1.16) [135].



Рисунок 1.16 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель LARUE D65

На рисунке 1.17 изображен Mobi 570 ZAUGG - это моноблок с 6-ти цилиндровым дизельным двигателем Mercedes и фрезерно-роторным рабочим органом ZAUGG SF-120-125-R-296 шириной 2,96 и 3,3 м. Моноблок имеет массу 8400 кг, поэтому для работы необходим фронтальный погрузчик с опрокидывающей нагрузкой не менее 15 т [135].



Рисунок 1.17 – Моноблок Mobi 570 ZAUGG
с фрезерно-роторным рабочим органом
ZAUGG SF-120-125-R-296

MB-320 ZAUGG - это моноблок с 6-ти цилиндровым дизельным двигателем Mercedes и фрезерно-роторным рабочим органом ZAUGG SF-90 шириной захвата 2,46...2,96 или SF-110 шириной 2,46...3,30 м (рисунок 1.18) [135].



Рисунок 1.18 – Моноблок MB-320 ZAUGG
с фрезерно-роторным рабочим органом ZAUGG SF-90

На рисунке 1.19 представлен Mobi 170 ZAUGG. Это моноблок с 6-ти цилиндровым дизельным двигателем Mercedes и фрезерно-роторным рабочим органом ZAUGG SF-90-85-R шириной 2,30-2,96 м. Моноблок имеет массу около 3200 кг, поэтому для работы требуется фронтальный погрузчик с опрокидывающей нагрузкой не менее 6 т.



Рисунок 1.19 – Моноблок Mobi 170 ZAUGG
с фрезерно-роторным рабочим органом ZAUGG SF-90-85-R

MB-73 ZAUGG - это моноблок с четырех цилиндровым дизельным двигателем Deutz и фрезерно-роторным рабочим органом ZAUGG SF-72 или SF-90 (рисунок

1.20). Навесное фрезерно-роторное оборудование, представленное на рисунках 1.17, 1.18, 1.19, формирует линейку высокопроизводительных сменных рабочих органов большой мощности с различной шириной захвата питателя [135].



Рисунок 1.20 – Моноблок МВ-73 ZAUGG
с фрезерно-роторным рабочим органом ZAUGG SF-72

Аэродромный ФРС SUPRA 4001 был разработан для очистки снега с взлетно-посадочных полос, рулежных дорожек и площадок перед ангарами.

SUPRA 4001 (рисунок 1.21) имеет шарнирное сочленение рамы с углом поворота до 35° влево и вправо. Снегоуборочная машина имеет реверсивный гидростатический привод и три диапазона скоростей: два рабочих и один транспортный. Снегоуборочный рабочий орган раздельного принципа действия с барабанной фрезой и роторным метателем позволяет машине отбрасывать снег на значительные расстояния. Привод рабочего органа полностью гидравлический, как и привод движения. Фреза изготовлена из высокопрочной стали Hardox и сконструирована для очистки снега на высоких скоростях. Выбрасывающий (погрузочный) желоб имеет гидравлический привод, телескопический подъем и возможность поворота на 280° , а также, гидравлически расширяемые закрылки по бокам [135].



Рисунок 1.21 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель SUPRA 4001

Типичными представителями маломощных ФРС являются модели Honda HSS724CW (рисунок 1.22) и Ariens ST28DLE Deluxe SHO 28 in (рисунок 1.23). Дальность отброса снега таких моделей составляет 1...15 м, ширина захвата питателя 0,60...0,7 м. Максимальная скорость перемещения 78 м/мин и производительность более 40 м³/час [135].



Рисунок 1.22 – Фрезерно-роторный
снегоочиститель Honda HSS724CW



Рисунок 1.23 – Фрезерно-роторный снегоочиститель Ariens ST28DLE Deluxe SHO 28 in

В процессе упорядочивании множества U шнеко- и фрезерно-роторных снегоочистителей можно произвести оценку доминирующих признаков и перспективность их дальнейшего развития. Упорядочивание сформированного множества U осуществлялось по следующим общим классификационным признакам: функциональное назначение снегоочистителя (рисунок 1.24); мощность двигателя (рисунок 1.25) и тип рабочего органа (рисунок 1.25) [14].

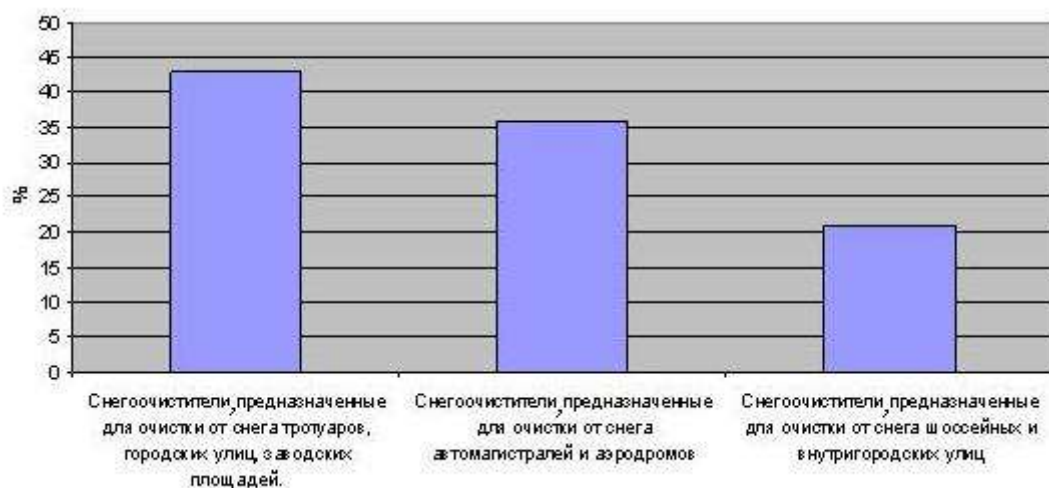


Рисунок 1.24 – Процентное соотношение шнеко- фрезерно-роторных снегоочистителей по функциональному назначению

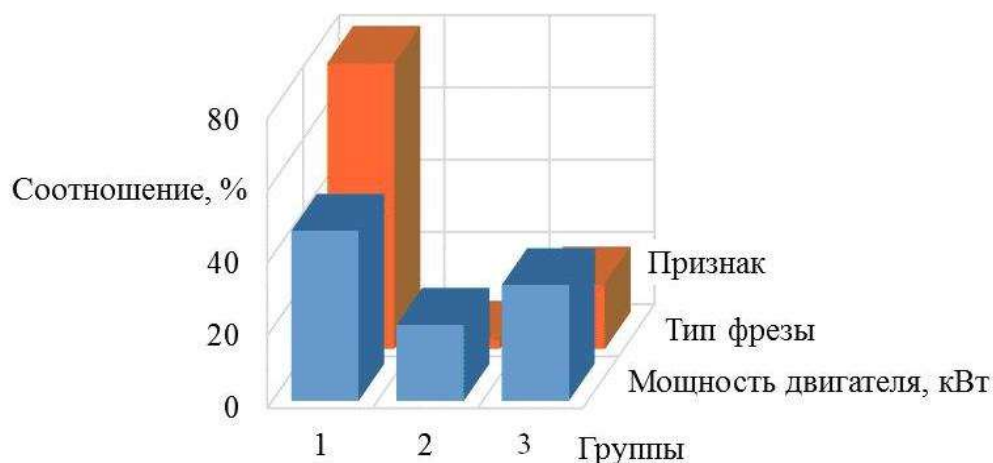


Рисунок 1.25 – Процентное соотношение шнеко-фрезерно-роторных снегоочистителей по мощности двигателя:

- 1 – снегоочистители с мощностью двигателя до 60 кВт;
 - 2 – снегоочистители с мощностью двигателя от 130 до 175 кВт;
 - 3 – снегоочистители с мощностью двигателя более 180 кВт;
- по типу фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя:
- 1 – ленточная фреза; 2 – барабанная фреза; 3 – шнек

В результате были сформированы упорядоченные подмножества фрезерно-роторных и шнекороторных снегоочистителей отбрасывающего действия, анализ которых позволил сделать следующие выводы [14]:

1. Широкое видовое разнообразие шнекороторных и фрезерно-роторных снегоочистителей по всем упорядочиваемым признакам [14].
2. Доминирующим направлением, с точки зрения количества элементов подмножества U , является очистка от снега твердого покрытия дорог с возможностью осуществления непосредственной погрузки снега в транспортное средство, снегоочистителей с мощностью двигателя от 20 до 60 кВт, где ленточная фреза питателя используется в качестве рабочего органа [14].

1.2 Обзор предшествующих исследований по выбору параметров фрезерно-роторных снегоочистителей

Вопросом исследований ФРС и усовершенствованием их конструкции занимались ряд ученых. Солонов Г.В., Эвентов И.М., Карабан Г.Л., Шалман Д.А. и др. [74, 75, 76, 136, 149, 153] провели экспериментально-теоретические

исследования и обобщили материалы для инженерного расчета и конструирования фрезерно-шнекороторных снегоочистителей, привели материалы по технико-экономическому анализу и расчету экономической эффективности от применения новых конструкций снегоочистительных машин.

$$N = \frac{P \cdot b_{ш} \cdot f_{вн} \cdot \operatorname{tg}(\theta + f_{вш})}{540 \cdot \psi_{фр} \cdot \operatorname{tg} \theta}, \quad (1.1)$$

где N – мощность затрачиваемая на перемещение снега питателем, P – производительность, т/ч; $b_{ш}$ – ширина стружки, м; $f_{вн}$ – коэффициент внутреннего трения снега; 540 – поправочный коэффициент, чтобы привести размерность к лошадиным силам; $\psi_{фр}$ – коэффициент, характеризующий проскальзывание снега; θ – угол подъема винтовой линии, проходящей через центр тяжести слоя снега, град; $f_{вш}$ – угол внешнего трения, град.

Баловнев В.И. [21, 22, 23, 24, 25, 104] рассмотрел влияние снежной массы как материальной частицы и крупнокускового образования на работу ротора, кроме этого заложил основы физического моделирования снежной среды.

$$N = 1,39 \cdot 10^{-3} \frac{B \cdot \omega^2 \cdot R \cdot P (f_{вн} + f_{вш}) \cdot \operatorname{tg}(\theta + f_{вш})}{\operatorname{tg} \theta}, \quad (1.2)$$

где N – затраты мощности на перемещение снега питателем; $1,39 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент; B – ширина захвата питателя, м; ω – угловая скорость фрезы, с^{-1} ; R – радиус фрезы, м; P – производительность снегоочистителя, т/ч; $f_{вн}$ – угол внутреннего трения снега, град; $f_{вш}$ – угол внешнего трения снега; θ – угол захода фрезы, град.

Иванов А.Н., Мишин В.А., построили математическую модель движения материальной снежной частицы в питателе ФРС [65].

Касинов Б.Н., Ермилов А.Б., Абрамов Л.Н., Бардачидзе И.А., Алешков Д.С. Соколов А.М. и др. продолжили рассмотрение и разработку вопроса взаимодействия снежной частицы с ротором метательного аппарата ФРС [13, 27, 57, 58, 59, 67, 68, 79, 136].

Момент, приложенный к ленте фрезы при транспортировании снежной массы: где dP_c – элементарная сила, возникающая при давлении снежного массива на ленту фрезы; dF_c – элементарная сила трения при транспортировании снежного массива лентой фрезы.

Дифференциальное уравнение крутящего момента ленты фрезы [68]:

$$dM = R \cdot (dP_c \sin \alpha + dF_c \cos \alpha), \quad (1.3)$$

где dM – момент инерции; R – радиус фрезы, м; dP_c – элементарная сила, возникающая при давлении снежного массива на ленту фрезы; dF_c – элементарная сила трения при транспортировании лентой фрезы снежного массива.

Дифференциальное уравнение позволяет перейти к интегральному уравнению:

$$M = R \left(\sin \alpha + f_{\text{вн}} \cos \alpha \right) \cdot \int_{\delta_0}^{\pi} \left(f_{\text{вн}} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \cos \gamma - f_{\text{вн}} \cdot g \cdot \cos \gamma \cdot \cos \delta - g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta \right) \cdot dm, \quad (1.4)$$

где M – момент, приложенный к ленте фрезы при транспортировании снежной массы; α – угол подъема винтовой лопасти, град; $f_{\text{вн}}$ – коэффициент внешнего трения снега; $f_{\text{вн}}$ – коэффициент внутреннего трения снега; ω – мгновенная угловая скорость элемента вокруг оси питателя, с^{-1} ; γ – угол между касательной к траектории движения элемента и нормалью к лопасти, град; g – ускорение свободного падения $\text{м}/\text{с}^2$; δ_0 – угол захвата частицы фрезой, град.

$$W_{\text{нв}} = \pi \cdot b_1^2 \cdot R \left(4 \cdot \cos \theta \cdot \text{tg} \left(f_{\text{вн}} \right) \right), \quad (1.5)$$

где $W_{\text{нв}}$ – объем призмы волочения; b_1 – высота призмы волочения, м; $f_{\text{вн}}$ – угол внутреннего трения снега, град.

$$N = M_c \cdot \omega, \quad (1.6)$$

где N – мощность, затрачиваемая на фрезерование забоя и транспортирование снежной массы винтовой лопастью, M_c – крутящий момент, Н·м; ω – угловая скорость вращения фрезы, с^{-1} .

Патентный обзор фрезерно-роторных снегоочистителей

В патенте, представленном на рисунке 1.26, предлагается осуществлять передачу крутящего момента валом, установленным перпендикулярно оси вращения фрезы.

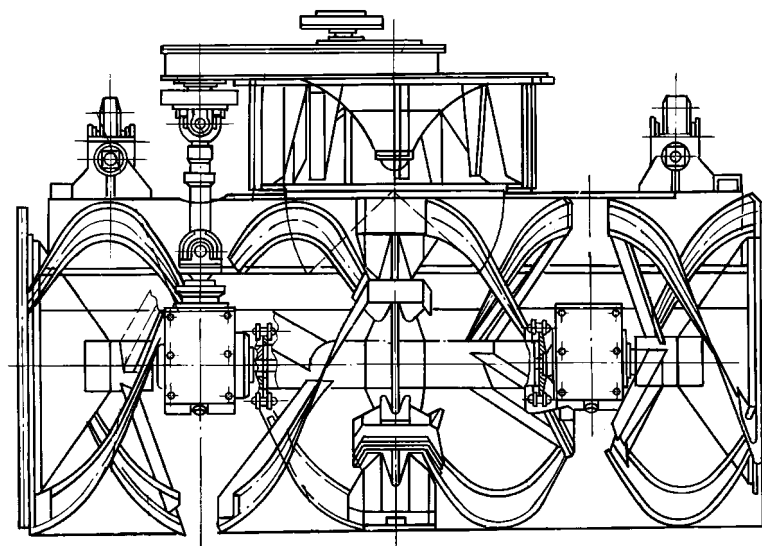


Рисунок 1.26 – Патент № 2045612 РФ

При этом вал располагается параллельно оси симметрии базовой машины. При таком расположении вала фреза состоит из трех сегментов. Недостаток в сложности конструкции, т.к. фреза состоит из трех сегментов.

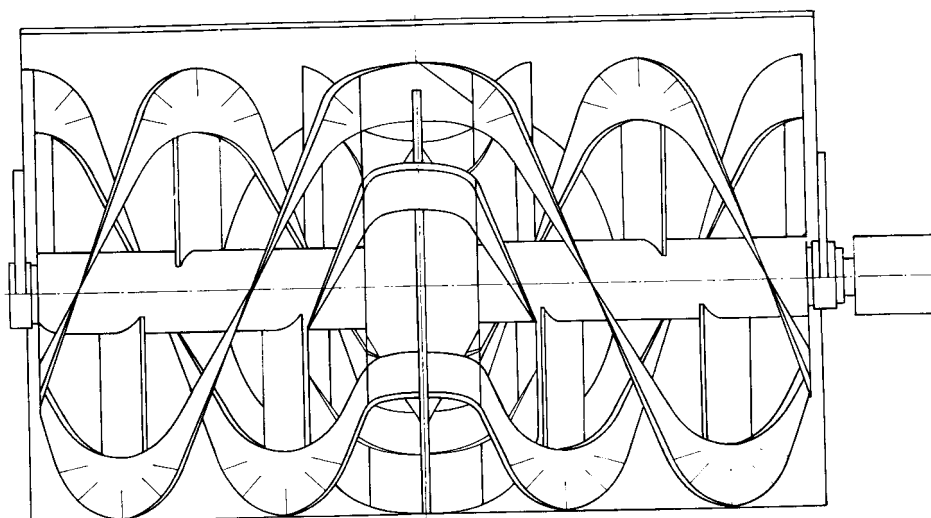


Рисунок 1.27 – Патент № 2068044 РФ

В патенте, представленном на рисунке 1.27, предлагается конструктивное исполнение фрезы питателя в области загрузочного окна, целью которого является увеличение заполняемости межлопастного пространства ротора метательного аппарата. Недостаток конструкции состоит в том, что требуется отдельный двигатель для привода фрезы, что не всегда целесообразно.

В патенте, представленном на рисунке 1.28, предлагается к барабанной фрезе установить две лопатки под углом 180° в области разгрузочного окна, что также позволяет увеличить величину заполнения ротора метательного аппарата. Недостаток конструкции состоит в том, что это реализуемо только на барабанной фрезе.

В патенте, представленном на рисунке 1.29, предлагается заменить ленту фрезы отдельными лопатками. Недостаток конструкции состоит в том, что необходимо контролировать положение лопаток, в противном случае будет наблюдаться потеря снежной массы.

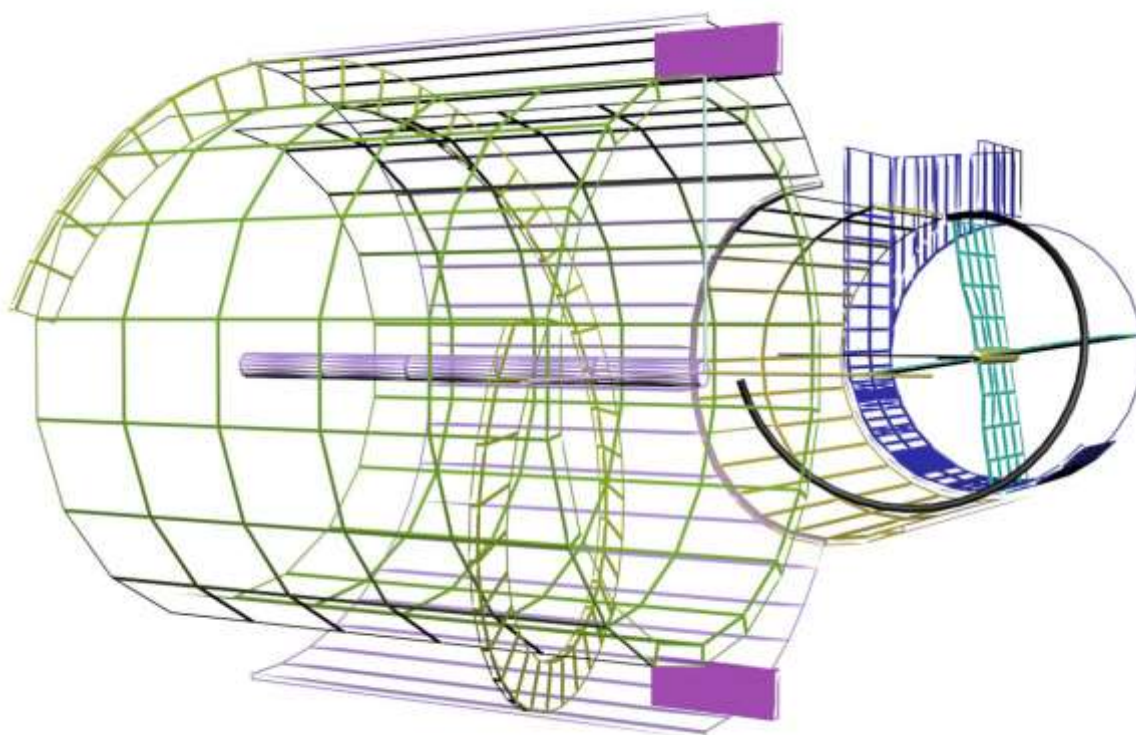


Рисунок 1.28 – Патент на полезную модель № 5599 РФ

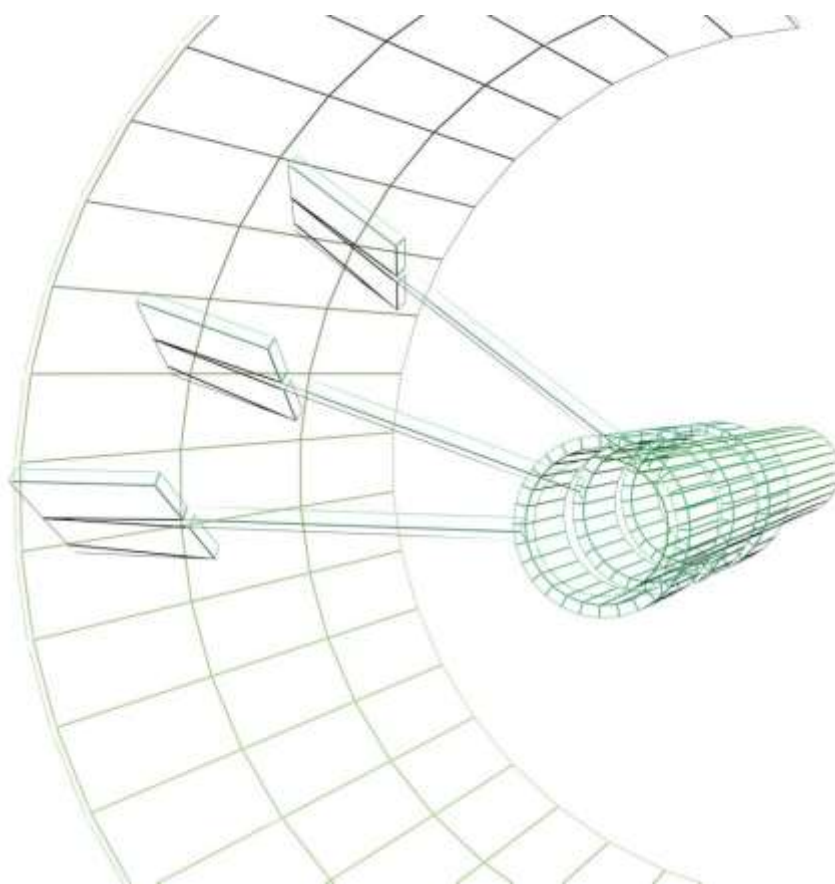


Рисунок 1.29 – Патент на полезная модель № 58559 РФ

Необходимо отметить патент № 0 523 966 А1, в котором авторы развивают известное конструктивное решение (рисунок 1.30) – неподвижные усеченные конусы с торцов питателя ФРС. Сущность патента заключается в том, что вдоль образующих усеченных конусов установлены синхронно с лентами фрез вращающиеся полосы, задачей которых является интенсификация процесса перемещения снега в область загрузочного окна. К очевидным недостаткам предлагаемого инженерного решения относится конструктивная сложность и возможность реализации только в ФРС большой производительности. В этом же патенте отмечается перспективное направление, использование материалов с низким коэффициентом трения. В частности, предлагается лопасти ротора покрыть полиэтиленовым материалом.

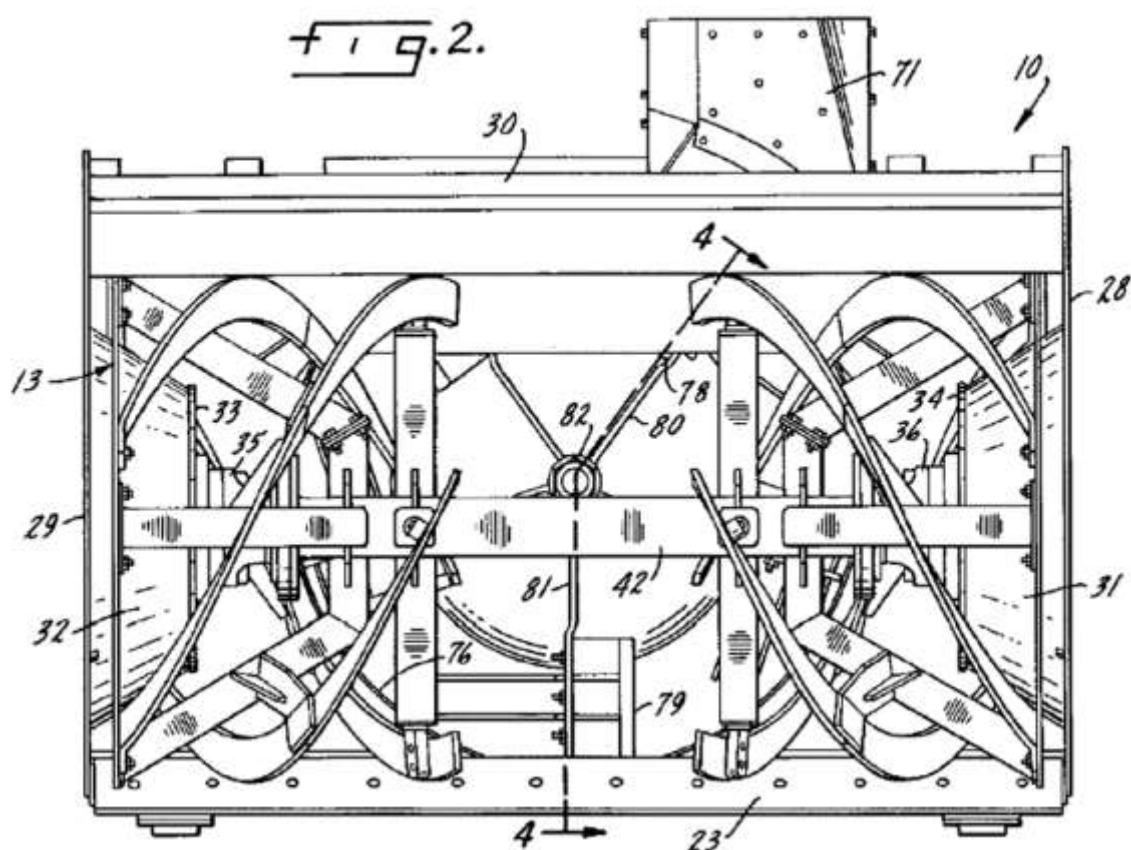


Рисунок 1.30 – Патент № 0 523 966 A1

Поиску оригинальных компоновочных схем посвящен изображенный на рисунке 1.31 патент № US 2007/0062076 A1. Авторы предлагают соосно объединить фрезу питателя ФРС с ротором метательного аппарата, что не требует решать проблему загрузки ротора метательного аппарата, обусловленную необходимостью изменения направления вектора скорости транспортируемой снежной массы. Однако при этом эффективность работы метательного аппарата снизится за счет того, что его скорость не будет соответствовать оптимальному значению, обеспечивающему высокую производительность и дальность отброса снежной массы. Раздельный привод существенно усложнит конструкцию и ограничит область использования данной такой схемы.

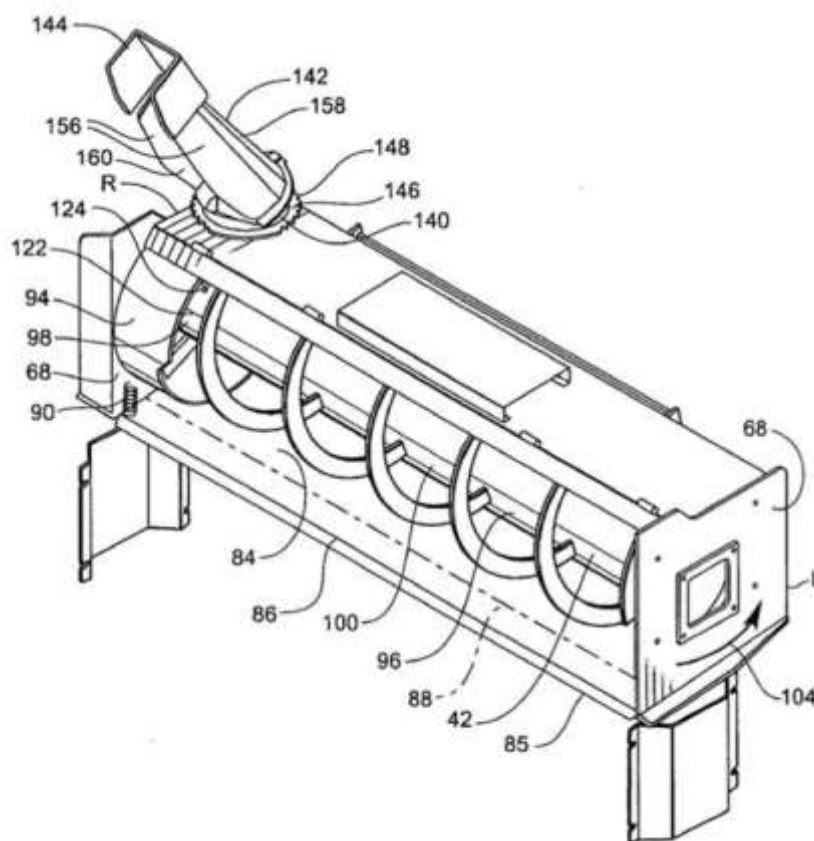


Рисунок 1.31 – Патент US 2007/0062076 A1

Конструктивное разнообразие существующих ФРС, большое количество патентов и обширная база результатов научных исследований демонстрируют повышенный интерес к проблеме повышения эффективности, снижению удельной мощности работы и совершенствованию конструкции питателя ФРС. Несмотря на большое количество работ, направленных на решение проблемы минимизации удельной мощности питателя ФРС, известные математические модели работы питателя ФРС не дают эффективных решений данной проблемы и базируются на представлении снежного массива как материальной частицы, что не в полной мере отражает реальность процесса взаимодействия фрезы питателя ФРС со снежным массивом. Предлагаемые зависимости носят полуэмпирический характер. Недостаточно полно раскрыты алгоритмы выбора конструктивных и технологических параметров питателя ФРС, методы их расчета, а также вопросы его структурного и имитационного моделирования на ЭВМ. Таким образом,

возникает необходимость проведения дополнительных научных исследований для достижения поставленной в работе цели.

1.3 Обзор предшествующих исследований по физико-механическим свойствам снега

Наиболее распространенным видом твердых атмосферных осадков является снег. На микроуровне снег – это совокупность отдельных снежинок, представляющих собой плоские кристаллы льда. В основном они имеют шестигранную, шестилучевую и гексагональную формы. Их размеры могут достигать 0,01 м [36, 132].

На макроуровне слой снега, свободно лежащий на подстилающей поверхности, образует снежный покров.

Основные виды снега представлены на рисунке 1.32.

В течение всего периода существования снежного покрова его структура, объем и физико-механические свойства непрерывно изменяются под действие различных факторов (рисунок 1.33), что обуславливает его слоистое строение [36, 132].

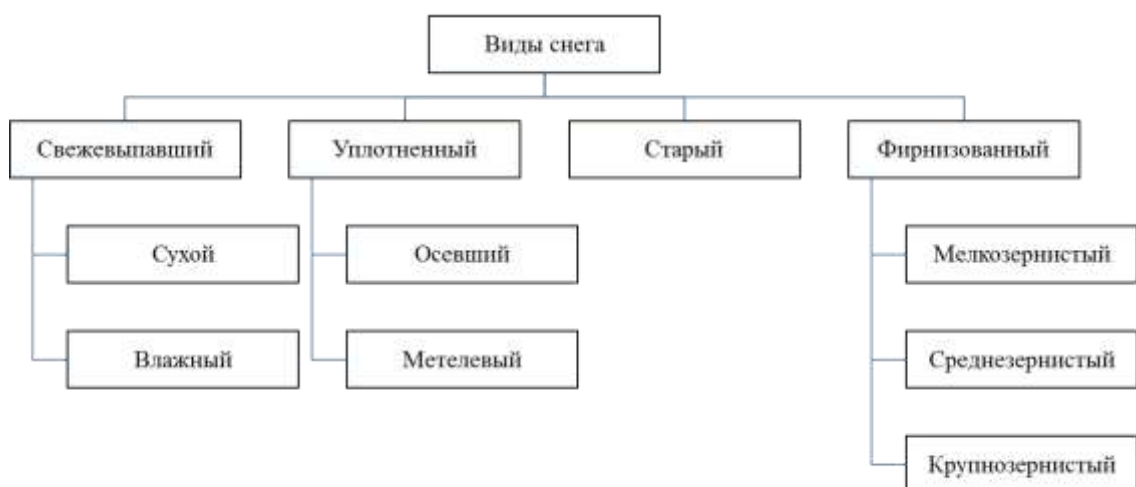


Рисунок 1.32 – Виды снега [130]



Рисунок 1.33 – Факторы, влияющие на структуру снежных частиц [132]

На рисунках 1.34, 1.35, 1.36 изображены структуры основных видов снега [132].

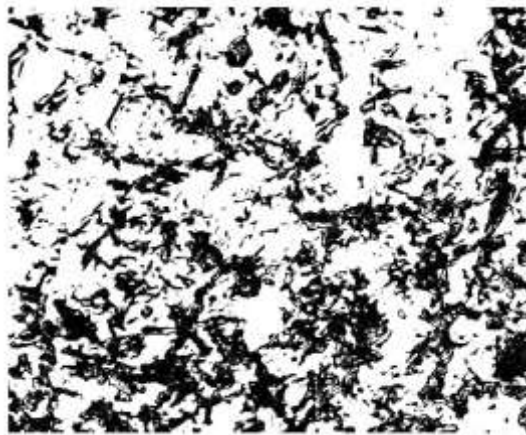


Рисунок 1.34 – Структура свежесвыпавшего снега [132]

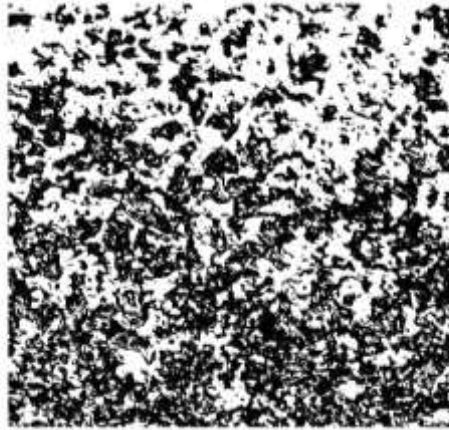


Рисунок 1.35 – Структура уплотненного
(влажного) снега [132]

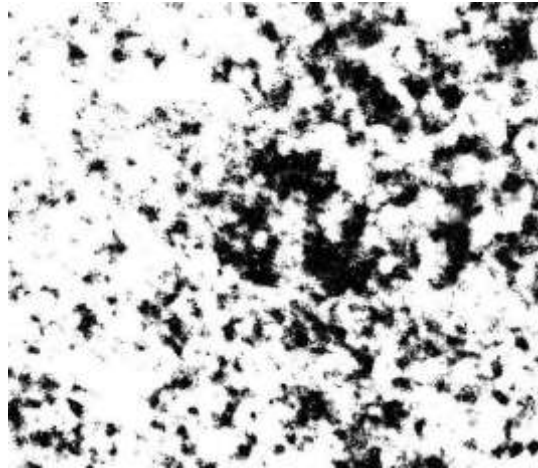


Рисунок 1.36 – Структура фирнизованного
(мелкозернистого) снега [132]

Свежевыпавший снег при спокойных снегопадах состоит из снежинок, располагающихся друг над другом в разных плоскостях. При температурах близких к нулю, снег становится влажным и, соответственно, возрастает его способность к слипаемости. Такой снег легко образует конгломераты слипшихся снежинок. На рисунке 1.37 хорошо просматриваются отдельные кусочные образования свежевыпавшего снега (отмечены стрелками) в процессе его транспортирования в питателе ФРС. При низких температурах образуется снег, характеризующийся низкой влажностью и малым коэффициентом слипаемости, что характерно для уплотненного метелевого снега, обладающего мелкозернистой

структурой. Уплотненный снег образуется за счет оседания под действием собственного веса, ветра и температурных изменений. Первичная кристаллическая структура снежинок у такого снега претерпевает изменения формы (рисунок 1.38). Старый снег образуется под воздействием сублимации при таянии и повторном замерзании; утрачивается первичная структура и форма кристаллов снежинок, происходит процесс фирнизации и роста кристаллических образований [132].

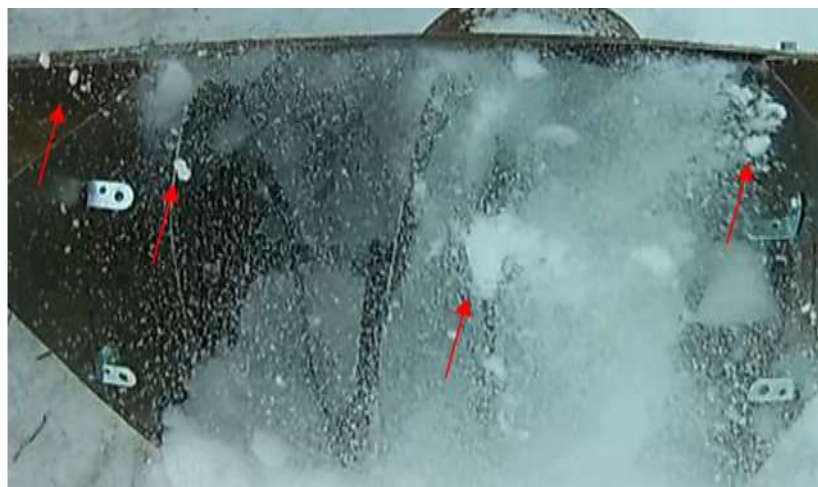


Рисунок 1.37 – Структура свежевыпавшего снега с кусочными образованиями в питателе ФРС [132]



Рисунок 1.38 – Структура уплотненного снега с кусочными образованиями и снега, подвергшегося таянию с последующим замерзанием [132]

По форме зерна снежного покрова имеются следующие его разновидности [132]:

1 – свежесвыпавший снег обычно очень мягкий, включает в себя кристаллы или части поломанных кристаллов;

2 – снежный покров в начальной стадии оседания, имеет переходную структуру: мелкозернистая структура не достигнута (что характерно для завершения стадии первичного преобразования) и еще наблюдаются признаки кристаллического строения;

3 – снежный покров, подвергшийся таянию с последующим замерзанием, теряет признаки кристаллического строения, зерна приобретают округлую форму и имеют большую дисперсию размеров (рисунок 1.35);

4 – мелкозернистый снег образуется при низкой температуре без заметного таяния и имеет зерна неправильной формы с плоскими гранями, такой тип снега довольно тверд;

5 – в течение длительного и очень холодного периода роль сублимации незначительна и формируется глубинная изморось, состоящая из бокаловидных кристаллов.

Основные характеристики снежного покрова представлены в таблице 1.1, они не являются исчерпывающими при разработке различных физических и математических моделей для описания такой специфической системы, как снежный покров [132].

Плотность снега во многом определяет его характеристики и свойства, однако она варьируется в очень широком диапазоне: от 10 кг/м³ для свежесвыпавшего и до 800 кг/м³ для обледенелого, что обуславливает его широкое видовое разнообразие и размах характеристик снега как на макро, так и на микроуровнях [132].

Определение плотности снега, в зависимости от глубины залегания снежного покрова, может осуществляться по формуле Абэ [73, 132]:

$$\rho = a \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot z, \quad (1.7)$$

где $a = 185,4$; $\theta = 0,545$; z – глубина от поверхности снега, м.

Таблица 1.1 – Основные характеристики снега [132]

Характеристика	Единица измерения	Обозначение
Плотность	кг/м ³	ρ
Содержание свободной воды	% (по массе)	C_e
Прочностные характеристики:		
сопротивление сжатию	Н/м ²	K_p
растяжению	Н/м ²	K_z
срезу	Н/м ²	K_s
При отсутствии давления в нормальной плоскости:		
твёрдость	Па	HC
Температура	°С	t

Вызывает практический интерес эмпирическая формула для расчета плотности снега в зависимости от метеорологических данных, предложенная Н.Г. Дмитриевой:

$$P = P_0 + 0,0024 \cdot \tau_v + k \sqrt{\sum \theta_t}, \quad (1.8)$$

где P – средняя плотность на конец расчетного периода, P_0 – исходная плотность снежного покрова, τ_v – число суток со скоростью ветра, равной или больше критического значения 6 м/с, $\sqrt{\sum \theta_t}$ – сумма положительных среднесуточных температур воздуха на конец расчетного периода, k – эмпирический коэффициент: для плотностей, меньших 260 кг/м³, он принят равным 0,007, а для плотностей, больших и равных 260 кг/м³, – 0,002 [161].

В таблице 1.2 приведены основные типы снега и диапазоны плотностей, характерные для каждого из представленных типов [132].

Таблица 1.2 – Плотность снега в зависимости от его типа [132]

Тип снега	Плотность (кг/м ³)
Сухой снег	50 ρ 200
Снег	200 ρ 550
Фирнизованный	550 ρ 820
Пористый лед	820 ρ 917
Лед	917

В соответствии со СП 131.13330.2018 [139] климатические параметры холодного периода в Омской области представлены в таблице 1.3 [47].

Таблица 1.3 – Климатические параметры холодного периода года в г. Омске [47]

Температура воздуха, °С, обеспеченностью 0,94	Абсолютная минимальная температура воздуха, °С	Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее холодного месяца, °С	Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца, %	Количество осадков за ноябрь – март, мм	Преобладающее направление ветра за декабрь – февраль	Максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, м/с
- 24	- 49	8,8	80	79	юго-западный	5,1

Плотность снега является важной физической характеристикой, она варьируется по времени выпадения снега и нахождения в пространстве. В пространстве плотность варьируется в зависимости от рельефа [47].

Плотность снежного покрова зависит не только от погодных условий, но и физико-химических воздействий на него в процессе содержания селитебной территории. Для подтверждения данного факта и оценки его влияния автором

осуществлялся сбор проб снега и определение его плотности в течение февраля месяца зимы 2014 года на различных участках селитебной территории.

На селитебной территории знание физических свойств снега являются актуальными для автомобилистов и для эффективной работы дорожных и коммунальных служб.

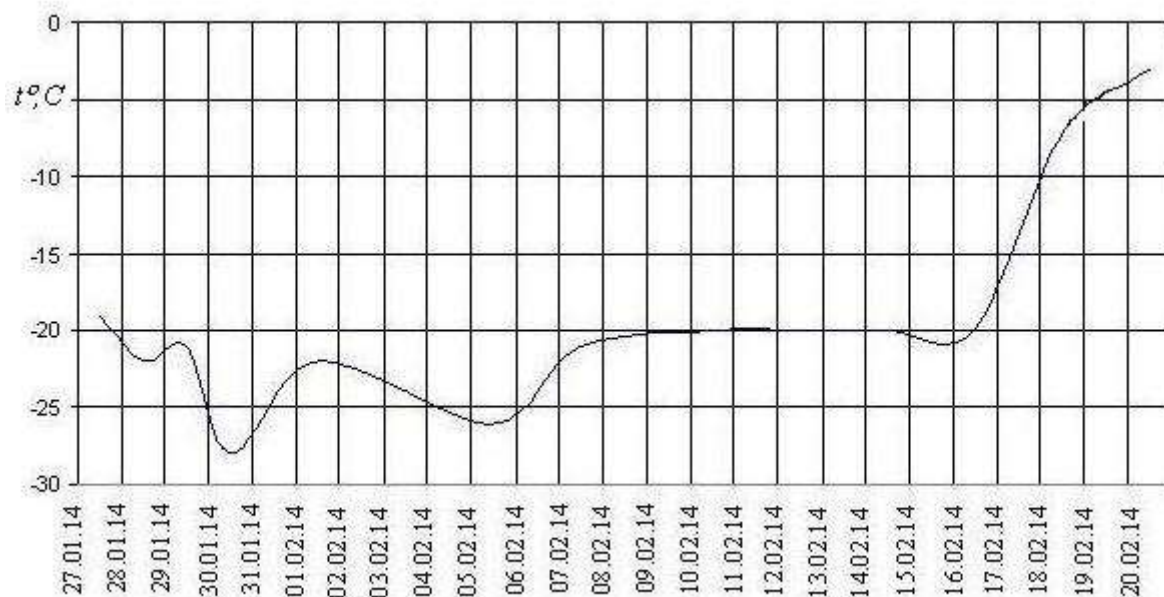


Рисунок 1.39 – Температура воздуха в феврале 2014 г. (г. Омск)

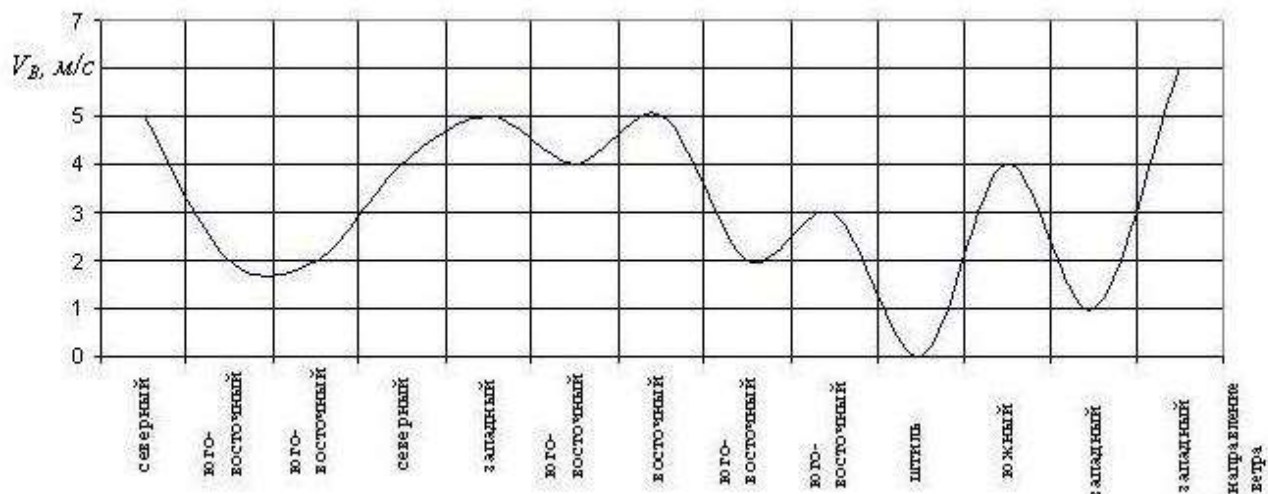


Рисунок 1.40 – Направление и скорость ветра в феврале 2014 г. (г. Омск)

При этом также учитывались погодные условия, такие как: направление и скорость ветра, температура воздуха (рисунки 1.39, 1.40). Пробы снега брались с

помощью колбы с нанесенной на ней делениями в сантиметрах. Плотность снега определялась по формуле (1.9):

$$\rho = \frac{h_в}{h_{сн}}, \quad (1.9)$$

где $h_в$ – высота воды в колбе, см, $h_{сн}$ – высота снега в колбе, см.

По данным плотностей снега на селитебной территории (таблица 1.4), на примере г. Омска, холодный период с 27 января 2014 года по 20 февраля 2014 года, был построен график изменения плотности снега (рисунок 1.41).

Таким образом, статистические характеристики плотности снега имеют следующие значения:

- минимальное значение 150 кг/м³;
- максимальное значение 490 кг/м³;
- среднее значение в точке 1 составляет 190 кг/м³;
- среднее значение в точке 2 – 310 кг/м³;
- среднее значение в точке 3 – 220 кг/м³;
- среднее значение в точке 4 – 260 кг/м³;
- среднее значение плотности снега по г. Омску составило – 250 кг/м³.

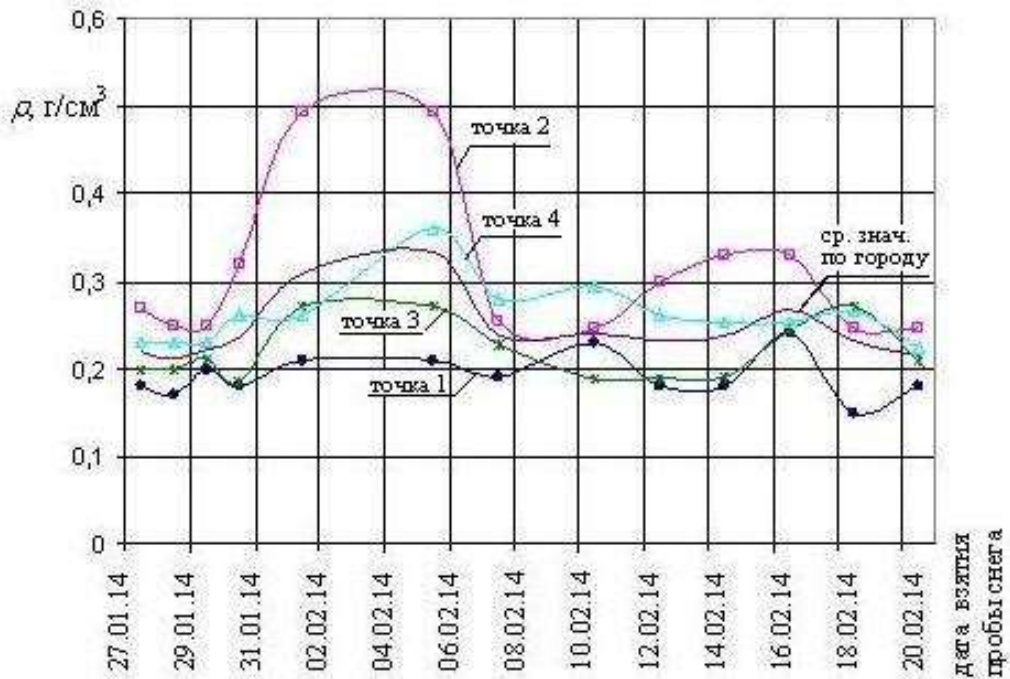


Рисунок 1.41 – Плотности снега на территории г. Омска в феврале 2014 г.

Таблица 1.4 – Места определения плотности снега в г. Омске

№	Место взятия пробы	Условия содержания территории
Точка 1	район улицы Конева	Ручная периодическая очистка пешеходных путей
Точка 2	район улицы Герцена	Регулярная очистка дорожного покрытия с использованием коммунальной техники
Точка 3	район улицы 10 лет Октября	Ручная периодическая очистка пешеходных путей
Точка 4	район проспекта Мира	Периодическая очистка пешеходных путей с использованием щетки

Соответственно условия содержания селитебной территории оказывают существенное влияние на величину плотности снега, регулярность очистки и ее объемы вызывают увеличение плотности снега.

Несущая способность снежного покрова зависит от прочности снега, которую характеризует твердость снега. Твердость снега определяется по глубине проникновения зонда Хефели, или ручного индекса прочности [105].

На зимних дорогах твердость снега должна быть равна 106 Па при плотности снега 600 кг/м^3 .

Влажность снега является очень важной физической характеристикой и определяется калориметрическим способом. Процесс замера основан на том принципе, что для расплавления льда при 0°C необходимо затратить определенное количество тепла и количество влаги, содержащейся в образце, определяют путем замера количества тепла, поглощенного снегом за время его расплавления [105].

Сухой снег представляет собой двухфазную среду, т. к. содержит воду в твердом и газообразном состоянии; влажный снег – трехфазная среда, так как в

него добавляется вода в жидком состоянии. Влажность снега определяется в процентах относительным количеством воды в пробе по весу [105].

Характер изменения угла сдвига γ , в зависимости от времени t и напряжения сдвига τ , определяет поведение снега при механическом воздействии на него. Для идеально упругого вещества деформация не зависит от времени, растет пропорционально напряжению и после снятия нагрузки возвращается к нулю. Поведение таких веществ описывается законом Гука [105, 150]:

$$\lambda = \frac{1}{G} \tau, \quad (1.10)$$

где λ – угол сдвига; G – модуль сдвига; τ – напряжение сдвига.

В идеально вязких веществах, подчиняющихся закону Ньютона, величина деформации при постоянном направлении сдвига изменяется пропорционально времени, а скорость изменения деформации растет пропорционально напряжению. После снятия нагрузки обратного процесса не происходит [105, 150]:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\eta} \tau, \quad (1.11)$$

где η – коэффициент вязкости.

Вязкость снега в процессах формирования снежных обвалов играет большую роль. Вязкость снега η_1 , как функция плотности снега может быть определена по следующим эмпирическим формулам [84, 85, 132]:

- при температуре окружающего воздуха от -1 до -3°C

$$\eta_1 = 9,81 \dots 107 / (0,01 - 0,19 \rho), \quad (1.12)$$

- при температуре окружающего воздуха от -5 до -13°C

$$\eta_2 = 9,81 \dots 107 / (0,037 - 0,09 \rho), \quad (1.13)$$

Аналогично, зависимости модуля упругости снега E (Па) от плотности могут быть определены из выражений [82, 83, 130]:

- при температуре окружающего воздуха от -1 до -3°C

$$E_1 = (0,0167 \rho - 0,0167) \cdot 106, \quad (1.14)$$

- при температуре окружающего воздуха от -5 до -13°C

$$E_2 = (0,059\rho - 10,8) \cdot 106. \quad (1.15)$$

Предельное сопротивление сдвигу снега может быть определено по формуле [105, 132]:

$$P\tau = C + fP, \quad (1.16)$$

где C – сила сцепления; f – коэффициент внутреннего трения; P – сила нормального давления на поверхности среза.

Исследования показали сравнительно незначительное увеличение силы сцепления для свежеснегавшего снега при его относительно малой плотности и более существенный рост при увеличении плотности (рисунок 1.42).

Коэффициент внешнего трения снега f_1 по материалу находится по известному соотношению [148]:

$$f_1 = \frac{T}{N} = \text{tg } \varphi_1, \quad (1.17)$$

где T – сила трения скольжения снега по материалу поверхности скольжения; N – сила нормального давления; φ_1 – угол внешнего трения снега.

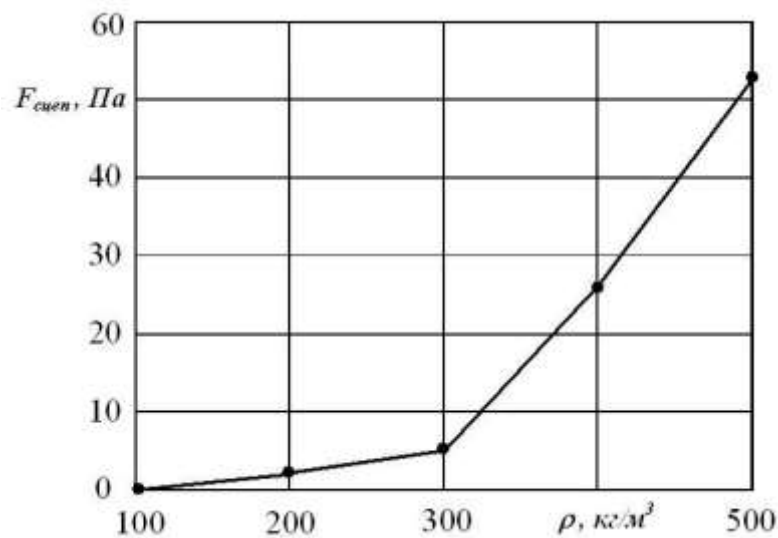


Рисунок 1.42 – Зависимость силы сцепления снега от его плотности

С увеличением плотности снега коэффициент внешнего трения, уменьшается. При охлаждении снега значение этого коэффициента повышается. Средние

значения коэффициента внешнего и внутреннего трения снега по стали приведены на рисунках 1.43 и 1.44 [13, 84].

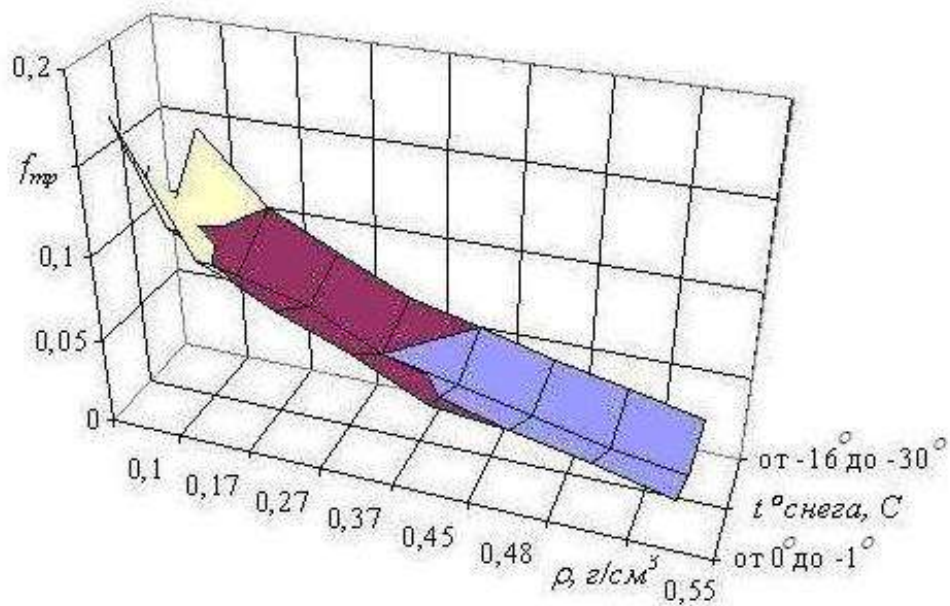


Рисунок 1.43 – График зависимость внешнего коэффициента трения от плотности и температуры снега

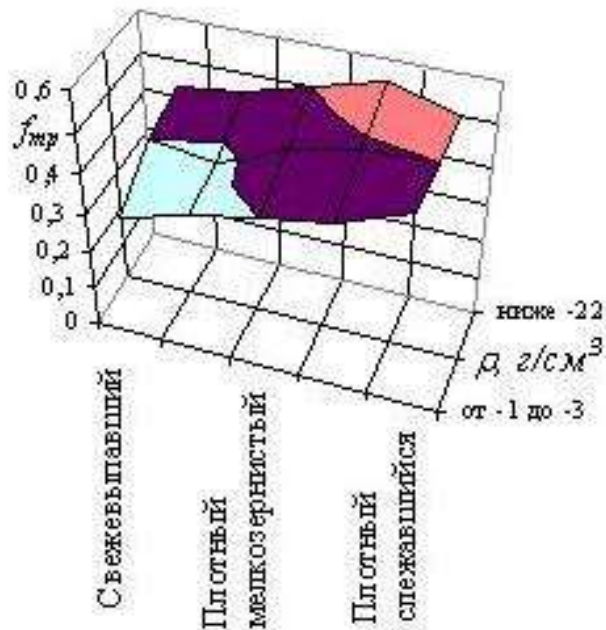


Рисунок 1.44 – График зависимость внутреннего коэффициента трения от плотности и температуры снега

Одной из важных характеристик снега является его плотность, которая возрастает с течением времени. Периодичность уборки снега и высота

образующихся снежных валов оказывают заметное влияние на изменение плотности снега в них. Кусочное образование является характерным свойством для снежной массы, взаимодействующей с ФРС.

1.4 Цель и задачи исследования

Целью данной работы является снижение удельной мощности работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Объектом исследования в данной работе является рабочий процесс питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Предметом исследования – являются закономерности рабочего процесса взаимодействия питателя фрезерно-роторный снегоочиститель со снежным массивом.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

1. Усовершенствовать математическую модель динамической системы «фрезерно-роторный снегоочиститель – питатель – снежный массив».
2. Сформулировать критерий эффективности рабочего процесса питателя.
3. Выявить основные закономерности влияния конструктивных и технологических параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя на движение снежной массы.
4. Разработать методику определения основных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Системный подход является общей методологической основой данной работы.

Основные выводы по главе

1. Проведенный анализ состояния вопроса повышения эффективности работы питателя ФРС позволил сделать вывод об актуальности цели, поставленной в данной работе.

2. По результатам обзора современных тенденций развития снегоочистителей отбрасывающего действия на примере существующих моделей были выявлены основные классификационные признаки роторных снегоочистителей и проведена их классификация, а также определены тенденции дальнейшего развития ФРС.

3. Обзор существующих математических моделей, описывающих работу питателя ФРС, показал необходимость усовершенствования математической модели динамической системы «фрезерно-роторный снегоочиститель – питатель – снежный массив», которая позволяет более полно учесть особенности поведения снега и фрезы в процессе их взаимодействия.

4. Для получения новых инженерных решений и совершенствования существующих конструкций питателя ФРС требуется наличие специализированной среды моделирования рабочего процесса питателя ФРС, базирующейся на современных компьютерных технологиях, обеспечивающих эффективное решение задач имитационного моделирования взаимодействия элементов питателя ФРС со снежной средой и проектирования этих элементов.

2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ. СТРУКТУРА РАБОТЫ

2.1 Общая методика исследований

Самым эффективным методологическим подходом в решении задач математического моделирования питателя ФРС, выбора критериев эффективности и выявления закономерностей работы питателя является методология системного подхода [13]. Системный подход основан на представлении рабочего процессов и явлений как систем, включает в себя последовательное решение задачи анализа, а затем задачи синтеза. При анализе технической системы в предмете исследования выделяют те характеристики и свойства, которые делают его частью всей технической системы, а при решении задачи синтеза техническая система представляется как состоящая из частей – подсистем и отдельных элементов, которые определенным образом связаны между собой в единое целое [1, 13, 21]. Структура системного анализа подразумевает формирование методов формализации сложных неопределенных систем и представлении их в виде, доступном для решения с использованием методов моделирования. К основным принципам системного анализа относятся [1, 13, 21]:

- целостность системы в процессе ее взаимодействия с окружающей средой;
- структурность системы в виде совокупностей элементов, характеристик, связей и их взаимообусловленности;

- иерархичность системы заключается в том, что каждая система есть часть другой системы - это позволяет представить рассматриваемую систему, как систему, состоящую из подсистем, которые в свою очередь включают в себя другие подсистемы – элементов системы [152].

Применительно к работе, суть системного подхода заключается в исследовании работы питателя ФРС как системы, состоящей из совокупности взаимосвязанных причинно-следственными связями подсистем и элементов, в поиске механизмов ее целостности и выделении данных связей [13, 43].

Под системой рабочего процесса питателя ФРС понимается ограниченное множество элементов, подсистем, с соответствующими характеристиками, объединенных связями и образующих единое целое. Иерархичность рабочего процесса питателя ФРС заключается в том, что питатель представлен состоящим из двух основных подсистем: отвала и ленты фрезы, а снежный массив, как совокупность отдельных кусочных образований.

Рабочий процесс питателя ФРС в эксплуатационных условиях представляет собой динамическую систему взаимодействующих подсистем, которые функционируют в непрерывных условиях, случайно изменяющихся внешних воздействий на фрезу питателя ФРС со стороны снежной массы.

Целесообразность использования методологии системного подхода для исследования рабочего процесса питателя ФРС подтверждается возможностью дробления питателя на совокупность отдельных взаимосвязанных подсистем, решающих простые, текущие задачи процесса их взаимодействия [13].

Согласно В.И. Баловневу в классификации дорожно-строительных машин по характеру производства работ, назначению и конструкции (рисунок 2.1.), процесс транспортирования снега относится к 5 подгруппе подсистем [21].

Для анализа факторов, которые влияют на повышение эффективности работы питателя ФРС, были выделены элементы и связи между этими элементами, определяющие положение, форму питателя в пространстве и их положение относительно ротора метательного аппарата, так как существует связь параметров, которые определяют положение и форму питателя в пространстве, с энергетическими и кинематическими характеристиками снежного потока в роторе метательного аппарата и направляющей насадке [13].

При проведении снегоочистных работ рабочий процесс взаимодействия питателя, как системы с внешней средой, был представлен функциональной схемой (рисунок 2.2), отражающей модель рабочего процесса питателя [13].

Основными элементами системы являются подсистемы питателя: фреза и такие ее элементы, как лента фрезы кинематическое и динамическое взаимодействие которых осуществляется посредством их взаимодействия и взаимного

расположения. Подсистему снежный массив характеризуют его динамические и физико-механические свойства, с которыми он взаимодействует с подсистемами питателя ФРС.

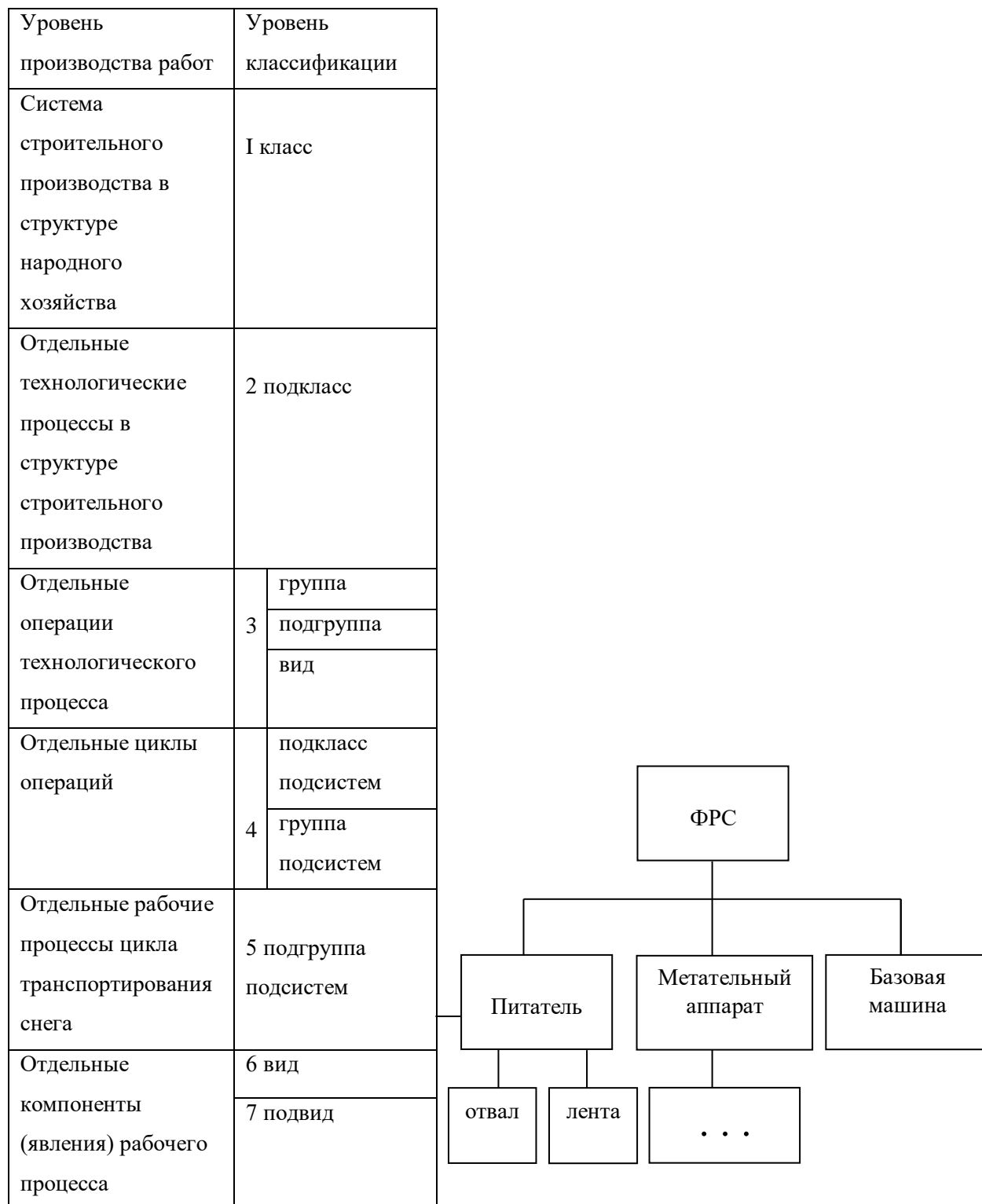


Рисунок 2.1 – Классификация фрезерно-роторных снегоочистителей по характеру производства работ, назначению и конструкции

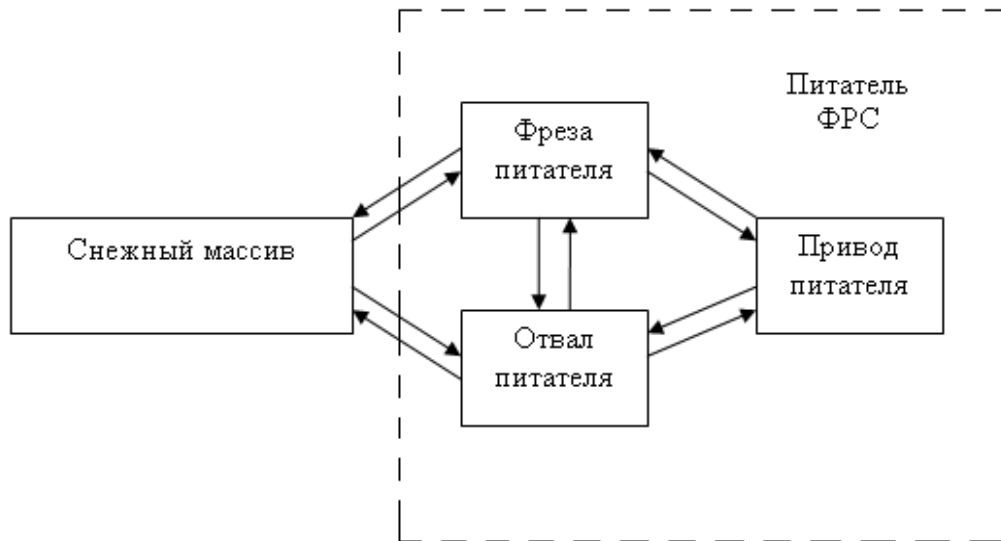


Рисунок 2.2 – Функциональная схема динамической системы питателя фрезерно-роторный снегоочиститель и снежного массива

Форма и положение питателя задают параметры снежного потока в области загрузочного окна, что, в свою очередь, определяет характеристики работы ротора метательного аппарата ФРС и соответственно оказывают влияние на параметры снежного потока в направляющей насадке [13].

Рассмотренные подсистемы и связи рабочего процесса питателя ФРС определяют причины и факторы, которые влияют на его эффективность в процессе проведения снегоочистных работ [13].

Схема решения задач, поставленных в данной работе, на основе системного анализа, в общем виде, была представлена [21]:

1. Синтез структурной схемы рабочего процесса питателя при проведении снегоочистных работ [13].
2. Теоретические исследования элементов структурной схемы питателя ФРС с целью выявления закономерностей их влияния на процесс проведения снегоочистных работ и связей внутри них.
3. Введение новых элементов или связей, изменение характеристик ранее существовавших элементов или связей, обеспечивающих повышение эффективности работы питателя ФРС. Устранение «вредных» элементов и связей, которые отрицательно влияют на эффективность проведения снегоочистных работ.

работ [13]. Синтез оригинальных технических решений, позволяющих получать новые параметры рабочего процесса питателя ФРС.

4. Теоретическое и экспериментальное изучение рабочего процесса питателя ФРС и оценка функционирования новой системы и модифицированных подсистем, с возможностью последующей корректировки предлагаемых технических решений.

5. Оценка результатов исследований.

2.2 Методика теоретических исследований

Выделенные подсистемы питателя необходимо формализовать, то есть дать абстрактное описание в виде математической модели их функционирования. Объекты исследования заменяются математическими моделями, отражающими исследуемые свойства объектов с требуемой точностью [13]. В [13, 21] утверждается, что применение моделирования позволяет осуществить рациональный или оптимальный синтез системы. В математических моделях описание работы питателя ФРС осуществляется с использованием систем кинематических уравнений и уравнений динамики, вид которых соответствует уровню принятой математической модели и рассматриваемым связям с необходимыми для их решения численными значениями коэффициентов, начальными и граничными условиями [13]. Наиболее рационально использование предметно-математических моделей, основой для которых являются математические модели и их реализация на ЭВМ [21, 25].

Предметно-математические модели должны обладать следующими признаками [13, 23]:

- соответствовать уровню решаемой задачи и имеющимися для их осуществления техническими средствами;

- обеспечивать точность исследований, быть экономичными, устойчивыми.

Соответствие математической модели работы питателя ФРС решаемой задаче

было достигнуто путем сопоставления структуры и особенностей поведения реальной системы и ее модели [13, 23]. Принятие допущения о представлении снега как совокупности отдельных частиц конечного размера, взаимодействующие между собой, отражает реальное представление о его субстанциональном состоянии, особенно это характерно при температурах близких к нулю и для уплотненного снега [13].

Принятие, для некоторых режимов работы питателя ФРС, допущения об отсутствии влияния воздушного потока на параметры транспортируемого снега при работе питателя (в контексте поставленной задачи) сделало модель более простой и экономичной, также снизило затраты времени на получение результатов требуемой точности при достаточной достоверности математического моделирования [13].

Адекватность математической модели работы питателя ФРС, как исследуемой системы, реальному объекту определяет достоверность результатов теоретических исследований по основным динамическим свойствам [13].

Методом подтверждения адекватности математической модели «ФРС – питатель – снежный массив» служило сравнение экспериментальных и теоретических параметров снежного массива при его транспортировании в питателе.

Надежность результатов теоретических исследований обеспечена в работе применением научно обоснованного плана проведения эксперимента, под которым понимается процедура выбора достаточного числа и необходимых условий при проведении наблюдений, для решения поставленных задач с требуемой точностью. При решении задач, носящих вероятностный характер, точность решения проверялась результатом совокупности случайных характеристик исследуемых величин и процессов: законов распределения случайной величины, математического ожидания, среднеквадратического отклонения, коэффициентом детерминации и так далее. При детерминированных задачах критериями являлись дискретные значения [13, 23].

При изучении динамических свойств питателя ФРС были использованы детерминированные и стохастические свойства снежного массива, которые позволяли установить связь между эффективностью работы питателя и параметрами частиц снежного массива [13].

В общем виде динамические свойства объекта были представлены в различной форме: в виде дифференциальных уравнений, передаточных функций отдельных звеньев системы [22, 55].

Каждая из форм представления динамики изучаемых объектов дает исчерпывающую информацию о нем и выбор формы представления в большинстве случаев определяется задачами исследования, требованием обеспечения наглядности происходящих процессов, возможностями вычислительной техники и так далее [21, 25]. В данной работе для описания динамических свойств питателя целесообразно использовать дифференциальные уравнения, которые дают достаточно полное представление о процессах, происходящих в подсистемах питателя ФРС, и предназначены для решения следующих задач:

1. Разработка математической модели работы питателя ФРС, на основе принятых уравнений, которая позволила решить задачи кинематики и динамики, провести теоретические исследования его работы при различных внешних условиях [152].
2. Моделирование различных режимов работы питателя ФРС [152].
3. Оценка эффективности работы питателя на этих режимах [152].

2.3 Методы экспериментальных исследований и обработка полученных данных

Принятый в работе комплексный метод исследований предполагает проведение экспериментальных исследований, основными задачами которых являются [152]:

- определение и уточнение численных значений параметров элементов и подсистем, входящих в математическую модель работы питателя ФРС;
- подтверждение адекватности разработанной математической модели рабочего процесса питателя ФРС;
- подтверждение эффективности применения, предлагаемого в данной работе, технического решения, направленного на совершенствование работы питателя ФРС.

В соответствии с тем, какие задачи решались в данной работе, при экспериментальных исследованиях, целесообразно было использовать общепринятые методы проведения эксперимента: активный и пассивный [3, 29].

Активный метод подразумевает формирование воздействий, например, изменении формы и размеров элементов питателя и регистрацию возникающих изменений в транспортируемом питателем снежном массиве в характерных точках (положение и количество элементов снежного массива в питателе). Результаты, которые были получены, несут недостаточную информацию о динамических свойствах объекта, пригодны для поиска оптимальных параметров питателя ФРС и подтверждения адекватности математической модели [13, 152].

Пассивный эксперимент заключался в наблюдении за процессом функционирования исследуемого объекта без вмешательства в этот процесс. Конечной целью пассивного эксперимента являлся сбор и обработка данных об объекте исследования и результатах его функционирования [3, 29]. Метод пассивного эксперимента более оправдан для подтверждения эффективности и работоспособности предложенного технического решения.

Независимо от использования методов проведения эксперимента важным условием их реализации являлось обеспечение достоверности экспериментальной информации с требуемой доверительной вероятностью.

Необходимое число опытов определялось зависимостью [3, 29]:

$$N = \left(\frac{t(p, N)}{\varepsilon} \right)^2 \sigma^2, \quad (2.1)$$

где σ^2 – дисперсия; p – доверительная вероятность (рекомендуется принимать равной 0,95 [29]); ε – доверительная оценка.

Подсчитывались среднеарифметические выборки [3, 29]:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.2)$$

где N – число измерений; x_i – результаты отдельных измерений.

После этого определялись среднеквадратическая ошибка серии измерений [13, 30]:

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N \cdot (N - 1)}}. \quad (2.3)$$

Абсолютная погрешность результата определялась выражением [13, 29]:

$$\Delta a = S_a \cdot t \cdot (p, N), \quad (2.4)$$

где $t(p, N)$ – коэффициент Стьюдента.

Статистическая проверка гипотезы о принадлежности полученных в результате эксперимента данных нормальному закону распределения проводилась по критерию Пирсона и критерию Романовского [13, 42]. Критерий Пирсона χ^2 представлен в виде альтернативного условия [13]: $p_{опыт}(\chi^2; k) \geq a$ – гипотеза о принадлежности опытных данных к рассматриваемому вероятностному закону не отвергается; $p_{опыт}(\chi^2; k) < a$ – гипотеза о принадлежности опытных данных к рассматриваемому вероятностному закону отвергается ($a = 0,05$), где χ^2 вычисляется по формуле [13]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i^* - x_i)^2}{x_i}, \quad (2.5)$$

где n – число интервалов гистограммы распределения (рекомендуется разбивка полного диапазона распределения случайной величины на 8...12 интервалов); x_i^* – опытное число попаданий случайной величины в интервал [13]; x_i – теоретическое

число попаданий случайной величины в интервал, полученное согласно гипотезе о законе распределения; k – число степеней свободы, равное $k = n - s$; s – число наложенных связей, как правило, $s = 3$ [44]. По известным значениям χ^2 и k , $p_{опыт}$ ($\chi^2; k$) определялись по заранее составленным таблицам [13, 22].

Критерий Романовского записывается в виде альтернативного условия [13]:

$k_p = \frac{(\chi^2 - n)}{\sqrt{2n}} \leq 3$ – гипотеза о принадлежности опытных данных к рассматриваемому вероятностному закону не отвергается; $k_p = \frac{(\chi^2 - n)}{\sqrt{2n}} > 3$ – гипотеза о принадлежности опытных данных к рассматриваемому вероятностному закону отвергается.

Параметры распределения, о принадлежности к которому опытных данных была выдвинута гипотеза, вычислялись по опытным значениям статистических числовых характеристик: среднеарифметическое \bar{x} , среднеквадратическое отклонение σ случайной величины [13].

2.4 Структура работы

В соответствии с поставленной в работе целью, задачами исследования были определены основные этапы, а также структура работы. На рисунке 2.3 представлена структура диссертационной работы, основными этапами которой являются:

1 Состояние вопроса.

1.1 Обзор и классификация роторных снегоочистителей и анализ существующих конструкций питателя ФРС.

1.2. Анализ существующих методов выбора основных параметров питателя ФРС.

1.3 Анализ существующих математических моделей работы питателя ФРС.

2 Методика выполнения работы.

2.1 Методика теоретических исследований работы питателя ФРС.

2.2 Методика экспериментальных исследований работы питателя ФРС и эффективности предлагаемых решений.

3 Математическое моделирование работы питателя ФРС.

3.1 Разработка пространственной расчетной схемы питателя ФРС.

3.2 Математическое описание взаимодействия фрезы питателя со снежным массивом.

3.3 Имитационная модель механической подсистемы ФРС.

4 Теоретические исследования рабочего процесса ФРС.

4.1 Обоснование и выбор критериев эффективности рабочего процесса ФРС.

4.2 Моделирование процесса транспортирования снежной массы и разгрузки фрезы питателя ФРС.

4.3 Выявление зависимостей кинематических и энергетических характеристик снежного массива и питателя ФРС, характеризующих рабочий процесс питателя.

4.4 Получение регрессионных зависимостей основных технологических параметров питателя ФРС.

5 Экспериментальные исследования.

5.1 Создание стенда для экспериментальных исследований работы питателя ФРС.

5.2 План экспериментальных исследований работы питателя ФРС.

5.3 Анализ результатов полученных в результате экспериментальных исследований работы питателя ФРС.

5.4 Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований.

6 Практическое использование результатов исследований.

6.1 Разработка инженерной методики расчета технологических параметров питателя ФРС.

6.2 Внедрение результатов исследований в учебный процесс и производство.

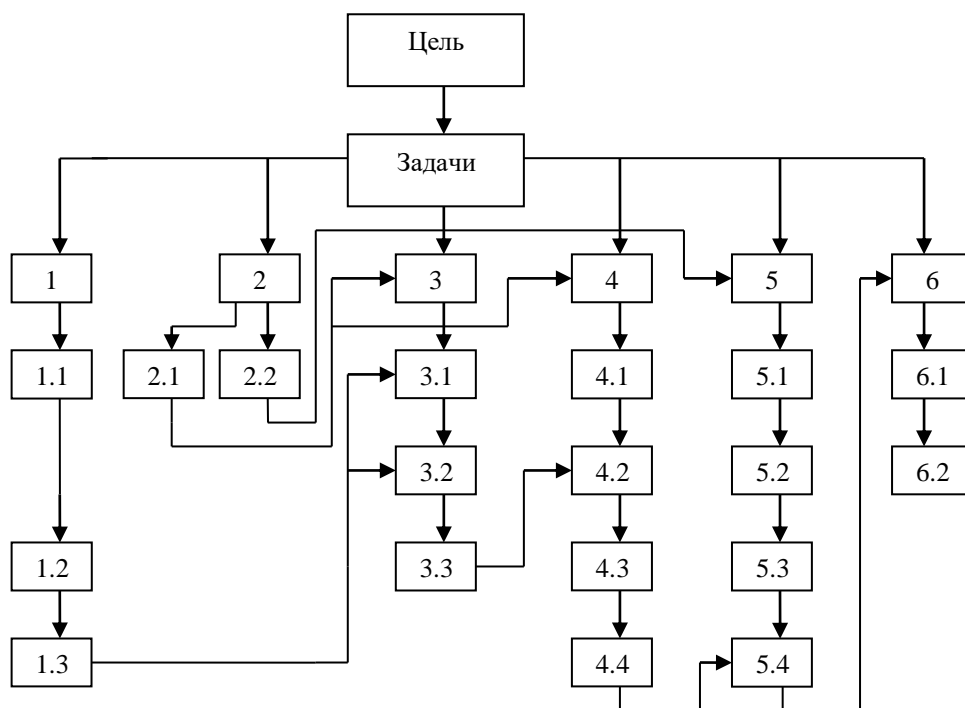


Рисунок 2.3 – Структурная схема работы

Основные выводы по главе

1. Для решения задач, поставленных в работе, взят за основу комплексный метод исследования, содержащий теоретические и экспериментальные исследования работы питателя ФРС.

2. Для подтверждения адекватности математической модели работы питателя ФРС и определения эффективности предлагаемых в работе решений был обоснован пассивный полный факторный эксперимент.

3. Методика теоретических исследований работы питателя ФРС базируется на исследовании поведения математической модели взаимодействия снежного массива с элементами питателя ФРС, которая с требуемой точностью отражает изучаемые свойства системы «питатель ФРС – снежный массив».

4. Основой методики представления результатов экспериментальных исследований работы питателя ФРС является регрессионный анализ.

5. Структура работы основана на методологии системного анализа и содержит упорядоченную последовательность основных этапов работы [1].

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ПИТАТЕЛЯ ФРЕЗЕРНО-РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ

3.1 Исследование кинематики движения фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя

При анализе рабочего процесса питателя особое место занимают вопросы, связанные с траекторией движения массы снега, так как они определяют конструктивные элементы питателя, основной задачей которого является обеспечение кратчайшего пути снега из забоя к ротору метательного аппарата, что в свою очередь позволяет оценить один из главных параметров, влияющих на эффективность и область применения снегоочистителей – производительность.

Особенностью работы питателя ФРС является то, что объединяется три относительно самостоятельных процесса: отделение снежной массы фрезой питателя ФРС, транспортирование вырезанной снежной массы фрезой питателя в область загрузочного окна с последующим отбрасыванием в пространство метательного аппарата ФРС. Для повышения эффективности работы ФРС необходима интенсификация каждого из перечисленных процессов, формирующих технологический цикл проведения снегоочистных работ ФРС [7].

Производительность работы снегоочистителя зависит от работы фрезы, которая вырезает серповидные стружки снега [142, 155]. Рассмотрим, как формируется объем снежной стружки при работе фрезы.

Для этого определим траекторию движения режущей кромки фрезы снегоочистителя.

Введем прямоугольную систему координат $O_0X_0Y_0Z_0$, которую будем считать неподвижной, где начало координат помещаем в начало очищаемого от снега участка. Ось O_0X_0 проходит через ось фрезы и направлена в сторону движения снегоочистителя. Ось O_0Z_0 направлена перпендикулярно очищаемой поверхности. Ось O_0Y_0 дополняет до правой ортогональной декартовой системы координат.

Введем локальную систему координат $OXYZ$, связанную с фрезой питателя следующим образом; начало координат O совпадает с осью вращения фрезы в левой крайней точке; ось OX совпадает с направлением движения снегоочистителя; ось OZ направлена перпендикулярно основанию; ось OY дополняет до правой ортогональной декартовой системы координат (рисунок 3.1, 3.2).

В общем виде фреза питателя совершает поступательное движение со скоростью движения снегоочистителя, V , и относительное вращение вокруг своей оси с угловой скоростью, ω . Геометрические характеристики фрезы представлены на рисунке 3.3.

Траектория движения i – ой точки фрезы в плоскости $X_0O_0Z_0$ описывается уравнениями [29, 68]:

$$\begin{cases} x_0(t) = Vt + x_i \cdot \sin \varphi(t); \\ z_0(t) = x_i \cdot \cos \varphi(t); \\ \varphi(t) = \omega \cdot t, \end{cases} \quad (3.1)$$

где t – текущее время.

В горизонтальной плоскости $X_0O_0Y_0$ в процессе движения фрезы, координата $y_i(t)$ i – ой точки фрезы остается неизменной [121]:

$$y_i(t) = x_i \cdot \sin \theta, \quad (3.2)$$

где θ – угол захода винтовой линии фрезы.

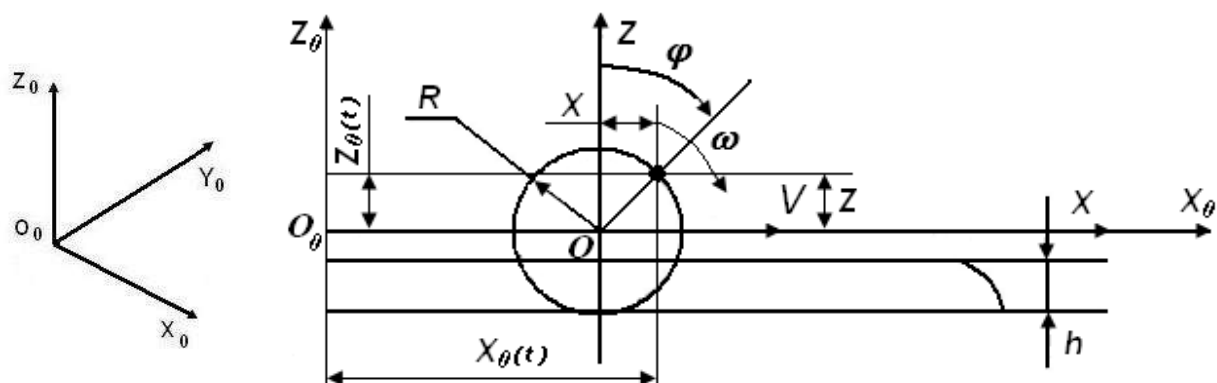


Рисунок 3.1 – Расчетная схема траектории движения фрезы, вид сбоку:

h – высота снежного покрова

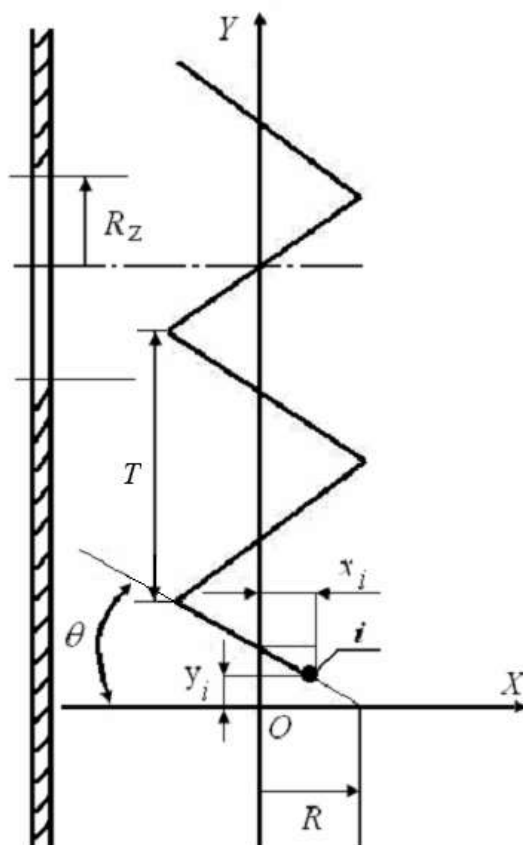


Рисунок 3.2 – Расчетная схема траектории движения i -ой точки фрезы, вид сверху:

θ – угол захода фрезы, град;

T – шаг винтовой линии ленты фрезы

Ниже представлены зависимости, связывающие между собой конструктивные параметры фрезы питателя ФРС:

$$T = 2\pi R \cdot \operatorname{tg} \theta; \quad (3.3)$$

$$T_{\text{ш}} = \frac{T}{n} = \frac{2\pi R}{n} \cdot \operatorname{tg} \theta; \quad (3.4)$$

для двухзаходной фрезы:

$$T_{\text{ш}} = \pi R \cdot \operatorname{tg} \theta. \quad (3.5)$$

В локальной системе координат $OXYZ$ (см. рисунок 3.1), уравнения геометрического места точки ленты фрезы, находящейся на расстоянии R от оси вращения (см. (3.1)), описывается [121]:

$$x(t) = R \cdot \sin \varphi(t) = R \cdot \sin \omega t; \quad (3.6)$$

$$z(t) = R \cdot \cos \varphi(t) = R \cdot \cos \omega t; \quad (3.7)$$

$$y(t) = R \cdot \sin \theta = \text{const.} \quad (3.8)$$

Второе уравнение делим на первое:

$$\begin{cases} \frac{z(t)}{x(t)} = \text{tg } \varphi(t) = \text{tg } \omega t; \\ x^2(t) + z^2(t) = R^2. \end{cases} \quad (3.9)$$

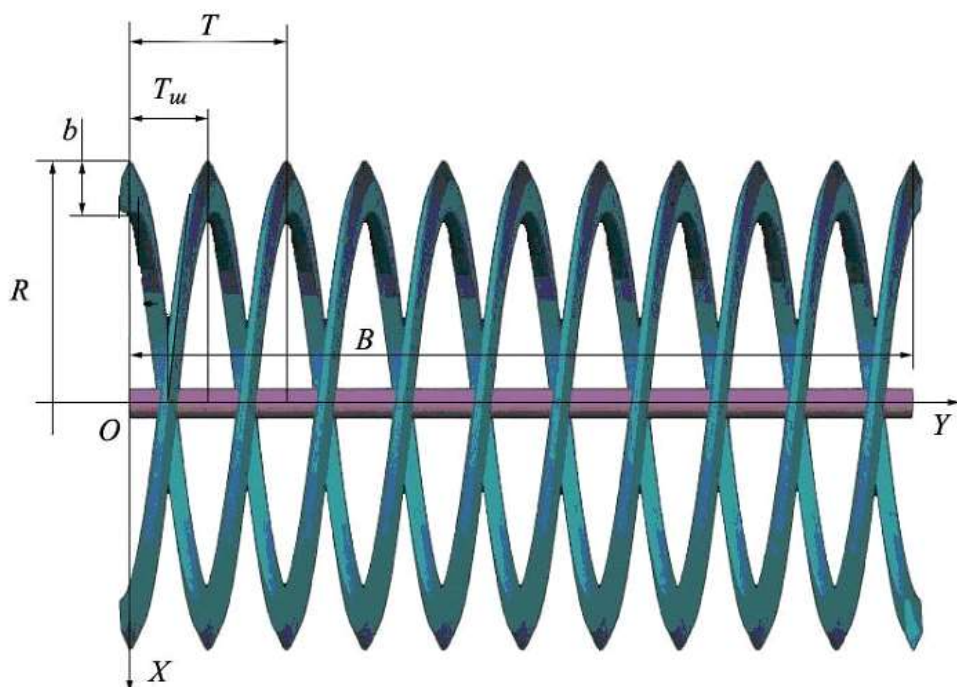


Рисунок 3.3 – Геометрические характеристики двухзаходной фрезы, вид сверху:
 B – ширина фрезы, м; R – радиус фрезы, м; T – шаг винтовой линии ленты фрезы;
 T_{uu} – шаг двухзаходной ленты фрезы

Из систем уравнений (3.1) следует, что i – ая точка фрезы в процессе вырезания стружки снега из снежного массива, движется по траектории, представляющей собой:

- в плоскости $X_0O_0Z_0$ траектория i – ой точки описывается уравнением циклоиды [121];
- в плоскости YOZ координата i – ой точки фрезы остается неизменной;
- в пространстве локальной системы координат $OXYZ$ i – ые точки ленты фрезы совершают вращательные движения вокруг оси Y .

Известно, что в зависимости от соотношения поступательной скорости, V и угловой скорости, ω уравнение циклоиды может принимать два вида,

характеризующиеся наличием как минимум одной точки пересечения (рисунок 3.4), или не одной (рисунок 3.5) [121].

Определим условия, при которых будет присутствовать тот или иной вид циклоиды. От того, какую траекторию опишет i – ая точка фрезы питателя, будет зависеть место и время ее контакта с элементом снежной массы, динамические характеристики вырезаемой снежной массы и эффективность работы питателя. Проведем анализ системы (3.1) и определим наличие касательных данной функции.

По системе уравнений (3.1) вычислим производные по времени t для точек, находящихся на расстоянии R от оси вращения фрезы [121]:

$$\frac{dz_0}{dt} = \frac{d(R \cdot \cos \omega \cdot t)}{dt} = -\omega \cdot R \cdot \sin \omega \cdot t; \quad (3.10)$$

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{d(Vt + R \cdot \sin (\omega \cdot t))}{dt} = V + \omega \cdot R \cdot \cos \omega \cdot t. \quad (3.11)$$

Исключим из этой системы уравнений dt [121]:

$$\frac{dz_0}{dx_0} = \frac{-\omega \cdot R \cdot \sin \omega \cdot t}{V + R \cdot \cos \omega \cdot t}. \quad (3.12)$$

Горизонтальные касательные имеют наклон:

$$\frac{dz_0}{dx_0} = 0. \quad (3.13)$$

Данное уравнение имеет решение если:

$$-\omega \cdot R \cdot \sin \omega \cdot t = 0. \quad (3.14)$$

Соответственно:

$$\sin \omega \cdot t = 0; t = \frac{\pi \cdot n}{\omega}, \quad (3.15)$$

где n – целое число, (0, 1, 2 ... n).

Уравнение для нахождения вертикальных касательных определяется из выражения (3.12) и имеет вид:

$$\frac{dz_0}{dx_0} = \pm \infty. \quad (3.16)$$

Очевидно, равенство (3.16) будет выполняться только при условии:

$$V + \omega \cdot R \cdot \cos \omega \cdot t = 0. \quad (3.17)$$

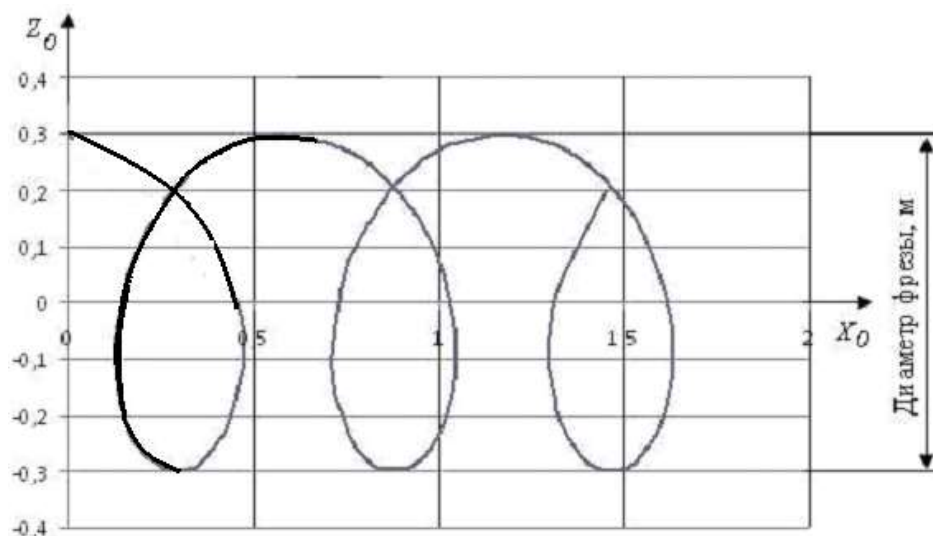


Рисунок 3.4 – Предпочтительная траектория движения

i -ой точки фрезы при $R = 0,3$ м, $V = 1,4$ м/с, $\omega = 15$ с⁻¹

Для нахождения корней уравнения (3.17), выразим из (3.17) параметр, t :

$$t = \frac{1}{\omega} \arccos\left(-\frac{V}{R\omega}\right); \quad (3.18)$$

$$\varphi(t) = \omega \cdot t = \arccos\left(-\frac{V}{R\omega}\right). \quad (3.19)$$

В данной точке касательная к исследуемой кривой вертикальна.

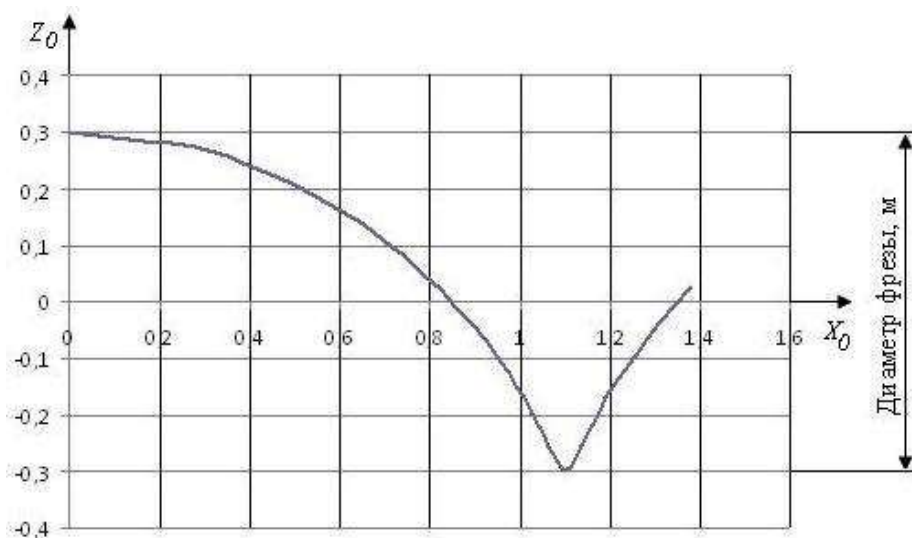


Рисунок 3.5 – Нежелательная траектория движения

i -ой точки фрезы при $R = 0,3$ м, $V = 1,4$ м/с, $\omega = 4$ с⁻¹

Область определения аргумента функции $\arccos\left(-\frac{V}{R \cdot \omega}\right)$ находится в интервале от -1 до 1.

Учитывая тот факт, что угловая скорость вращения фрезы и поступательная скорость движения снегоочистителя не могут принимать отрицательные значения выражение (3.18) будет иметь смысл при:

$$\frac{V}{\omega} \geq 0; \quad (3.20)$$

$$-1 \leq -\frac{V}{R \cdot \omega} \leq 0 \quad (3.21)$$

или

$$0 \leq \frac{V}{R \cdot \omega} \leq 1. \quad (3.22)$$

Решение неравенства (3.22) имеет вид [7]:

$$\omega \geq \frac{V}{R} \quad (3.23)$$

или

$$R \geq \frac{V}{\omega}. \quad (3.24)$$

При $\omega \geq \frac{V}{R}$ у циклоиды как минимум одна точка пересечения и при этом она имеет две вертикальные касательные (рисунок 3.4). Во всех остальных случаях у циклоиды вертикальные касательные отсутствуют (рисунок 3.5).

Область решения неравенства (3.23) представлена на рисунке 3.6.

Из рассмотрения уравнения (3.9) следует, что i – я точка фрезы совершает периодическое движение как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Период вращения фрезы, T_B , можно определить из третьего уравнения системы (3.1):

$$\omega T_B = 2\pi; \quad (3.25)$$

$$T_B = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (3.26)$$

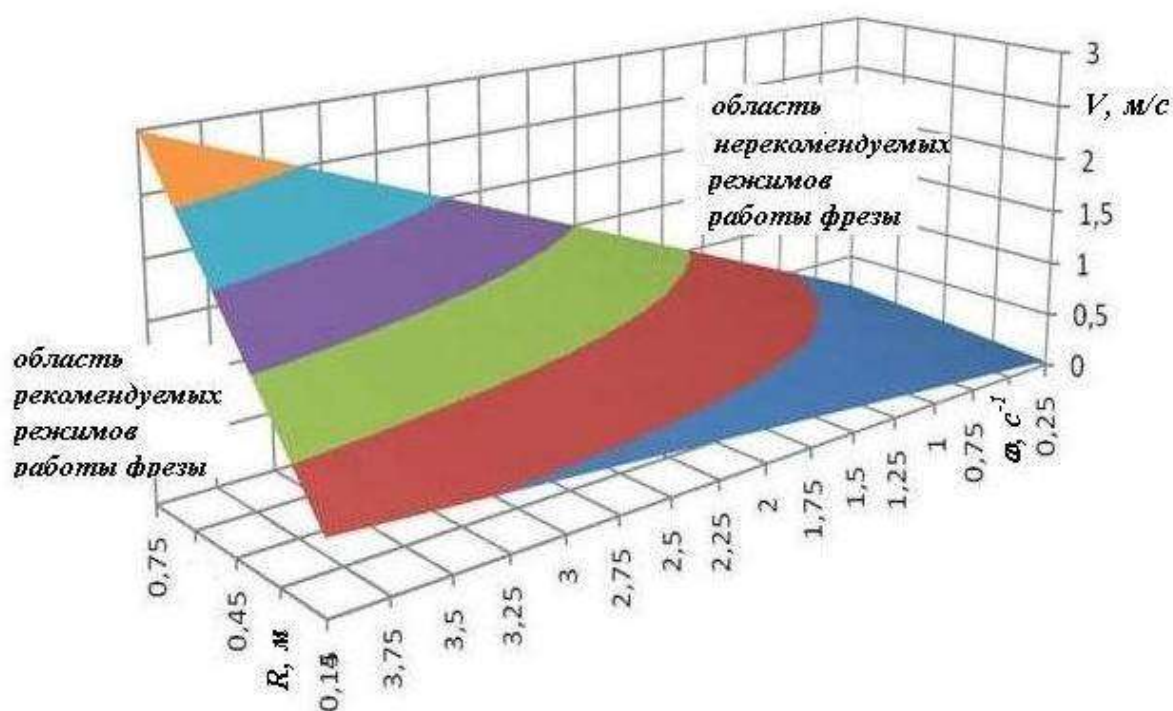


Рисунок 3.6 – Поверхность, определяющая характер движения i – ой точки фрезы в плоскости XOZ

На рисунке 3.7 представлен объем снежной призмы ограниченный шириной S траекториями движения режущей кромки фрезы в горизонтальной и вертикальной плоскостях за один период вращения фрезы.

В главе 1 указывается, что фрезы могут быть одно, двух, трехзаходные. Влияние числа заходов фрезы на ее траекторию движения проявляется в том, что время вырезания снежной массы за один оборот фрезы одной лентой, уменьшается на число заходов фрезы и уравнение (3.26) принимает вид:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega \cdot n}, \quad (3.27)$$

где n – число заходов фрезы.

Ширина ленты фрезы может быть произвольной, основное условие эффективной работы фрезы питателя ФРС заключается в том, чтобы за один оборот однозаходная фрезы обеспечила поступление вырезанной снежной массы в метательный аппарат, а многозаходная фреза сделала это n раз.

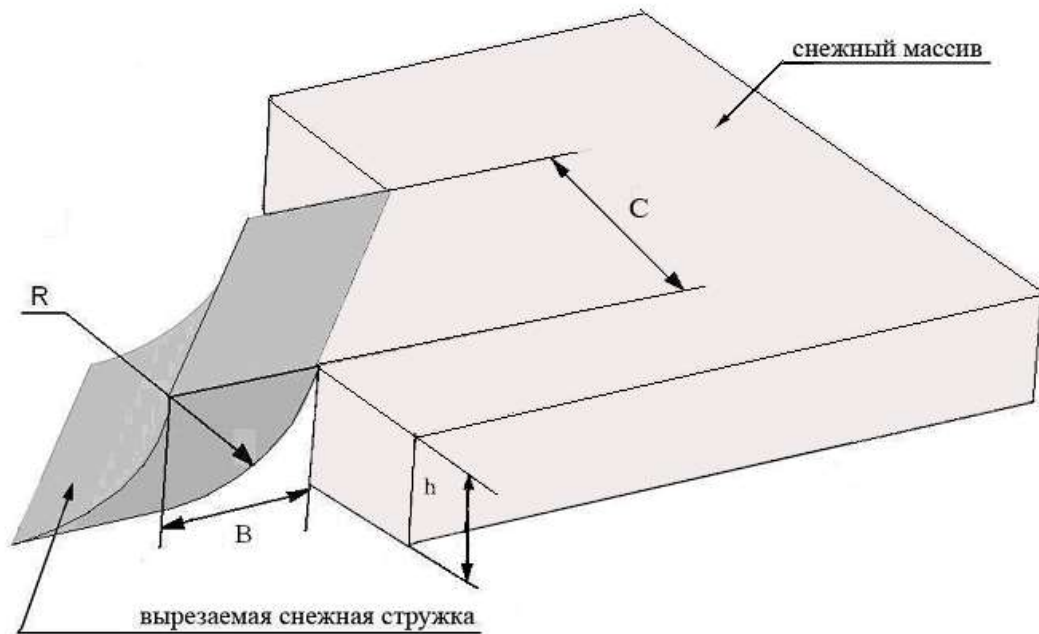


Рисунок 3.7 – Вид снежной массы, вырезаемой фрезой питателя из снежного массива

3.2 Определение теоретического объема снежной массы, вырезаемой фрезой питателя фрезерно-роторного снегоочистителя

Эффективность работы питателя ФРС зависит от работы фрезы. Одним из показателей работы питателя ФРС является его способность обеспечивать постоянную и полную загрузку метательного аппарата ФРС B в процессе вращения фрезы частично теряется транспортируемый ею снег, в том числе и за счет того, что высота снежной призмы превышает ширину ленты фрезы. Данный факт хорошо заметен на рисунке 3.8. Соответственно, представляется актуальным знание того, от каких параметров ФРС зависит объем вырезаемой снежной призмы и каков характер этого влияния [11].

Известно, что объем может быть вычислен как тройной определенный интеграл. Представим вырезаемую снежную массу фрезой питателя ФРС (рисунок 3.8), как тройной определенный интеграл. Для проведения операции интегрирования необходимо определить пределы интегрирования:



Рисунок 3.8 – Фрезерно-роторный снегоочиститель в работе

- по оси OZ : высота снежного покрова; нижний предел интегрирования, 0 ; верхний предел интегрирования, h ;

- по оси OX : ширина вырезаемой снежной стружки, которая определяется числом заходов фрезы, и кинематическими параметрами ФРС и питателя; нижний предел интегрирования, 0 ; верхний предел за один оборот: $2\pi \frac{V}{n \cdot \omega}$, для всех заходов, для фрезы в целом: $V \frac{\varphi}{n \cdot \omega}$.

- по оси OY , пределы интегрирования также зависит от кинематических параметров снегоочистителя и питателя; связь между шириной, вырезаемой снежной стружки, и шириной захвата фрезы питателя ФРС, при постоянном угле захода фрезы, может быть представлена соотношением, для одного захода фрезы, при произвольном угле поворота;

- при наличии нескольких, N , шагов винтовой линии ленты фрезы, T , для одного захода:

$$y = N \cdot R \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \varphi, \quad (3.28)$$

$$y = \frac{R \cdot \omega \cdot \operatorname{tg} \theta}{V} x. \quad (3.29)$$

связь между шириной, вырезаемой снежной стружки, и шириной захвата фрезы питателя, при постоянном угле захода фрезы, может быть представлена соотношением:

$$2 \cdot \frac{n \cdot \omega}{V} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{B}{R \cdot \cos \theta} \right) = \varphi. \quad (3.30)$$

Соответственно, объем вырезаемой снежной призмы, имеет вид:

$$W = \int_0^h \int_0^{R \cdot \operatorname{tg} \theta \frac{\varphi}{n}} \int_0^{2\pi \frac{V}{n \cdot \omega}} dx \cdot dy \cdot dz. \quad (3.31)$$

В результате интегрирования объем, вырезаемый фрезой, будет иметь вид [11]:

$$W_n = h \frac{R \cdot \omega \cdot \operatorname{tg} \theta}{V} 2\pi \frac{V}{n \cdot \omega}, \quad (3.32)$$

где h – высота снежного покрова, R – радиус фрезы, ω – угловая скорость вращения фрезы, θ – угол захода фрезы, V – скорость снегоочистителя, n – число заходов фрезы.

Или

$$W_n = 2\pi \cdot h \cdot B \frac{V}{n \cdot \omega} = 4\pi \cdot h \cdot R \cdot \operatorname{tg} \theta \frac{V}{n^2 \cdot \omega}. \quad (3.33)$$

Анализ уравнения (3.33) показывает, что объем вырезаемый фрезой питателя ФРС является функцией от ее 3 геометрических и 2 кинематических параметров.

В работе [68] объем призмы, вырезаемый фрезой питателя ФРС представлен в виде:

$$W_n = \pi \cdot v^2 R / (4 \operatorname{tg} \rho \cdot \cos \theta), \quad (3.34)$$

где $\operatorname{tg} \rho$ – угол внутреннего трения снега.

который не учитывает кинематические характеристики питателя и ФРС в целом [11].

Выражение (3.34) объема вырезаемой снежной массы фрезой питателя, может быть интерпретировано как, объем, заполняющий все пространство в питателе ФРС. Из рассмотрения траектории движения фрезы в процессе ее взаимодействия

со снежным массивом, становится очевидным, что вырезанная снежная масса должна заполнять свободное пространство внутри питателя, которое представляет собой часть цилиндра, ограниченную лентой фрезы в пределах одного периода - для однозаходной фрезы, для случая многозаходной фрезы – это пространство между двумя витками (рисунок 3.9) [11, 68].

Для случая постоянного угла захода ленты фрезы, расстояние между участками фрезы в пределах шага, $T_{ш}$, будет одинаково, и объем в питателе ФРС, W_n , заполняемый вырезанной снежной массой, будет равен:

$$W_n = T_{ш} \cdot S, \quad (3.35)$$

где S – площадь, заполненная снежной массой, в сечении нормальном к поверхности отвала питателя (рисунок 3.9).

Площадь сечения, которую представляем в виде сегмента, определяется по соотношению [121]:

$$S = \frac{R^2}{2} \left(\arccos \frac{(R-b)}{R} - \sin \left(\arccos \frac{(R-b)}{R} \right) \right), \quad (3.36)$$

где R – радиус фрезы, м; b – толщина транспортируемой призмы снега, теоретически она совпадает с шириной ленты фрезы.

Соответственно объем с учетом выражения (3.34) равен:

$$W_c = R^3 \cdot \pi \cdot \frac{\operatorname{tg} \theta}{n} \cdot \left(2 \arccos \left(\frac{R-b}{R} \right) - \sin \left(2 \arccos \left(\frac{R-b}{R} \right) \right) \right). \quad (3.37)$$

Используя данное соотношение и выражение объема вырезанной снежной массы, выражаем высоту призмы снега, транспортируемую фрезой:

$$W_c = W_n \quad (3.38)$$

или

$$\frac{\pi}{n} \cdot R^3 \cdot \tan \theta \cdot \left(\arccos \frac{(R-b)}{R} - \sin \left(\arccos \frac{(R-b)}{R} \right) \right) = W_n. \quad (3.39)$$

В общем виде равенство примет вид:

$$\frac{\pi}{n} \cdot R^2 \cdot \tan \theta \cdot \left(\arccos \frac{(R-b)}{R} - \sin \left(\arccos \frac{(R-b)}{R} \right) \right) = \frac{N}{n} h \cdot R \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \frac{V}{\omega} \varphi^2. \quad (3.40)$$

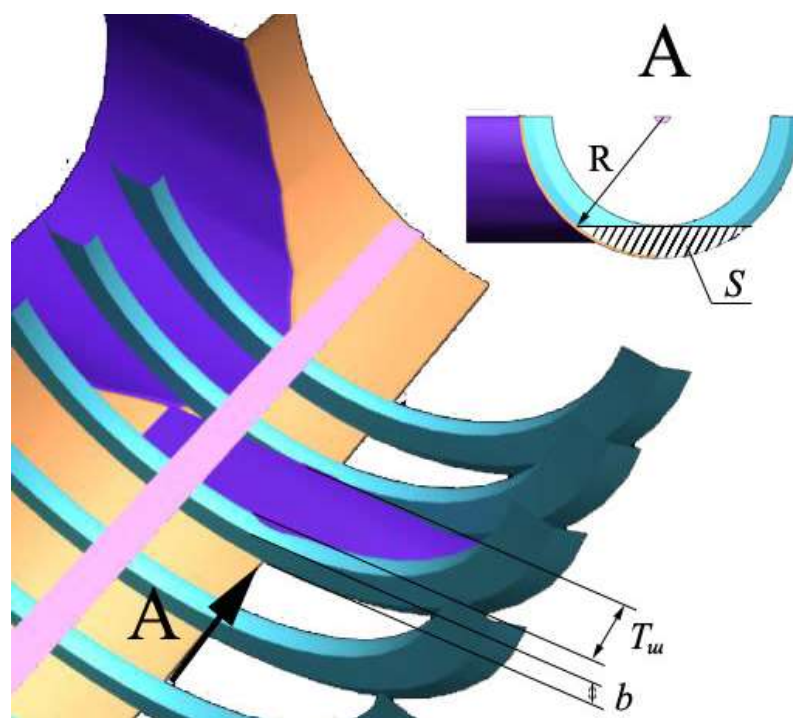


Рисунок 3.9 – Схема транспортирования снежной призмы

Выражаем толщину транспортируемой снежной призмы:

$$\arccos\left(\frac{R-b}{R}\right) - \sin\left(\arccos\left(\frac{R-b}{R}\right)\right) = \frac{n \cdot W_n}{\pi \cdot R^3 \cdot \operatorname{tg} \theta} \quad (3.41)$$

или

$$\arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) - \sqrt{\frac{h^2}{R^2}} = \frac{n \cdot W_n}{\pi \cdot R^3 \cdot \operatorname{tg} \theta}. \quad (3.42)$$

Для фрезы с постоянным углом захода после подстановки (3.43):

$$\pi R^2 \cdot \left(\arccos\left(\frac{R-b}{R}\right) - \sin\left(\arccos\left(\frac{R-b}{R}\right)\right) \right) = n \cdot h \frac{V}{\omega} \varphi^2. \quad (3.43)$$

Для случая одного периода, т.е. $N = 1$:

Получили уравнение, из которого определяется ширина ленты фрезы в зависимости от центрального угла, определяющего положение точки фрезы в системе координат $OXYZ$. Данное уравнение в явном виде не имеет решения.

Можно перейти к Y , что может быть в ряде случаев более наглядно:

$$\frac{y}{N \cdot R \cdot \operatorname{tg} \theta} = \varphi. \quad (3.44)$$

Очевидным является тот факт, что максимальная высота снежной призмы, при которой исключены потери снежной массы, должна быть равна ширине ленты фрезы. Соответственно, решая полученное выражение относительно угловой скорости вращения фрезы, при заданной ширине ленты фрезы, получим угловую скорость, исключаящую потери снежной массы.

Для численного решения уравнений вида (3.43) могут быть использованы следующие методы [89]:

- метод последовательных приближений (метод простой итерации);
- метод Ньютона;
- метод секущих;
- метод половинного деления и т.д.

Метод простой итерации – численный метод приближённого решения алгебраических уравнений и систем, основывается на принципе сжимающего отображения. Суть метода заключается в нахождении по приближённому значению величины следующего приближения (являющегося более точным). Метод простой итерации позволяет получить решение с заданной степенью точностью в виде предела сходящейся последовательности итераций. Основным достоинством данного метода является простая вычислительная процедура.

Программа решения уравнения (3.43) методом простой итерации использует алгоритм, блок-схема которого представлена на рисунке 3.10.

Анализ решения полученного уравнения показал, что величина вырезаемого объема возрастает линейно (рисунок 3.11), при перемещении снежной массы от края ленты фрезы к загрузочному окну метательного аппарата. При этом изменение ширины ленты фрезы имеет слабовыраженный нелинейный характер и возрастает от наружного края питателя к загрузочному окну (рисунок 3.12) [11]. Для многозаходной фрезы количество снежной массы, находящейся между соседними участками ленты фрезы, уменьшается на количество заходов.

В таблице 3.1 представлены исходные данные для решения уравнения (3.43).

Таблица 3.1 – Технологические параметры фрезы питателя ФРС

Технологические параметры фрезы питателя	Вариант 1	Вариант 2
Высота снежного покрова, м	0,21	0,21
Угол захода фрезы, град	19	19
Радиус фрезы, м	0,21	0,21
Число периодов/ширина фрезы, м	3/1,42	3/1,42
Число заходов фрезы питателя ФРС	2	3
Угловая скорость вращения фрезы питателя ФРС, с ⁻¹	7,5	7,5
Поступательная скорость движения ФРС, м/с	0,2	0,4

В результате решения были получены значения ширины ленты фрезы на каждом периоде и вырезаемый объем каждым заходом фрезы для однозаходной, двух и трехзаходных фрез питателя ФРС (рисунки 3.11 и 3.12) [11].

В программе MS Excel для полученных значений было определено уравнение регрессии ширины ленты однозаходной фрезы в зависимости от угла завивки, которое имеет вид:

$$b = 0,0014 \cdot \varphi, \quad (3.45)$$

для двухзаходной и трехзаходной фрез уравнения регрессии, соответственно, имеют вид:

$$b = 0,0004 \cdot \varphi, \quad (3.46)$$

$$b = 0,0003 \cdot \varphi, \quad (3.47)$$

при этом значение коэффициент детерминации во всех случаях равно $R^2 = 0,99$

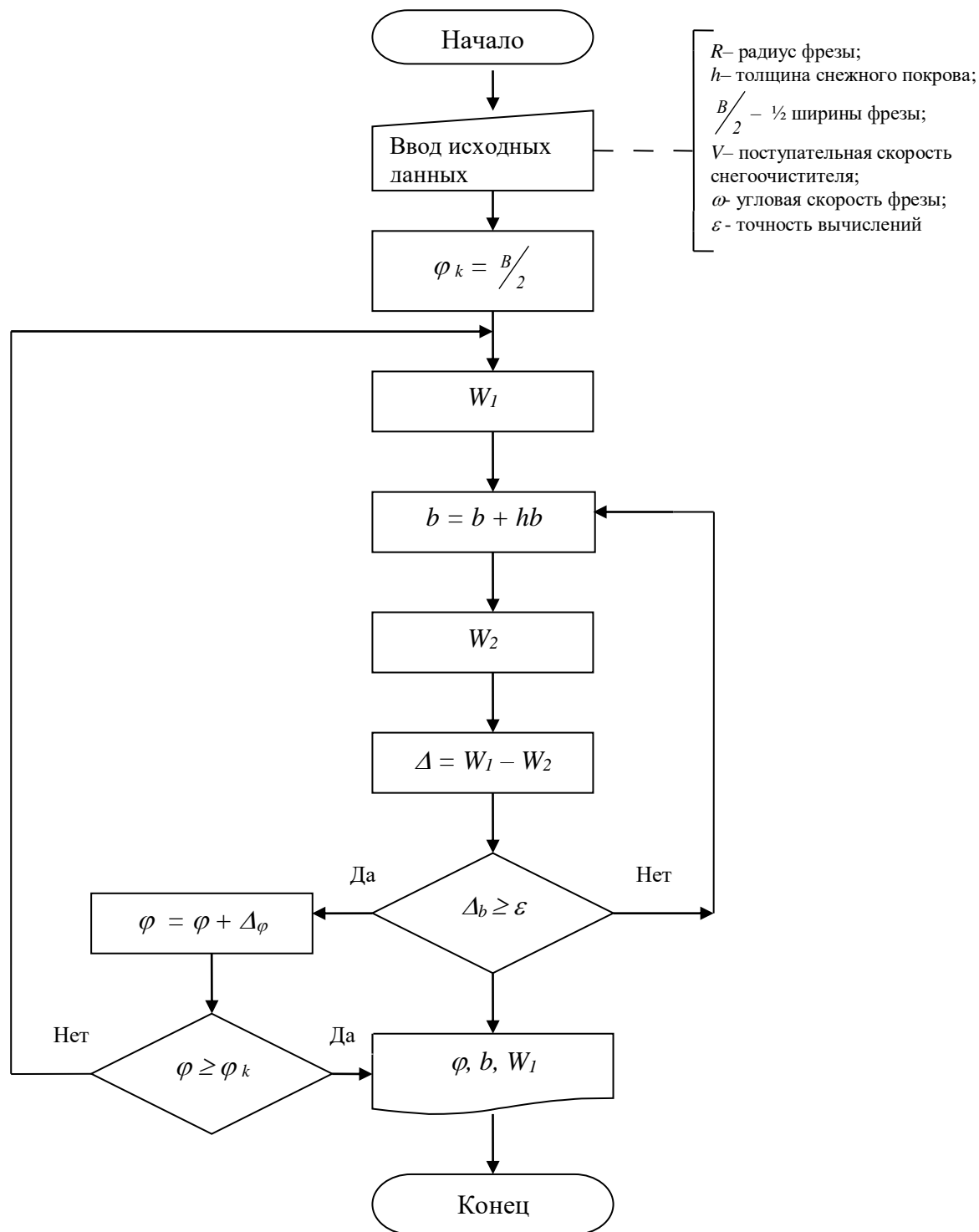


Рисунок 3.10 – Блок-схема алгоритма определения переменной ширины ленты фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя

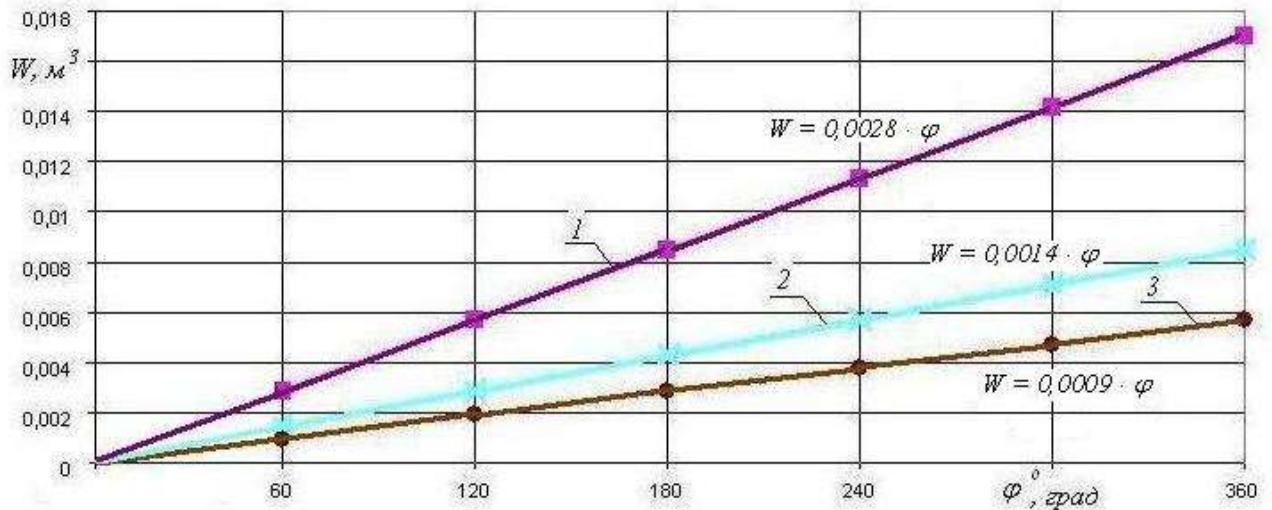


Рисунок 3.11 – Изменение транспортируемого объема снежной призмы (снег свежесвыпавший плотностью 160 кг/м^3 , при температуре окружающего воздуха до -10C°) для однозаходной, двухзаходной и трехзаходной фрез:

- 1 – объем снежной призмы, вырезаемый однозаходной фрезой, м³;
- 2 – объем снежной призмы, вырезаемый одним заходом двухзаходной фрезы, м³;
- 3 – объем снежной призмы, вырезаемой одним заходом трехзаходной фрезы, м³

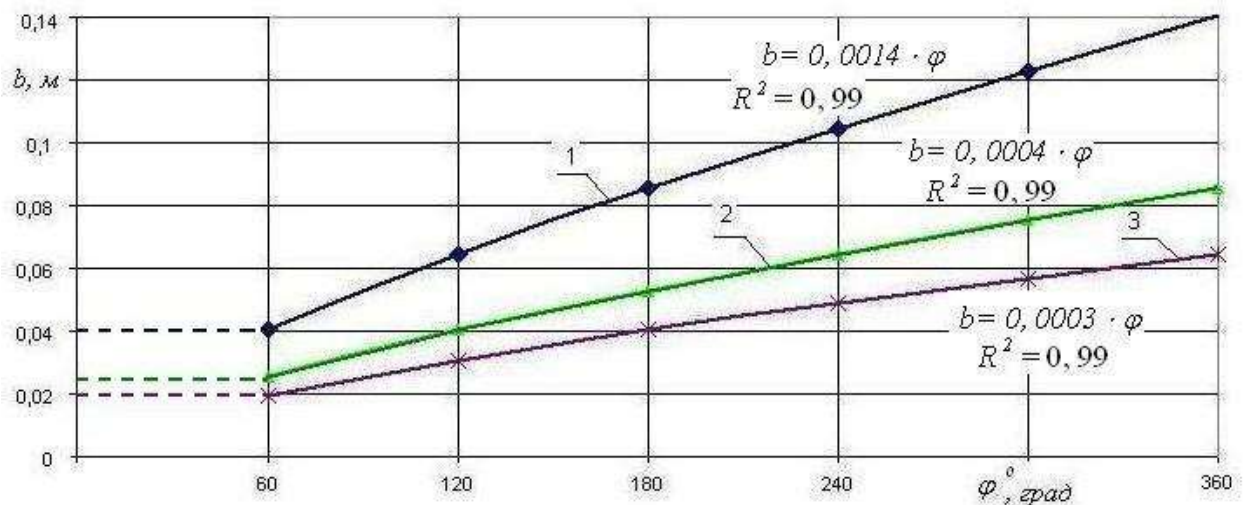


Рисунок 3.12 – Изменение ширины ленты фрезы для однозаходной, двухзаходной и трехзаходной фрез: 1 – ширина ленты однозаходной фрезы, м, 2 – ширина ленты двухзаходной фрезы, м; 3 – ширина ленты трехзаходной фрезы, м

На рисунках 3.13 и 3.14 представлены визуализации фрез с шириной ленты, обеспечивающей соответствие высоте фигуры, ограничивающей вырезанный объем снежной массы [11].

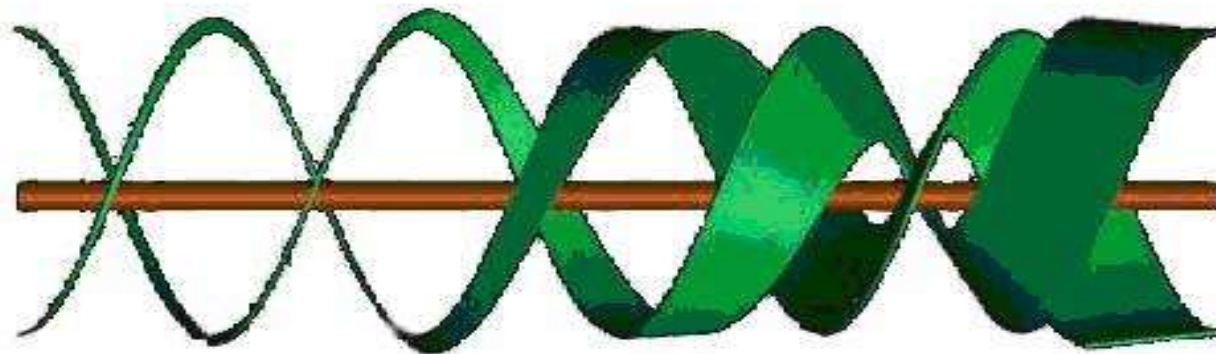


Рисунок 3.13 – Двухзаходная фреза

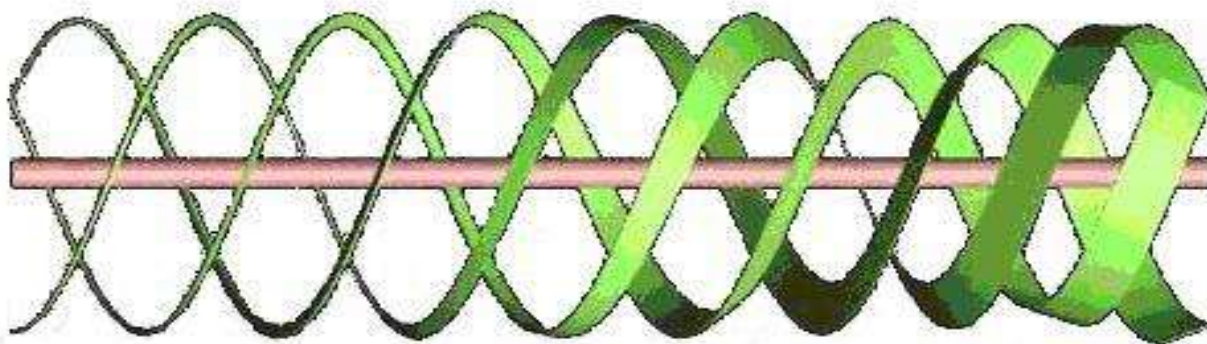


Рисунок 3.14 – Трехзаходная фреза

Был проведен сравнительный анализ масс и моментов инерции трех типов рабочих органов питателей ФРС:

1. Фреза с постоянной шириной ленты, $b = 0,04$ м.
2. Фреза с переменной шириной ленты (рисунок 3.15). Ширина ленты которой определялась на основании решения уравнения (3.43) при исходных данных, соответствующих варианту №1 (Таблица 3.1).
3. Фреза с шириной ленты равной радиусу фрезы (шнек) (рисунок 3.16).

Исходные данные:

- наружный радиус фрезы 0,15 м;
- фреза двухзаходная;
- длина рабочего органа равна ширине шага фрезы, который равен:

$$T_{ш} = 2\pi \frac{R \cdot \operatorname{tg} \theta}{n} = 0,314 \text{ м.} \quad (3.48)$$

Определение массовых характеристик определялось в среде T-Flex, где основообразующим материалом являлась конструкционная сталь из стандартной библиотеки программного продукта.

Массы и моменты инерции трех типов фрез представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Массы и моменты инерции различных рабочих органов питателей ФРС

Фреза	m , кг	J_z , кг/м ²
Фреза с постоянной шириной ленты	0,839	$1,747 \cdot 10^{-2}$
Фреза с переменной шириной ленты	1,702	$2,103 \cdot 10^{-2}$
Фреза с шириной ленты равной радиусу фрезы (шнек)	2,577	$2,508 \cdot 10^{-2}$

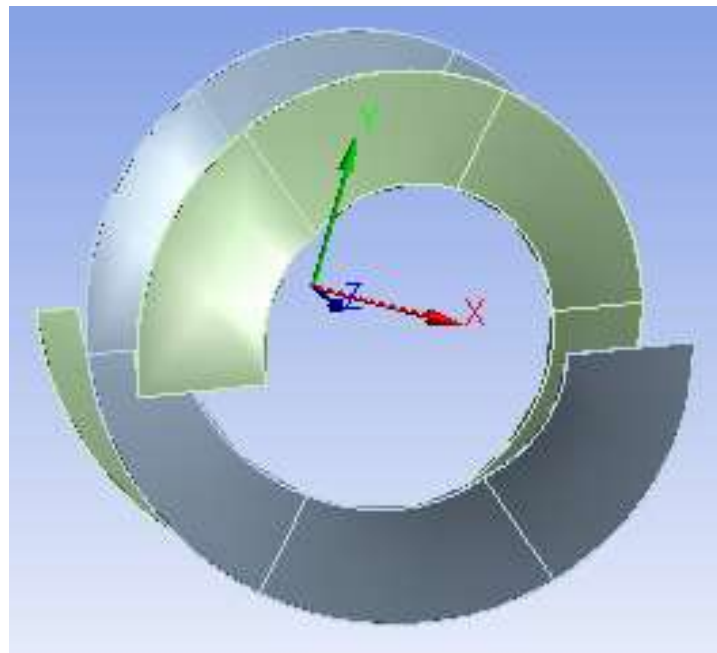


Рисунок 3.15 – Фреза с переменной шириной ленты

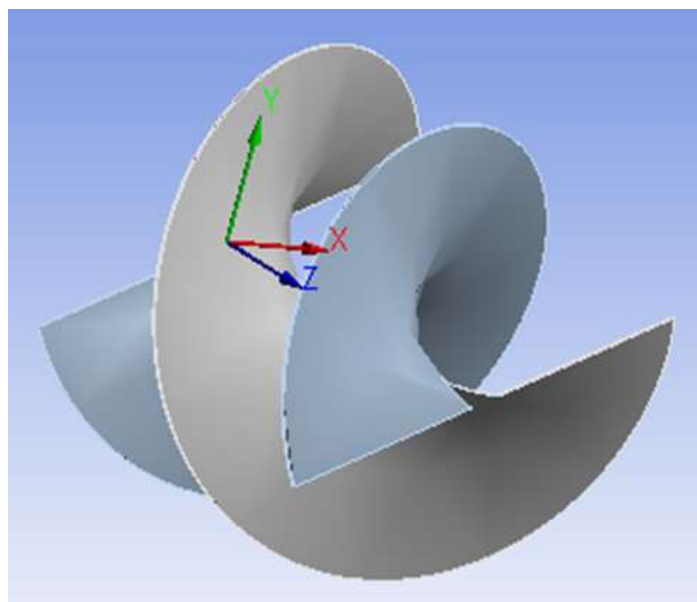


Рисунок 3.16 – Фреза с шириной ленты, равной радиусу фрезы (шнек)

В первой главе был проведен анализ существующих конструктивных схем ФРС, для коммунальных однодвигательных, с мощностью двигателя 20-60 кВт с цельной ленточной фрезой. Технологические параметры питателя составляют: ширина захвата от 0,5 до 1 м; фреза выполнена по двух, трехзаходной схеме; одно, двух, трех шаговые. Используя формулу (3.43) представляется возможным выбрать ширину ленты фрезы, количество заходов и шагов из условия обеспечения более полной загрузки метательного аппарата для различных угловой скорости вращения фрезы и поступательной скорости снегоочистителя. При этом массовые и инерционные характеристики фрезы принимают промежуточные значения между лентой фрезы постоянной ширины и шнеком.

3.3 Динамика снежного массива в питателе фрезерно-роторного снегоочистителя

Исследования динамических характеристик питателя ФРС с переменной шириной ленты фрезы, базирующиеся на его адекватной математической модели, является важным этапом проектирования ФРС с переменной шириной ленты

фрезы. Это позволяет оценить возможность распространения результатов исследований на все множество, U , или его отдельные подмножества, образованные общностью функционального назначения, типов питателя, форм и размеров фрезы питателя ФРС, трансмиссии и т.д.

В главе 2 было показано, что одним из ключевых элементов математической модели работы фрезы питателя ФРС является ее расчетная схема.

При переходе от реальной конструкции питателя ФРС к обобщенной расчетной схеме, приняты основные допущения:

- фреза вращается с постоянной угловой скоростью;
- снегоочиститель движется поступательно с постоянной скоростью;
- снежная частица (снег свежевывавший плотностью 160 кг/м^3 , при температуре окружающего воздуха до -10 C°) имеет выпуклую поверхность без заострений и ребер;
- вращением снежной частицы пренебрегаем;
- снежная частица скользит по поверхности отвала питателя и поверхности ленты фрезы;
- удар отсутствует.

Расчетная схема работы питателя ФРС, с учетом принятых допущений продолжает в достаточной степени адекватно отражать процессы и физические свойства, характерные для реальной системы «фрезерно-роторный снегоочиститель – питатель – снежный массив».

Движение снежной частицы в питателе будем рассматривать в локальной правой ортогональной системе координат $OXYZ$ введенной выше (рисунок 3.1).

С учетом принятых допущений расчетная схема движения снежной частицы в питателе примет вид, изображенный на рисунке 3.17, а движение снежной частицы в зоне загрузочного окна имеет вид, изображенный на рисунке 3.18.

Положение снежной частицы относительно фрезы описывается переменными x_q, y_q, z_q .

Соответственно, скорость снежной частицы относительно фрезы: $\dot{x}_q, \dot{y}_q, \dot{z}_q$.

Для описания движения снежной частицы воспользуемся уравнением Лагранжа первого рода [155, 156]:

$$m \ddot{x} = X_u + \sum_{j=1}^k \lambda_j \frac{\partial f_j}{\partial x}; \quad (3.49)$$

$$m \ddot{y} = Y_u + \sum_{j=1}^k \lambda_j \frac{\partial f_j}{\partial y}; \quad (3.50)$$

$$m \ddot{z} = Z_u + \sum_{j=1}^k \lambda_j \frac{\partial f_j}{\partial z}, \quad (3.51)$$

где m – масса снежной частицы; X_u , Y_u , Z_u – проекции равнодействующей активных сил, приложенных к снежной частице; k – количество связей, наложенных на снежную частицу; λ_j – множители Лагранжа.

Для вывода уравнений движения необходимо определить активные силы. На снежную частицу в питателе действуют силы:

- нормальная реакция поверхности фрезы N_ϕ . Ее проекция на оси координат $OXYZ$ определяется углами α_ϕ , β_ϕ , γ_ϕ , между направлением нормальной реакции N_ϕ и осями координат. N_u – нормальная реакция поверхности отвала ФРС, направлена перпендикулярно отвалу (рисунок 3.17). Аналогично ее проекции на оси координат $OXYZ$ определяется углами α , β , γ ;

- сила трения о поверхность отвала $F_{mpч}$ направлена по касательной к траектории движения. В общем виде направление силы трения определяется углами: φ , ψ , ζ , которые являются углами между направлением касательной к траектории движения и осями координат $OXYZ$ (рисунок 3.43), выражение силы трения в проекциях на оси координат имеет вид:

$$F_{mpч}^X = f_u N_u \cos \varphi; \quad (3.52)$$

$$F_{mpч}^Y = f_u N_u \cos \psi; \quad (3.53)$$

$$F_{mpч}^Z = f_u N_u \cos \zeta, \quad (3.54)$$

где f_u – коэффициент трения снежной частицы о поверхность отвала.

- для силы трения о поверхность ленты фрезы $F_{трф}$. Направление действия силы трения о поверхность ленты фрезы определяется углами: φ_ϕ , ψ_ϕ , ζ_ϕ . Выражение силы трения в проекциях на оси координат имеет аналогичный вид:

$$F_{трф}^X = f_\phi N_\phi \cos \varphi_\phi; \quad (3.55)$$

$$F_{трф}^Y = f_\phi N_\phi \cos \psi_\phi; \quad (3.56)$$

$$F_{трф}^Z = f_\phi N_\phi \cos \zeta_\phi, \quad (3.57)$$

где f_ϕ – коэффициент трения снежной частицы о поверхность отвала.

- сила тяжести, \vec{G} :

$$\vec{G} = m \cdot g, \quad (3.58)$$

где $g = 9,78 \text{ м/с}^2$.

- центробежная сила инерции, \vec{I}_ω направление действия центробежной силы инерции перпендикулярно поверхности отвала питателя:

$$I_\omega = m \cdot R \cdot \omega^2, \quad (3.59)$$

где ω – угловая скорость вращения фрезы питателя ФРС.

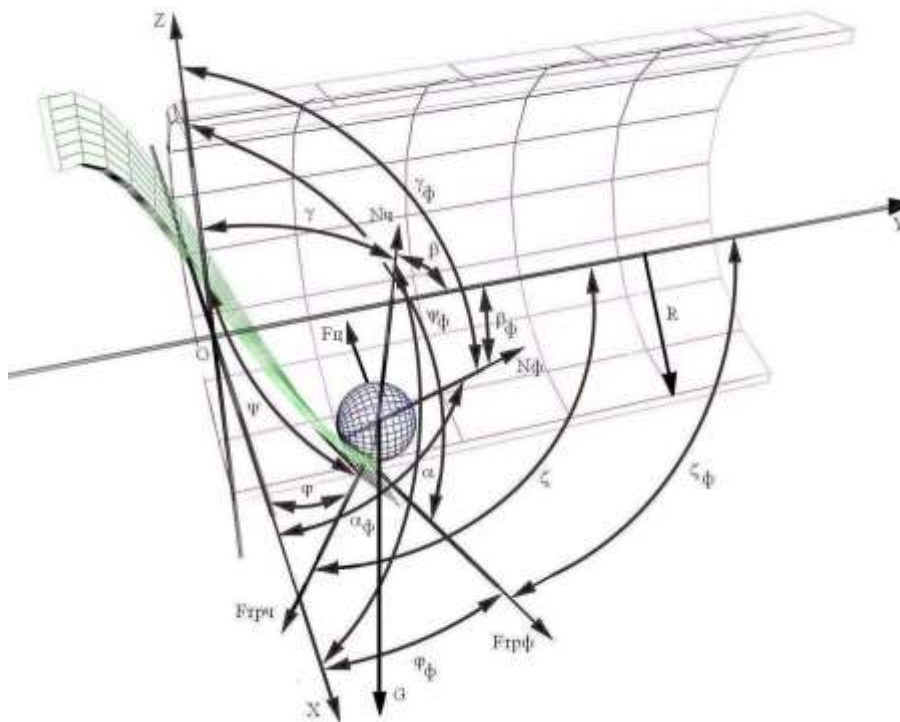


Рисунок 3.17 – Пространственная расчетная схема действующих сил на снежную частицу при ее взаимодействии с лентой фрезы

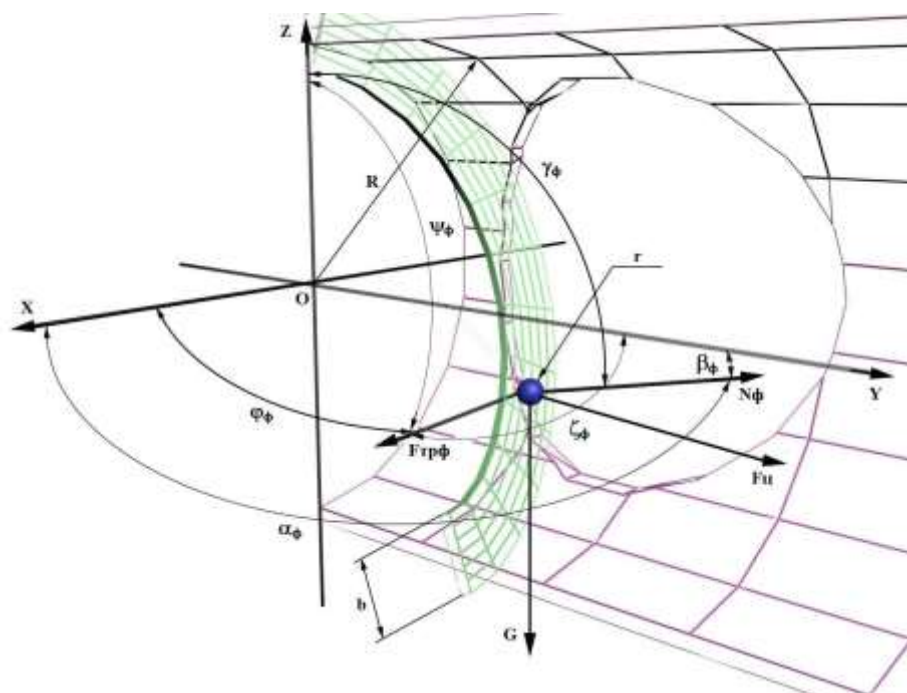


Рисунок 3.18 – Пространственная расчетная схема действующих сил на снежную частицу при ее взаимодействии с лентой фрезы в области загрузочного окна

Условие безотрывного движения определяет уравнение поверхности основания, $f_u = x^2 + z^2 - R^2 = 0$, как не голономное условие. Косинусы углов определяют направление нормальной реакции N_u , и определяются из известных соотношений, для случая цилиндрического отвала питателя, косинусы углов определяют направление нормальной реакции и определяются из известных соотношений:

$$\cos \alpha = \frac{\partial f_u / \partial x}{\sqrt{\left(\partial f_u / \partial x\right)^2 + \left(\partial f_u / \partial y\right)^2 + \left(\partial f_u / \partial z\right)^2}} = \frac{x}{R}; \quad (3.60)$$

$$\cos \beta = \frac{\partial f_u / \partial y}{\sqrt{\left(\partial f_u / \partial x\right)^2 + \left(\partial f_u / \partial y\right)^2 + \left(\partial f_u / \partial z\right)^2}} = 0; \quad (3.61)$$

$$\cos \gamma = \frac{\partial f_u / \partial z}{\sqrt{\left(\partial f_u / \partial x\right)^2 + \left(\partial f_u / \partial y\right)^2 + \left(\partial f_u / \partial z\right)^2}} = \frac{z}{R}. \quad (3.62)$$

Аналогично для определения косинусов углов, определяющих направление нормальной реакции от поверхности ленты фрезы, $N_\phi, f_\phi(x, y, z) = 0$, в случае фрезы с постоянным шагом:

$$\cos \alpha_\phi = \frac{\partial f_c / \partial x}{\sqrt{\left(\partial f_c / \partial x\right)^2 + \left(\partial f_c / \partial y\right)^2 + \left(\partial f_c / \partial z\right)^2}} = \cos \theta \cdot \cos \delta; \quad (3.63)$$

$$\cos \beta_\phi = \frac{\partial f_c / \partial y}{\sqrt{\left(\partial f_c / \partial x\right)^2 + \left(\partial f_c / \partial y\right)^2 + \left(\partial f_c / \partial z\right)^2}} = \cos \theta \cdot \cos \delta; \quad (3.64)$$

$$\cos \gamma_\phi = \frac{\partial f_c / \partial z}{\sqrt{\left(\partial f_c / \partial x\right)^2 + \left(\partial f_c / \partial y\right)^2 + \left(\partial f_c / \partial z\right)^2}} = \sin \theta. \quad (3.65)$$

Силы трения направлены в стороны противоположные абсолютным скоростям движения снежной частицы и лежат на касательных к траектории движения снежной частицы. Косинусы углов определяют направление силы трения частицы об основание, $F_{трч}$, и определяются следующими зависимостями:

$$\cos \varphi = \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}; \quad (3.66)$$

$$\cos \psi = \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}; \quad (3.67)$$

$$\cos \zeta = \frac{\dot{z}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}. \quad (3.68)$$

Для определения косинусов углов направления силы трения между лентой фрезы и снежной частицей, $F_{тр\phi}$, найдем проекции абсолютной скорости элемента фрезы на оси системы координат связанной с основанием:

$$\cos\varphi_{\phi} = \frac{\dot{x} - V + \omega \cdot R \cdot \sin \delta}{\sqrt{\left(\dot{x} - V + \omega \cdot R \cdot \sin \delta\right)^2 + \dot{y}^2 + \left(\dot{z} - \omega \cdot R \cdot \cos \delta\right)^2}}; \quad (3.69)$$

$$\cos\psi_{\phi} = \frac{\dot{y}}{\sqrt{\left(\dot{x} - V + \omega \cdot R \cdot \sin \delta\right)^2 + \dot{y}^2 + \left(\dot{z} - \omega \cdot R \cdot \cos \delta\right)^2}}; \quad (3.70)$$

$$\cos\zeta_{\phi} = \frac{\dot{z} - \omega \cdot R \cdot \cos \delta}{\sqrt{\left(\dot{x} - V + \omega \cdot R \cdot \sin \delta\right)^2 + \dot{y}^2 + \left(\dot{z} - \omega \cdot R \cdot \cos \delta\right)^2}}. \quad (3.71)$$

С учетом вышеуказанных формул, выражения проекций равнодействующей активных сил примут вид:

$$X_{\phi} = N_{\phi} \cos \theta \cdot \cos \delta + N_{\phi} \cos \alpha + F_{тр\phi} \cos \varphi_{\phi} + F_{тр\phi} \cos \varphi; \quad (3.72)$$

$$Y_{\phi} = N_{\phi} \cos \theta \cdot \sin \delta + N_{\phi} \cos \beta + F_{тр\phi} \cos \psi_{\phi} + F_{тр\phi} \cos \psi; \quad (3.73)$$

$$Z_{\phi} = N_{\phi} \sin \theta + N_{\phi} \cos \gamma + F_{тр\phi} \cos \zeta_{\phi} + F_{тр\phi} \cos \zeta + mg \quad (3.74)$$

или

$$X_{\phi} = 0; \quad (3.75)$$

$$Y_{\phi} = 0; \quad (3.76)$$

$$Z_{\phi} = mg. \quad (3.77)$$

Найдем выражения множителей Лагранжа для определения нормальных реакций:

$$\lambda_u = \frac{N_u}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z}\right)^2}}; \quad (3.78)$$

$$\lambda_\phi = \frac{N_\phi}{\sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2}}. \quad (3.79)$$

Таким образом, динамика снежного массива будет описываться системой уравнений:

$$m\ddot{z}_u - \lambda_\phi \left(\frac{\partial f_c}{\partial x} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2} \cos\varphi_\phi \right). \quad (3.80)$$

$$- \lambda_u \left(\frac{\partial f_u}{\partial x} + f_u \sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z}\right)^2} \cos\varphi \right) = 0, \quad (3.81)$$

$$m\ddot{y}_u - \lambda_\phi \left(\frac{\partial f_c}{\partial y} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2} \cos\psi_\phi \right). \quad (3.82)$$

$$- \lambda_u \left(\frac{\partial f_u}{\partial y} + f_u \sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z}\right)^2} \cos\psi \right) = 0; \quad (3.83)$$

$$m\ddot{z}_u - \lambda_\phi \left(\frac{\partial f_c}{\partial z} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2} \cos\zeta_\phi \right). \quad (3.84)$$

$$- \lambda_u \left(\frac{\partial f_u}{\partial z} + f_u \sqrt{\left(\frac{\partial f_u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_u}{\partial z}\right)^2} \cos\zeta \right) - mg = 0. \quad (3.85)$$

Найдем вторую производную по времени уравнения цилиндрической поверхности (отвала питателя) и геликоида:

Для случая цилиндрической поверхности:

$$x^2 - R^2 = z^2. \quad (3.86)$$

Находим производные по времени:

$$x \cdot \dot{x} = z \cdot \dot{z}, \quad (3.87)$$

и

$$x \cdot \dot{x} + x \cdot \ddot{x} = z \cdot \dot{z} + z \cdot \ddot{z}. \quad (3.88)$$

Откуда

$$\frac{x}{z} \dot{x} = \dot{z}, \quad (3.89)$$

$$\frac{1}{z} \dot{x}^2 + \frac{x}{z} \ddot{x} - \frac{x}{z} \cdot \frac{x}{z} \dot{x}^2 = \ddot{z}. \quad (3.90)$$

В полученные выражения необходимо подставить уравнения движения (3.81) и разрешить их относительно λ_u , λ_ϕ . Введем следующие обозначения:

$$A_x = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial x} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2} \cos \varphi_\phi}{\dot{x} + \omega \cdot R \cos \delta - V}, \quad (3.91)$$

$$A_y = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial y} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2} \cos \psi_\phi}{\dot{x} + \omega \cdot R \cos \delta - V}, \quad (3.92)$$

$$A_z = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial z} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2} \cos \zeta_\phi}{\dot{z} + \omega \cdot R \sin \delta}, \quad (3.93)$$

$$B_x = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial x} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2} \cos \varphi_\phi}{\dot{x} + \omega \cdot R \cos \delta - V_{nep}}, \quad (3.94)$$

$$B_y = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial y} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2} \cos \psi_\phi}{}, \quad (3.95)$$

$$B_z = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial z} + f_\phi \sqrt{\left(\frac{\partial f_c}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial z}\right)^2} \cos \zeta_\phi}{\dot{z} + \omega \cdot R \cdot \sin \delta}. \quad (3.96)$$

Или с учетом обозначений:

$$\ddot{x} = N_f \cdot B_x - N_{ch} \cdot A_x + \omega^2 \cdot x, \quad (3.97)$$

$$\ddot{y} = N_f \cdot B_y - N_{ch} \cdot A_y, \quad (3.98)$$

$$\ddot{z} = -N_f \cdot B_z + N_{ch} \cdot A_z - g + \omega^2 \cdot z, \quad (3.99)$$

где

$$A_x = f(x, V_x, V_y, V_z, R_l, f_u), \quad (3.100)$$

$$A_y = f(V_x, V_y, V_z, f_u), \quad (3.101)$$

$$A_z = f(z, V_x, V_y, V_z, R_l, f_u). \quad (3.102)$$

$$N_f = \frac{1}{m} \left(\frac{((V_z^2 + V_x^2) \cdot S_1) + g \cdot \left(\frac{S_1}{M_1} - \frac{x}{R_l}\right)}{\left(\frac{F_1 \cdot S_1}{M_1} - S_2\right) - \omega^2 \cdot \left(\frac{x^2}{z} + z\right) \cdot \frac{S_1}{M_1}} \right), \quad (3.103)$$

$$N_{ch} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\frac{-(g \cdot x)}{R_l} + N_f \cdot S_2}{S_1}, \quad (3.104)$$

где

$$M_1 = f(x, z, A_x, A_z), \quad (3.105)$$

$$F_1 = f(x, z, B_x, B_z), \quad (3.106)$$

$$S_1 = f(x, z, A_x, A_y, A_z, R_1^2), \quad (3.107)$$

$$S_2 = f(x, z, B_x, B_y, B_z, R_1^2). \quad (3.108)$$

Эти уравнения (3.103 и 3.104) позволяют определить нормальные реакции, наложенных связей. По результатам, которых разрешается система (3.97, 3.98 и 3.99) и находятся ускорения, скорости и перемещения снежной частицы в питателе ротора.

Аналогично получим уравнения движения снежной частицы по ленте фрезы в области загрузочного окна. Здесь необходимо учесть то, что действует одна удерживающая связь – поверхность ленты фрезы, по которой она скользит. Нормальная реакция не действует. С учетом этого получаем следующую группу уравнений:

$$\ddot{x} = N_f \cdot B_x + \omega^2 \cdot x, \quad (3.109)$$

$$\ddot{y} = -N_f \cdot B_y, \quad (3.110)$$

$$\ddot{z} = -N_f \cdot B_z + \omega^2 \cdot z - g, \quad (3.111)$$

где

$$B_x = \frac{z}{\sqrt{(z^2 + x^2)}} \cdot \sin \theta - f_\phi \cdot \frac{V_x}{\sqrt{(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)}}, \quad (3.112)$$

$$B_z = \frac{-x}{\sqrt{(z^2 + x^2)}} \cdot \sin \theta - f_\phi \cdot \frac{V_y}{\sqrt{(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)}}, \quad (3.113)$$

$$B_y = \cos \theta + f_\phi \cdot \frac{V_z}{\sqrt{(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)}}, \quad (3.114)$$

$$N_f = \frac{I}{m} \left(\frac{-g \cdot x}{(B_x \cdot z - B_z \cdot x) \cdot \frac{B_y \sqrt{(z^2 + x^2)}}{\theta}} \right). \quad (3.115)$$

Таким образом, уравнения (3.109, 3.110, 3.111 и 3.115) представляют собой замкнутую систему уравнений, посредством которой описывается динамика снежной частицы в области загрузочного окна питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Кроме этого необходимо определить мощность, сообщаемую питателю для транспортирования снежной частицы. С учетом [68], после ряда преобразований мощность, затрачиваемая питателем ФРС, для транспортирования снежной массы составит:

$$N = (R - r) \left\{ \left[N_{\phi} \cos \alpha_{\phi} + N_{\psi} \cos \alpha \right] \frac{Z}{R} + \left[N_{\phi} \cos \psi + N_{\psi} \cos \gamma \right] \frac{X}{R} \right\} \omega. \quad (3.116)$$

Для решения полученных систем уравнений необходимо задать исходные условия:

R – радиус фрезы, м;

ω – угловая скорость вращения фрезы питателя ФРС, с^{-1} ;

V – поступательная скорость ФРС, м/с;

f_c – коэффициент трения снежной частицы о поверхность отвала питателя ФРС;

f_{ψ} – коэффициент трения снежной частицы о ленту фрезы питателя ФРС;

θ – угол захода ленты фрезы питателя ФРС, град;

r – радиус частицы, м;

ρ – плотность снежной частицы, кг/м^3 ;

V_x – скорость частицы по оси ОХ, м/с;

V_y – скорость частицы по оси ОУ, м/с;

V_z – скорость частицы по оси ОZ, м/с;

X – координата ц.м. частицы по оси ОХ, м;

Y – координата ц.м. частицы по оси ОУ, м.

Решение осуществлялось численно на ЭВМ, при этом использовался метод Ньютона [89, 121], в среде Microsoft Visual Studio (рисунок 3.19). В качестве примера на рисунке представлены внешний вид и результаты работы программы

при соответствующих начальных условиях, которые также представлены на этом же рисунке.

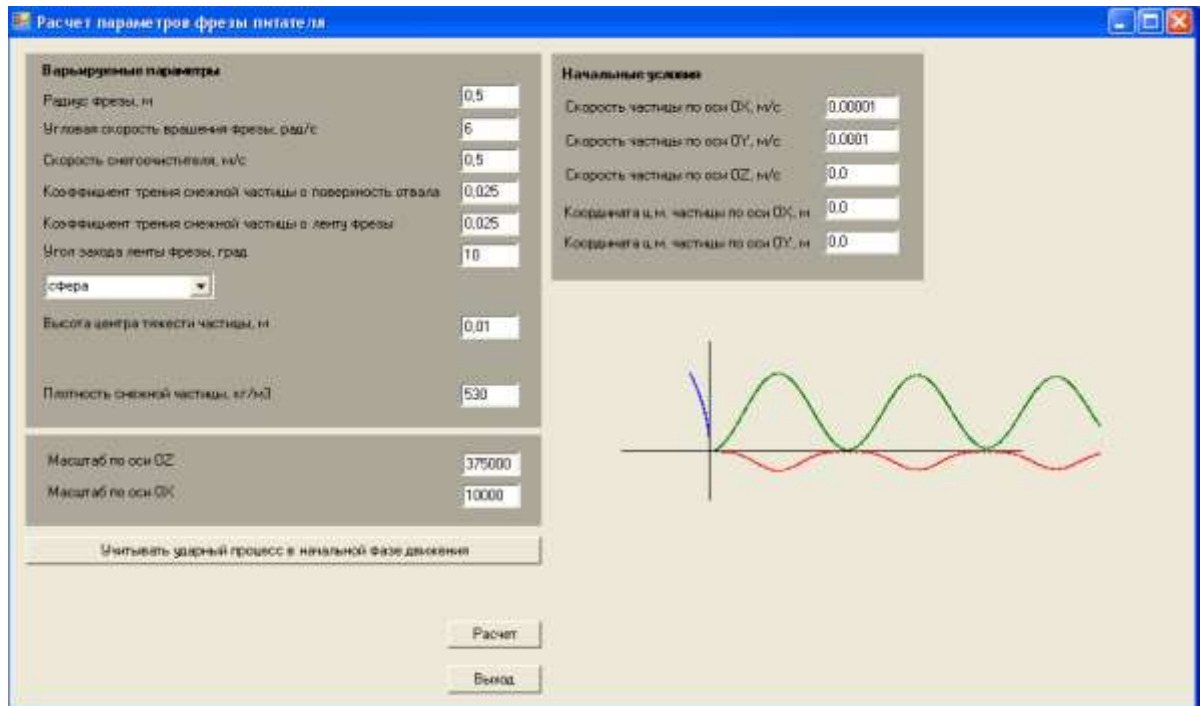


Рисунок 3.19 – Пример работы программы вычисления параметров снежной частицы по уравнениям (3.22 – 3.26)

В результате вычислений для следующих исходных данных были получены кинематические и силовые параметры снежной частицы и фрезы питателя (таблица 3.3, рисунок 3.20, 3.21).

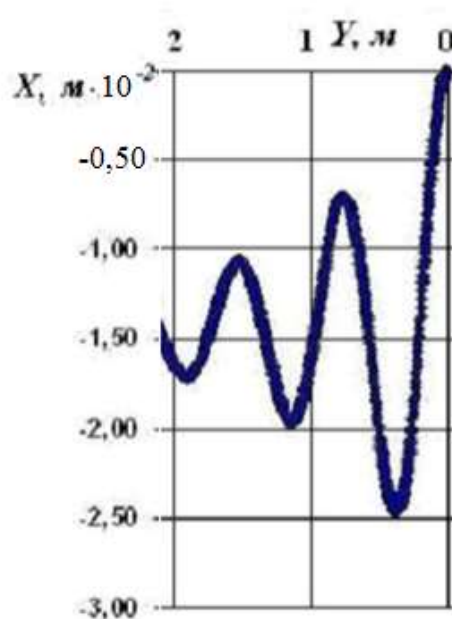


Рисунок 3.20 –Траектория движения снежной частицы в плоскости OXY

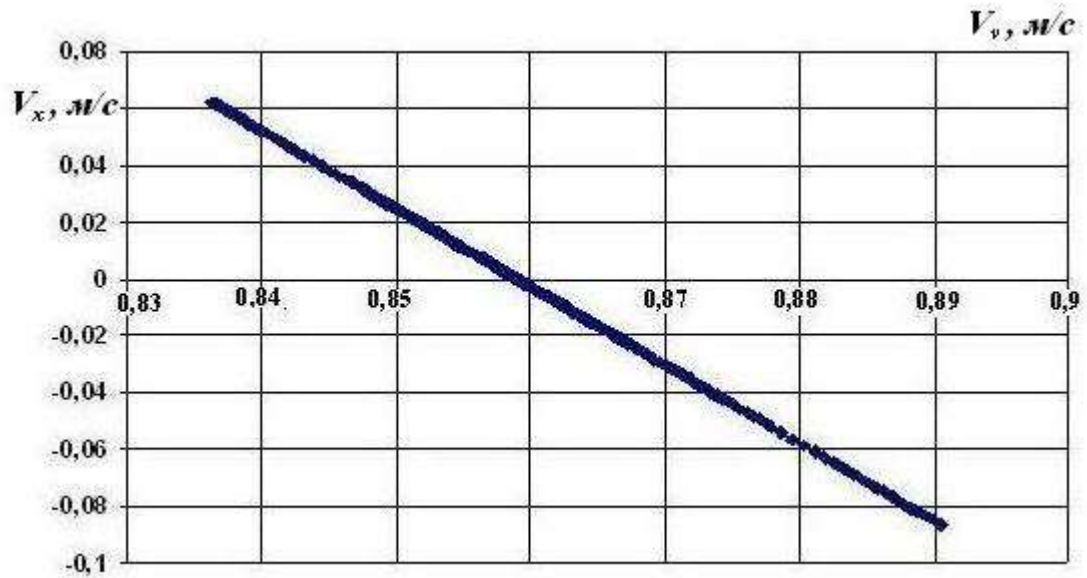


Рисунок 3.21 –Изменение проекций вектора скорости снежной частицы на оси OX иOY

Для оценки точности решения был проведен машинный эксперимент, в котором варьировался шаг времени численного решения системы уравнений, при одних и тех же начальных условиях. При этом принимался снег свежесвыпавший плотностью 160 кг/м^3 , при температуре окружающего воздуха до -10C° [150].

Таблица 3.3 – Результаты оценки устойчивости работы программы

Начальные условия	Шаг по времени, с	Абсолютная погрешность вычислений
$R = 0,5 \text{ м}$ $\omega = 6 \text{ с}^{-1}$ $f_q = 0,025$ $f_r = 0,025$ $\theta = 10 \text{ град}$ $r = 0,01 \text{ м}$ $\rho_q = 530 \text{ кг/м}^3$ $V_x = 0,0 \text{ м/с}$ $V_y = 0,0 \text{ м/с}$ $V_z = 0,0 \text{ м/с}$ $X = 0,0 \text{ м}$ $Y = 0,0 \text{ м}$	0,05	0,084770159
	0,005	0,003433511
	0,0005	0,000131372
	0,00005	$4,48878 \cdot 10^{-7}$
	0,000005	$-7,26842 \cdot 10^{-7}$

Где абсолютная погрешность определялась по формуле [17]: $x_t^1 - x_t^2 = \delta_{abc}$

Шаг по времени для численного решения системы уравнений движения снежной частицы принят равным: 0,00005 с.

Дальнейшее уменьшение шага интегрирования нецелесообразно, так как скорость вычислений существенно уменьшается, а на точности вычислений не сказывается существенно (рисунок 3.22).

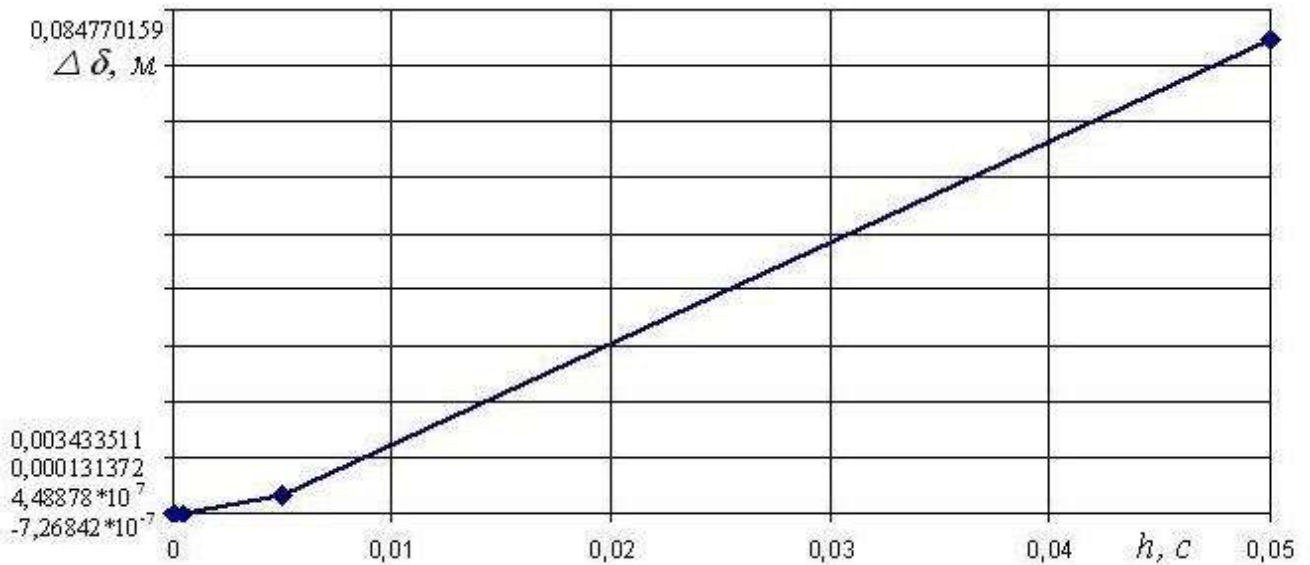


Рисунок 3.22 – Зависимость абсолютной погрешности вычислений от шага вычислений

С помощью составленной математической модели работы питателя ФРС можно определять положение и текущую скорость снежной частицы, силы нормальных реакций, действующие на снежную частицу со стороны отвала питателя и ленты фрезы и их изменения во времени. В результате моделирования получены энергетические характеристики процесса транспортирования фрезой снежной массы в питателе ФРС, а так же кинематические параметры снежного потока в области загрузочного окна метательного аппарата. При этом программная реализация на ЭВМ позволяет выполнять оптимизацию не только конструкции фрезы, отвала питателя ФРС в процессе варьирования различных технологических параметров питателя, но и определяет исходные данные для дальнейшей модификации конструкции метательного аппарата ФРС.

Для использования полученной математической модели в дальнейших исследованиях работы питателя ФРС была проведена проверка ее адекватности на основании реального эксперимента. Это было сделано в подразделе 5.3.

Основные выводы по главе

1. Обоснована обобщенная пространственная расчетная схема питателя ФРС, представляющая собой одномассовую систему, элементами которой являются: фреза питателя, отвал питателя, снежная частица. Фреза питателя и отвал питателя в математической модели выступают в качестве ограничений. Для математического описания работы питателя ФРС используется правая ортогональная система координат, связанная с фрезой питателя. Для описания положения снежной частицы на ленте фрезы в питателе ФРС приняты три обобщенные координаты.

2. Представленная математическая модель работы питателя ФРС реализована в среде Microsoft Visual Studio на языке программирования C#. Разработанная имитационная модель позволяет исследовать перемещения снежной частицы в питателе ФРС и действующие силы со стороны фрезы и отвала питателя, что позволяет оценить энергоемкость процесса транспортирования снежной массы.

3. Разработанная математическая модель сложной динамической системы «питатель ФРС – снежная частица», включает в себя конструктивные и технологические параметры питателя ФРС (R , ω , θ , b и др.), параметры снежного массива (ρ_s , r_s , f_s , f_s) и позволяет проводить теоретические исследования на ЭВМ. Для расчетов в математическую модель закладывались численные значения параметров питателя ФРС мощностью двигателя 5 кВт шириной захвата 0,8 м, (при этом принимался свежесвыпавший снег плотностью 160 кг/м³) но разработанная модель может использоваться для исследования работы питателя различных типов ФРС и для других видов снега путем подстановки различных численных значений геометрических размеров фрезы и отвала питателя, угловой

скорости вращения фрезы, коэффициентов внешнего трения снежной массы по материалам различной природы и геометрических размеров самой снежной массы в соответствующие поля программного продукта.

4. Анализ кинематики питателя ФРС позволил синтезировать профиль фрезы питателя обеспечивающего максимальную загрузку снежной массы в межлопастное пространство питателя ФРС.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью теоретических исследований математической модели работы питателя ФРС является выявление новых закономерностей, получение зависимостей между геометрическими и кинематическими параметрами процесса транспортирования снежной массы. Данные зависимости необходимы для синтеза оптимальных параметров фрезы питателя с целью уменьшения энергоемкости работы питателя ФРС.

4.1 Критерии эффективности

Для обоснования выбора технологических параметров питателя ФРС, необходимы критерии сравнения различных значений технологических параметров питателя ФРС. Использование критериев оценки эффективности рабочего процесса питателя ФРС позволяет снизить величину эксплуатационных расходов при уборке снежного массива в трехмерном пространстве. Это обуславливает необходимость планирования траектории выбора геометрических и кинематических параметров с использованием пространства управляемых обобщенных координат питателя фрезерно-роторного снегоочистителя.

При математическом описании механической подсистемы питатель ФРС были приняты 3 обобщенные координаты. Положение и ориентация питателя ФРС задается одной условно постоянной обобщенной координатой угла поворота ленты фрезы (см. п. 3.1), обозначенной, δ [68, 150].

Положение и ориентация снежной частицы в питателе ФРС задается тремя условно постоянными обобщенными координатами, определяющими положение снежной частицы в трехмерном пространстве $OXYZ$, обозначенными X, Y, Z .

Для оценки эффективности транспортировки снежной массы питателем фрезерно-роторного снегоочистителя, возможно, использовать комплексный

относительный критерий, состоящий из мощности N и количества снежной массы, транспортируемой питателем за один оборот фрезы, Π [7]:

$$N_{y\partial} = \frac{N}{\Pi}. \quad (4.1)$$

Чем меньше затраты энергии и больше транспортируемый объем, тем эффективнее работает питатель, т.е.: $\frac{N}{\Pi} \rightarrow 0$. Энергоемкость находится в результате решения уравнения движения снежной частицы как величина крутящего момента, что кроме оценки эффективности, позволяет решить конструкторскую задачу, выбор материала и геометрических размеров при проектировании фрезы питателя [23].

Объем вырезаемой призмы за один оборот равен (3.34).

Этот объем перемещается на расстояние равное шагу ленты фрезы T , который равен [23, 146]:

$$T = 2\pi \frac{R \cdot \operatorname{tg} \theta}{n}, \quad (4.2)$$

Скорость, с которой витки фрезы пройдут этот путь составит:

$$\dot{y} = R \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \omega. \quad (4.3)$$

Соответственно производительность, Π , кг/сек участка фрезы может быть представлена как:

$$\Pi = \rho \cdot W \frac{\dot{y}}{T}. \quad (4.4)$$

С учетом (4.2), (4.3) и (3.34) имеем:

$$\Pi = 2\rho \cdot h \cdot R \cdot \frac{V}{n^3} \cdot \operatorname{tg} \theta. \quad (4.5)$$

Тогда удельная мощность участка фрезы с учетом формулы (3.31), как критерий эффективности примет вид:

$$N_{y\partial} = \frac{N}{\Pi_{y\partial}} = \frac{N}{\rho \cdot W \frac{\dot{y}}{T}}. \quad (4.6)$$

Или с учетом формул (4.2), (4.3), (4.5):

$$N_{y\partial} = \frac{N}{\rho \cdot 2 \cdot h \cdot R \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \frac{V}{n^3}}. \quad (4.7)$$

Определение энергоемкости в конкретных случаях – достаточно трудоемкая задача. Она состоит в определении объема вырезаемой призмы снежной массы, определения расстояния, на которое перемещается данный объем, нахождения скорости, с которой фреза пройдет данный путь.

Методика определения критерия эффективности заключается в следующей последовательности шагов:

1. Задание значений исходных данных: конструктивные параметры фрезерно-роторного снегоочистителя с учетом формулы (3.23), физико-механические свойства снега, начальные координаты положения снежной частицы в питателе снежной частицы.
2. Определения объема вырезаемой призмы снежной массы.
3. Нахождение расстояния, на которое перемещается объем снежной массы.
4. Вычисление времени, за которое фреза повернется, при перемещении объема на данное расстояние.
5. Определение затрачиваемой мощности по формуле (3.116).
6. Определение удельной мощности по формуле (4.7).

Вышеописанный алгоритм программы для расчета удельной мощности в произвольной точке с координатами X , Y , Z для ленты фрезы наглядно представлен на рисунке 4.1.

Согласно рассмотренному алгоритму, в программном продукте $C\#$ была создана программа для расчета удельной мощности в любой момент времени работы фрезы.

Удельная мощность позволяет осуществлять выбор наиболее рациональных параметров ленты фрезы питателя ФРС.

Проведем сравнительный анализ полученных уравнений производительности питателя ФРС с фрезой постоянной ширины и потребляемой им мощности с ранее предложенной методикой. В качестве исходных данных были приняты технологические параметры ФРС, значения которых представлены в таблице 3.1.

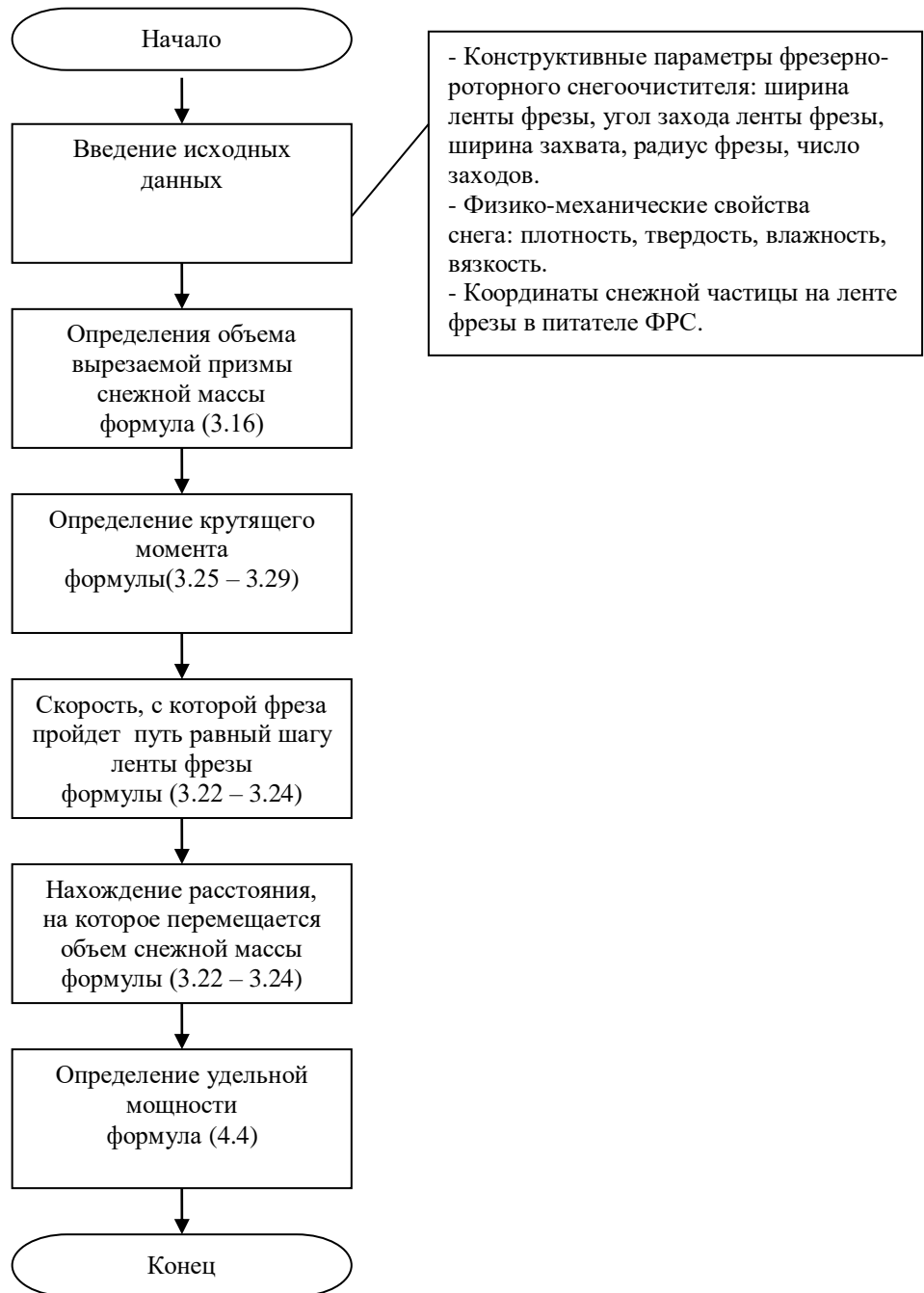


Рисунок 4.1 – Алгоритм определения удельной мощности

- расчет мощности по ранее предложенной формуле Баловнева В.И. [104]:

$$\begin{aligned}
 N &= 1,39 \cdot 10^{-3} \frac{B \cdot \omega_n^2 \cdot R_n \cdot \Pi_{mex} \left(f_{сн} + f_{сн\phi} \right) \operatorname{tg} \left(\theta + \operatorname{arctg} f_{сн} \right)}{\operatorname{tg} \theta} = \\
 &= 1,39 \cdot 10^{-3} \frac{0,5 \cdot 6^2 \cdot 0,5 \cdot 47,7 (0,025 + 0,025) \operatorname{tg} (10 + \operatorname{arctg} 0,025)}{\operatorname{tg} 10} =
 \end{aligned}$$

$$= 0,011 \text{ кВт} = 11 \text{ Вт}. \quad (4.8)$$

- расчет мощности питателя при транспортировании снежной массы при тех же исходных данных:

$$N = (R - r) \left\{ \left[N_{\phi} \cos \alpha_{\phi} + N_{\psi} \cos \alpha \right] \frac{Z}{R} + \left[N_{\phi} \cos \psi + N_{\psi} \cos \gamma \right] \frac{X}{R} \right\} \omega = 8,93 \text{ Вт}. \quad (4.9)$$

- расчет технической производительности по ранее предложенной формуле Баловнева В.И. [102]:

$$\Pi_{\text{тех}} = 3,6B, \quad c_{\nu} \nu_{\text{м}} \rho_{\text{сн}} = 3,6 \cdot 0,5 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 530 = 47,7, (m/ч) = 0,025 \text{ кг/с}, \quad (4.10)$$

- расчет технической производительности питателя ФРС велся по формуле вырезаемого снежного объема (см. (3.34)):

$$\Pi = 4 \pi \cdot \rho \cdot h \cdot R \cdot \frac{V}{n \cdot \omega} \cdot \text{tg } \theta = 4 \cdot 3,14 \cdot 530 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,5}{2 \cdot 6} \cdot \text{tg } 17 = 0,021 \text{ кг/с}, \quad (4.11)$$

Значения предлагаемого критерия для фрезы с постоянной шириной ленты составили:

- по ранее предложенной методике:

$$N_{\text{уд}} = \frac{N}{\Pi} = \frac{11}{0,025} = 440 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{м}^3}. \quad (4.12)$$

- по формулам полученным в работе:

$$N_{\text{уд}} = \frac{N}{\Pi} = \frac{8,93}{0,021} = 425,22 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{м}^3}. \quad (4.13)$$

Техническая производительность по полученным формулам дает значение на 16% меньшее, по сравнению с ранее предложенной методикой. Потребляемая мощность уменьшилась и составила 96% от потребляемой мощности по ранее предложенной методике.

Таким образом, значение удельной мощности, вычисленное по ранее предлагаемыми зависимостям дает завышенное значение, не более чем на 3 %.

Проведем сравнительный анализ значений принятого критерия эффективности для фрезы с постоянной шириной ленты фрезы и фрезы с переменной шириной. Для этого произведем вычисления технической производительности, которая определялась полностью как объем пространства между двумя соседними

витками (3.43) и потребляемой мощности, при тех же значениях технологических параметров питателя ФРС с переменной шириной ленты фрезы (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Значения технической производительности, потребляемой мощности и удельной мощности

	Производительность, кг/с	Потребляемая мощность	Удельная мощность
Фреза с постоянной шириной ленты	0,141	630	4471,633834
Фреза с переменной шириной ленты	0,237	812	3436,42599

Следовательно, для питателя с переменной шириной ленты фрезы теоретически определенные значения удельных мощностей уменьшились на 23%, по сравнению с использованием фрезы с постоянной шириной ленты. Удельные мощности, связанные с перемещением ФРС, при использовании фрезы с переменной шириной ленты увеличатся на 5% на основании формул, приведенных в работе [152]. Мощность, затрачиваемая на отделение снежной стружки останется неизменной, согласно выражениям [152], а мощность на привод ротора метательного аппарата для ФРС с фрезой питателя переменной ширины на 6% (см. глава 5). Таким образом, теоретически ожидаемое уменьшение значения величины удельной мощности для ФРС с питателем с переменной шириной ленты фрезы по сравнению с ФРС с питателем с постоянной шириной ленты фрезы составит 12%.

Установлены кинематические границы, исключаящие переброс снежной массы, также установлен вектор скорости схода снежной частицы с ленты фрезы в области загрузочного окна.

4.2 Методика оптимизации основных конструктивных и технологических параметров фрезерно-роторного снегоочистителя

Методика оптимизации основных конструктивных и технологических параметров питателя ФРС позволяет найти оптимальное значение удельной мощности работы питателя ФРС при заданных его геометрических и кинематических значениях.

Методика включает в себя обобщенную расчетную схему и математическую модель процесса транспортирования снежной массы фрезой питателя ФРС, алгоритм оптимизации основных конструктивных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, электронный ресурс для расчета геометрических, кинематических и силовых параметров работы фрезы при ее взаимодействии со снежной массой, а так же определения энергоемкости рассматриваемого процесса.

Алгоритм оптимизационного синтеза конструкции питателя ФРС включает в себя:

1. Постановка задачи оптимизации:
 - 1.1 обоснование критерия эффективности работы питателя ФРС;
 - 1.2 выбор целевых функций;
 - 1.3 задание ограничений;
2. Аппроксимация зависимостей выходных параметров питателя от анализируемых параметров для выявления целевых функций:
 - 2.1 обоснование метода аппроксимации;
 - 2.2 определение уравнений регрессии;
3. Решение задачи оптимизации:
 - 3.1 обзор методов поиска решения задач оптимизации;
 - 3.2 описание выбранного метода поиска решения;
 - 3.3 получение оптимальных значений анализируемых параметров;
4. Нахождение оптимального скорректированного решения по величине удельной мощности работы питателя ФРС.

Обоснование критерия эффективности представлено в разделе 4.1.

1. Выбор основных технологических параметров питателя ФРС осуществляется на основе выражения (3.23). Для его использования необходимо задаться значениями двух параметров из трех:

- радиус фрезы питателя ФРС, R , м;
- угловая скорость вращения фрезы питателя ФРС, ω , рад/с;
- поступательная скорость ФРС, V , м/с.

2. Далее, задаемся:

- количеством заходов ленты фрезы питателя ФРС,
- шириной захвата фрезы питателя ФРС,
- углом захода ленты фрезы питателя ФРС.

3. Находим, используя блок-схему алгоритма определения переменной ширины ленты фрезы питателя ФРС (рисунок 3.14), ширину ленты фрезы на каждом участке ее работы и объем снежной массы, который транспортирует питатель ФРС.

4. Подбираем эквивалентный объем снежной частицы, используя например формулу:

$$W_i = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3, \quad (4.14)$$

где i – номер шага ленты фрезы.

5. Задаем начальные параметры, представленные в разделе 3.3, для проведения имитационного моделирования работы питателя ФРС. Результатом, которого является положение снежной массы в области загрузочного окна и ее скорость, а также значения затрачиваемой мощности на перемещение снежной массы и время перемещения. Что позволяет, используя формулу (4.7), определить величину критерия эффективности – удельную мощность. Основным методом поиска решения задачи оптимизации в данной работе является метод перебора. Поэтому возвращаемся к пункту 1 и производим корректировку начальных параметров.

Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено требуемое (минимальное) значение удельной мощности.

Аппроксимация получаемых значений при проведении оптимизационного синтеза параметров питателя ФРС осуществляется методом полиномиальной аппроксимации.

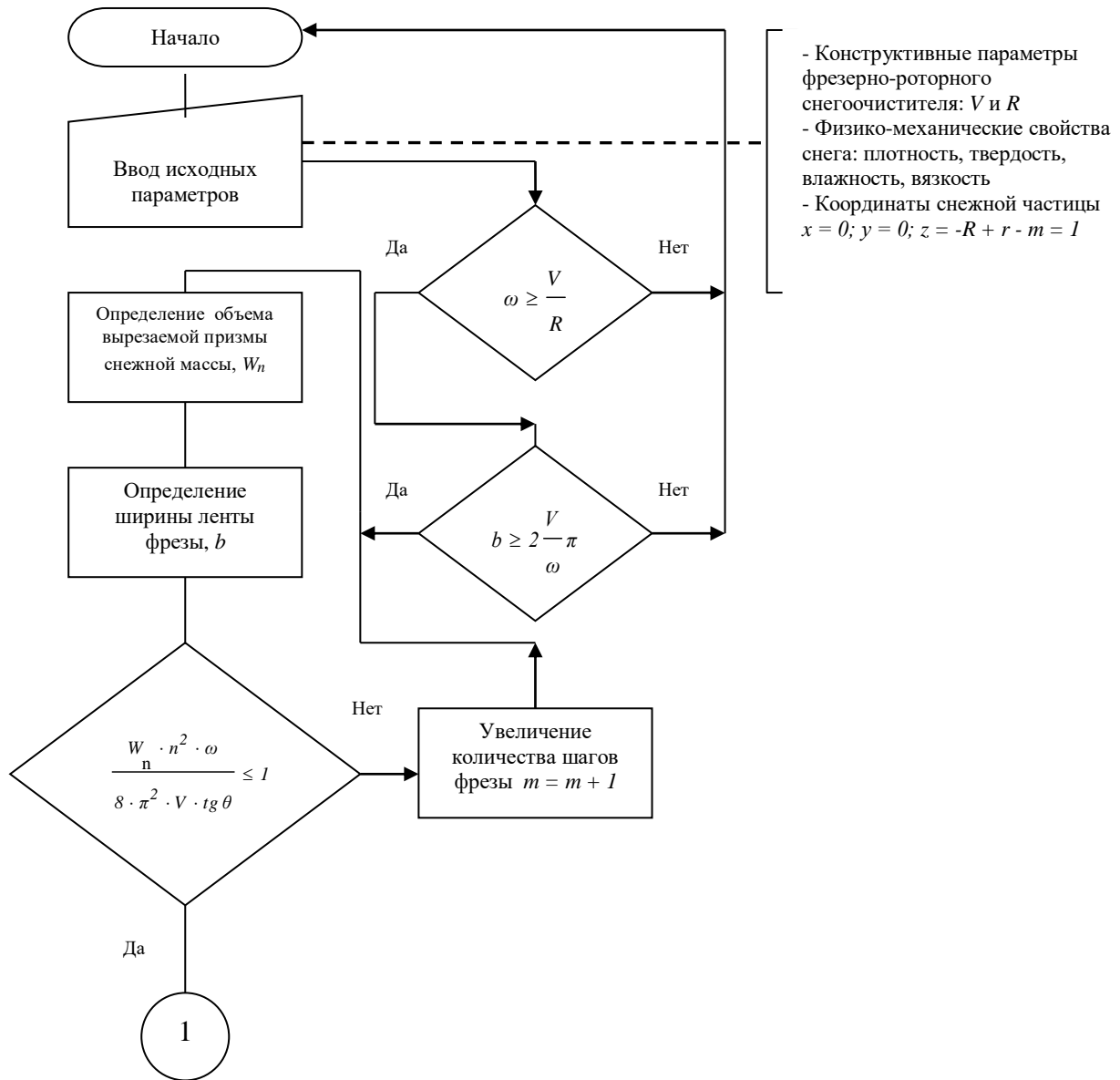


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма определения мощности фрезы питателя ФРС при его различных конструктивных параметрах

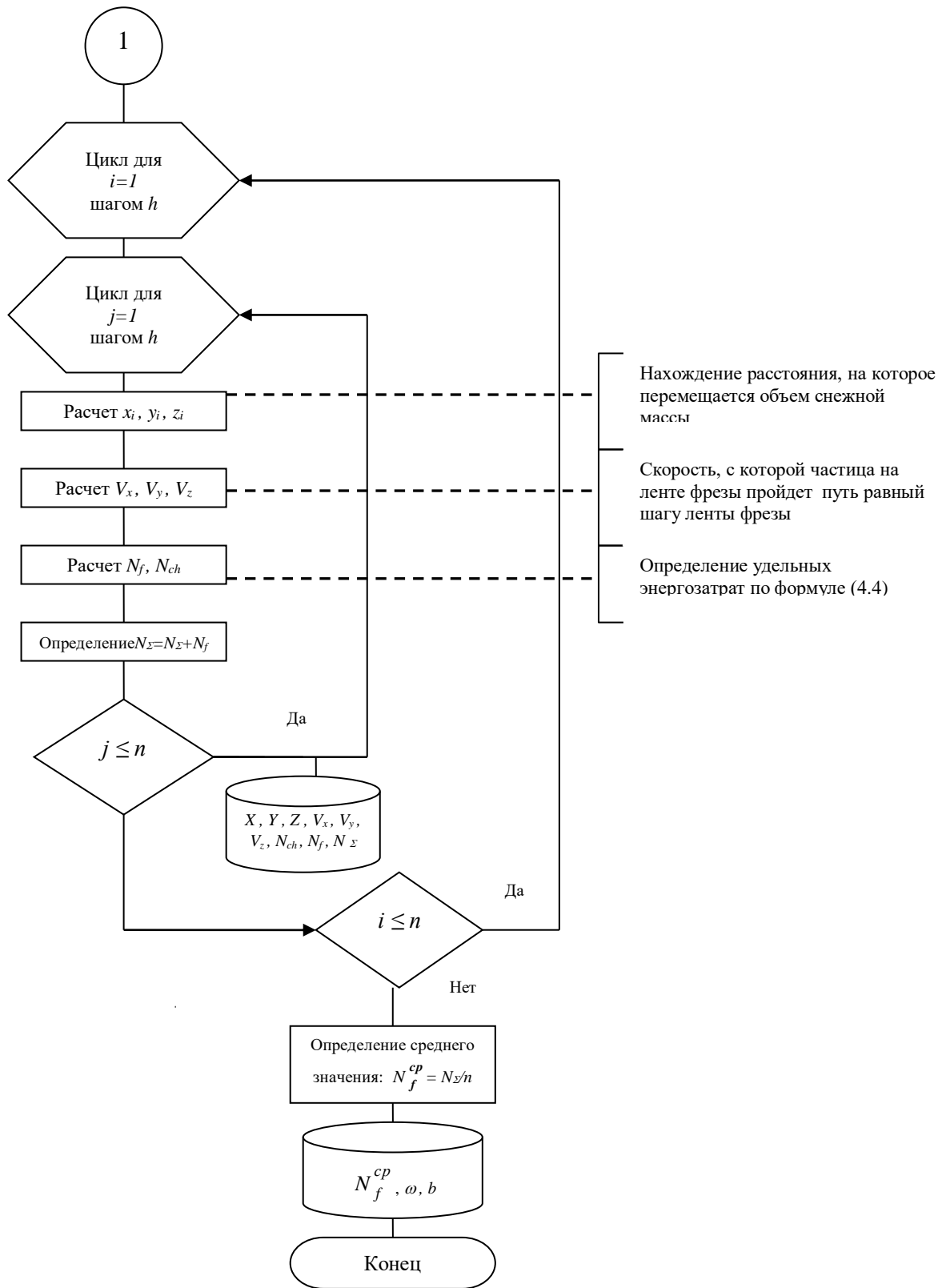


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма определения мощности фрезы питателя ФРС при его различных конструктивных параметрах

4.3 Определение влияния числа заходов ленты фрезы на удельную мощность рабочего процесса питателя ФРС

Используя данные коммунального самоходного ФРС (таблица 3.1) были установлены теоретические объемы снежной массы, транспортируемые соседними участками ленты фрезы для одно, двух, трехзаходных фрез при повороте фрезы на 360° . Эти объемы составили: для однозаходной фрезы с постоянной шириной ленты фрезы $0,016 \text{ м}^3$, для двухзаходной фрезы $0,008 \text{ м}^3$, для трехзаходной фрезы $0,006 \text{ м}^3$. Для определения удельной мощности представим данные объемы в виде эквивалентных сфер соответствующего радиуса. Для этого воспользуемся соотношением (4.14).

В результате этого радиусы эквивалентных по объему частиц составили: для однозаходной фрезы $0,156 \text{ м}$, для двухзаходной фрезы $0,124 \text{ м}$, для трехзаходной фрезы $0,112 \text{ м}$.

Время поступления частиц в загрузочное окно метательного аппарата определяется исходя из расстояния между соседними участками ленты фрезы, которое должна пройти частица на ленте фрезы. Для однозаходной фрезы, сформированная снежная призма достигнет загрузочного окна при повороте фрезы на 360 град. Соответственно, для двухзаходной на угол 180 град, а для трехзаходной на угол 120 град. Тогда время между двумя соседними разгрузками составит: $t_1 = 0,838 \text{ с}$; $t_2 = 0,419 \text{ с}$; $t_3 = 0,279 \text{ с}$.

На рисунке 4.3 представлена диаграмма загрузки метательного аппарата при представлении снежной призмы одиночной снежной частицей. С учетом вышесказанного, техническая производительность работы питателя ФРС составит:

$$P_{1x} = 0,019 \text{ м}^3/\text{с}; P_{2x} = 0,019 \text{ м}^3/\text{с}; P_{3x} = 0,022 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.15)$$

В результате расчетов на ЭВМ были определены суммарные мощности, затраченные на перемещение соответствующих масс к загрузочному окну и величины удельных мощностей для однозаходной, двухзаходной и трехзаходной фрез питателя ФРС. Полученные результаты представлены в таблице 4.2.

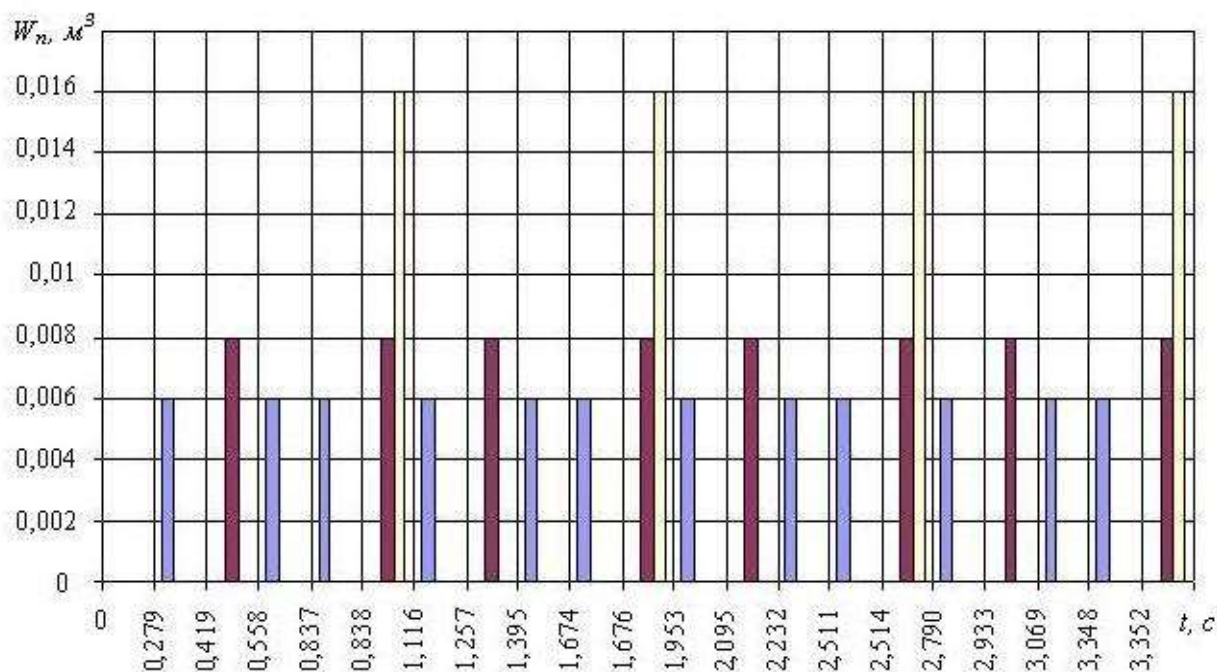


Рисунок 4.3 – Диаграмма загрузки метательного аппарата:

W_n – объем снежной призмы, t – время загрузки.

Таблица 4.2 – Суммарные мощности, затраченные на перемещение снежных масс к загрузочному окну

Количество заходов фрезы, n	Мощность N , Вт	Удельная мощность, $N_{уд}$, кВт·с/м ³
1	150,357	3,972
2	107,164	2,839
3	92,225	3,43

Таким образом, увеличение числа заходов фрезы обеспечивает более равномерное поступление снежной массы в ротор метательного аппарата, однако из анализа полученных значений величины удельной мощности, следует, что влияние числа заходов фрезы носит нелинейный характер и имеет свой минимум, который для питателей ФРС с технологическими характеристиками (таблица 3.1) приходится на двухзаходные фрезы.

4.4 Определение положения снежной частицы в области загрузочного окна питателя

Был проведен анализ влияния фактического размера частицы на траекторию ее движения и необходимую мощность на ее транспортирование. Для этого осуществлялось решение системы уравнений (3.98 – 3.103), при решении которых варьируемым параметром был радиус частицы. Результаты представлены на рисунке 4.4 и 4.5.

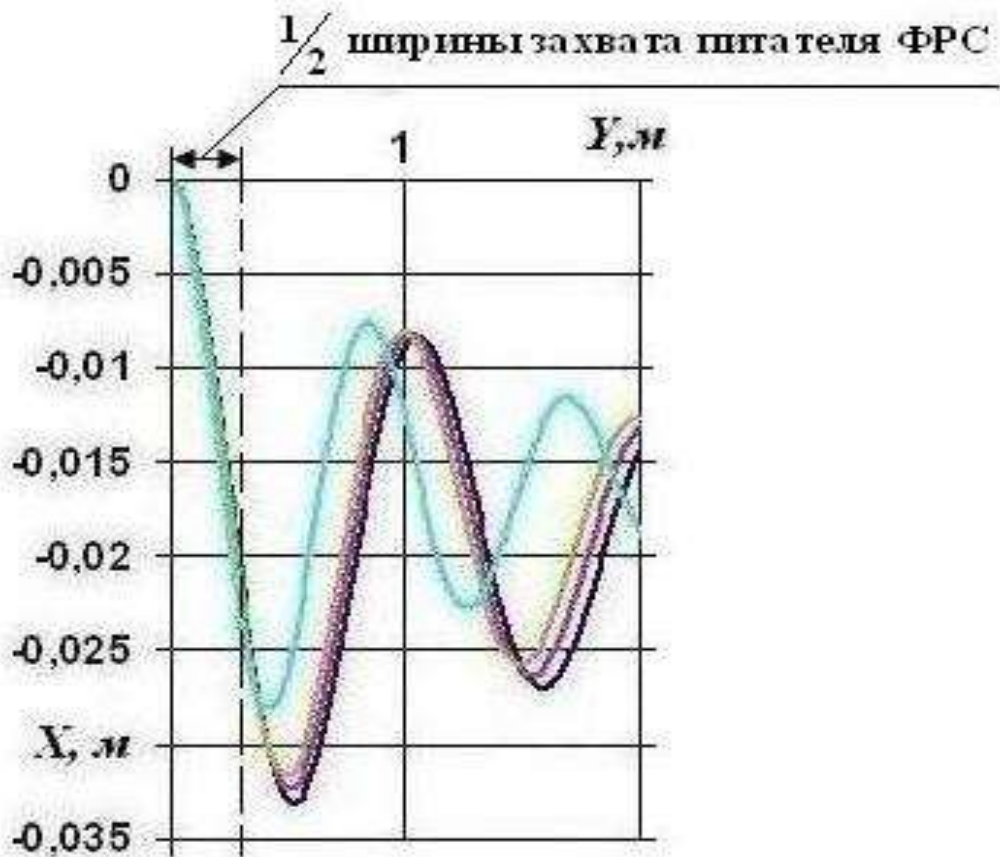


Рисунок 4.4 – Траектории движения снежной частицы, различных радиусов:

1) материальная частица; 2) $r = 0,005$ м; 3) $r = 0,01$ м; 4) $r = 0,015$ м

Из графиков следует, что увеличение размера частицы приводит к увеличению амплитуды колебаний траектории движения частицы и росту мощности которое необходимо сообщать фрезе, чтобы она могла осуществлять транспортирование снежной частицы.

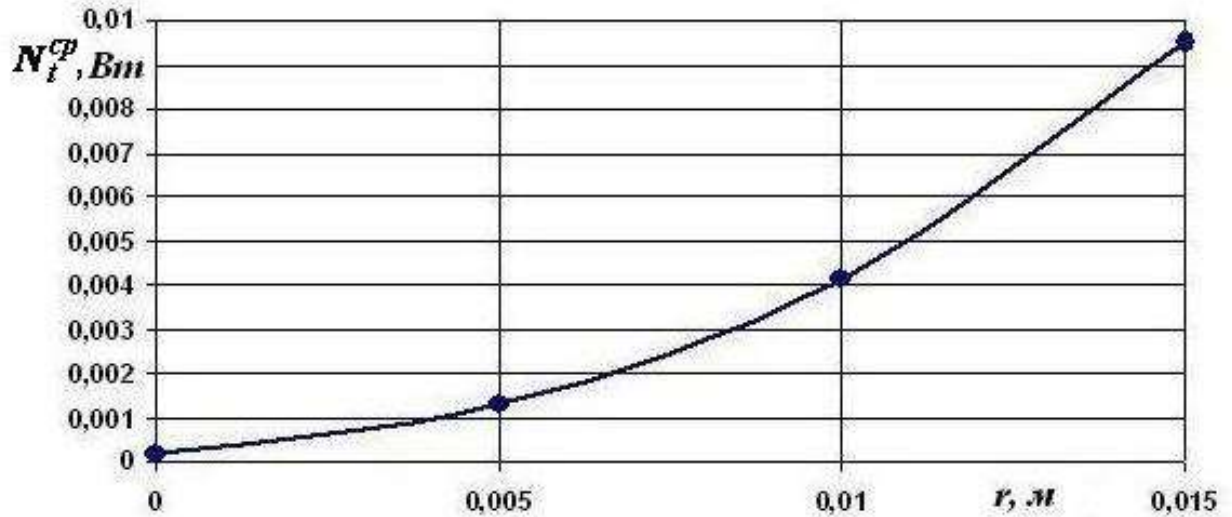


Рисунок 4.5 – Зависимость средней мощности для перемещения частицы фрезой питателя от размера снежной частицы при ее транспортировании в питателе

На рисунке 4.6 представлен график относительного расстояние между частицами в области загрузочного окна при различных координатах их захвата фрезой питателя при угловой скорости 8 с^{-1} (1) и 18 с^{-1} (2).

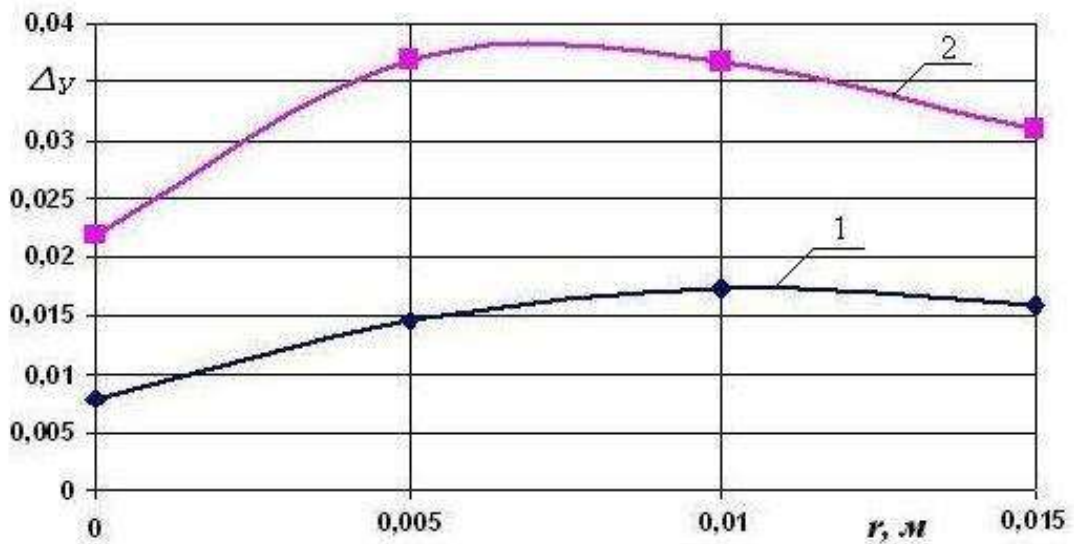


Рисунок 4.6 – Зависимость расстояния между частицами от радиуса частицы в области загрузочного окна:

1) при $\omega = 18 \text{ с}^{-1}$; 2) при $\omega = 8 \text{ с}^{-1}$.

На рисунке 4.7 представлено положение материальной частицы радиусом $r = 0,015 \text{ м}$ в области загрузочного окна в зависимости от положения при захвате

лентой фрезы: 1) $y = 0,07$ м; 2) $y = 0,14$ м; 3) $y = 0,21$ м; 4) $y = 0,28$ м; 5) $y = 0,35$ м

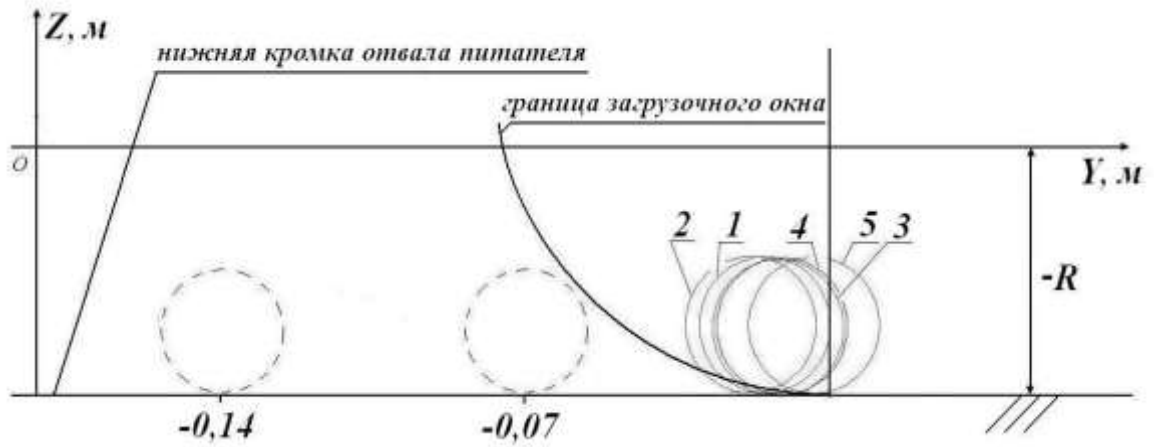


Рисунок 4.7 – Положение материальной частицы в области загрузочного окна в зависимости от положения при захвате лентой фрезы: пунктиром обозначено начальное положение частицы, сплошной линией – конечное положение частицы.

Направления и значения векторов скоростей для рассматриваемой частицы на входе в загрузочное окно, в плоскости XOY , представлены на рисунке 4.8.

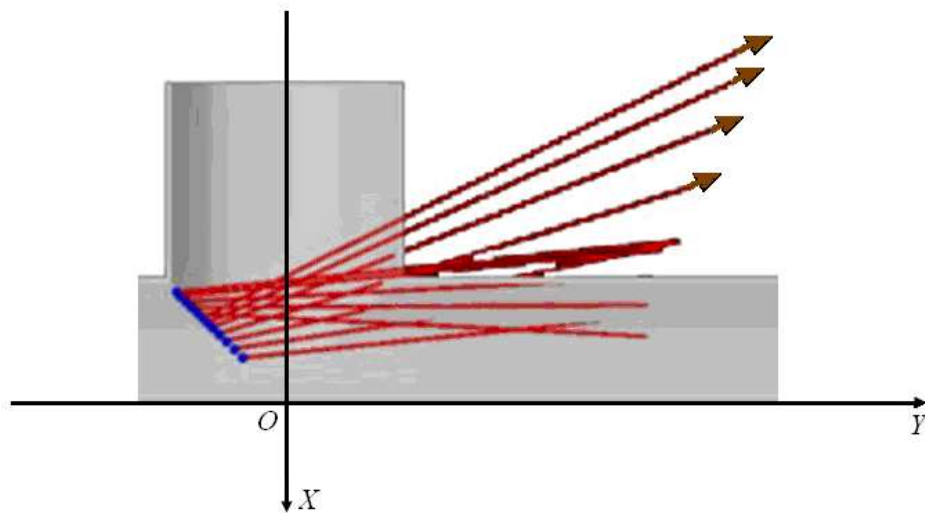


Рисунок 4.8 – Проекция векторов скоростей на горизонтальную плоскость в области загрузочного окна металлургического аппарата ФРС при различных положениях материальной частицы

Полученные значения проекций векторов скоростей снежной частицы в области загрузочного окна являются исходными данными для использования второй математической модели, представленной в работе – движения снежной частицы по ленте фрезы, которая позволит в дальнейшем оценить время полной разгрузки лопасти ротора, или тот факт, что частицы находящиеся в самой дальней точке загрузочного должны полностью успевать разгружаться.

Положение частицы в области загрузочного окна находится в ее нижней части, поэтому основной способ попадания в загрузочное окно – это движение по ленте фрезы.

4.5 Функциональные зависимости. Регрессионные модели

Рассмотрим, как изменяется длина участка ленты фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, которая находится в области загрузочного окна (рисунок 4.9). Чем больше этот участок, тем большее количество снега, находящееся на ленте попадет в метательный аппарат.

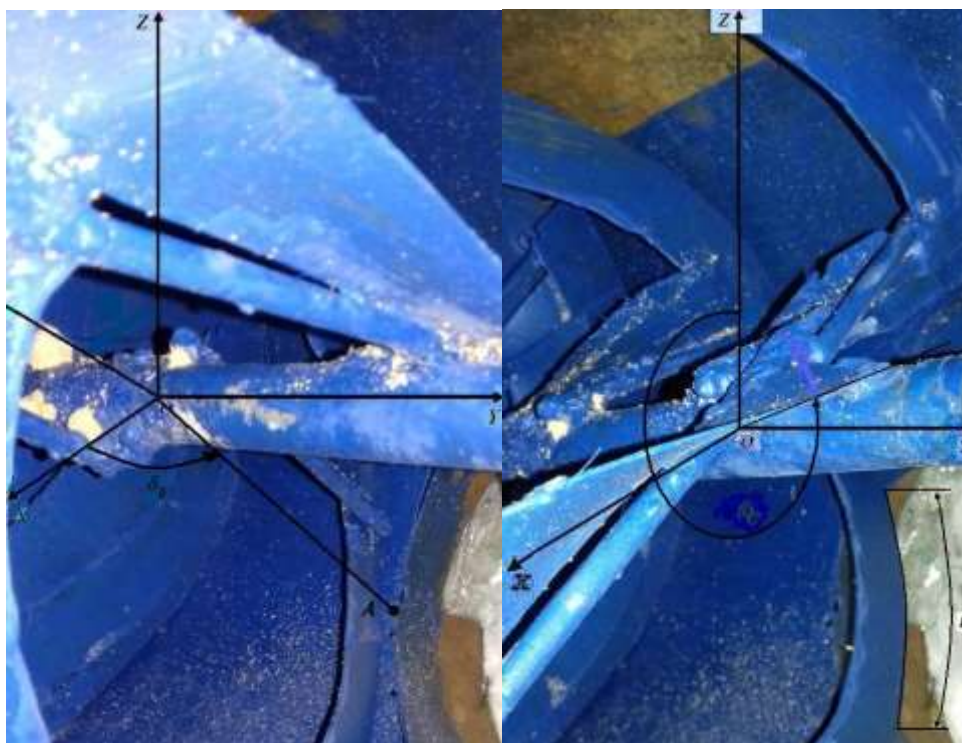


Рисунок 4.9 – Схема разгрузки ленты фрезы питателя

Процесс разгрузки начинается в точке A , касания ленты фрезы и загрузочного окна, которая имеет координаты в системе координат связанной с осью вращения фрезы питателя уравнениями:

$$y_A = R_z \cos \theta; \quad (4.16)$$

$$z_A = -R_z \sin \theta + c. \quad (4.17)$$

Угол, при котором начинается разгрузка фрезы в точке A , определяется выражением:

$$\delta_0 = -\frac{R_z \cdot \cos \theta}{R \cdot \operatorname{tg} \theta}. \quad (4.18)$$

Длина участка ленты фрезы, находящегося в загрузочном окне ограничена с одной стороны уравнением окружности загрузочного окна, а с другой уравнением вертикальной прямой, являющейся осью симметрии питателя.

Система уравнений, на основании которой определяется длина участка ленты находящаяся в области загрузочного окна, имеет вид:

$$\cos^2(\delta_0 \pm \omega \cdot t) + \operatorname{tg}^2 \theta \cdot (\delta_0 \pm \delta) = 1. \quad (4.19)$$

Уравнение (4.19) позволяет определить угол между отвалом на границе загрузочного окна при текущем положении ленты фрезы и горизонтальной плоскостью.

$$\begin{cases} z_{1,2} = R_z \cos(\delta_0 \pm \omega \cdot t + \delta); \\ y_{1,2} = R_z \operatorname{tg} \theta (\delta_0 \pm \delta). \end{cases} \quad (4.20)$$

По системе уравнений (4.20) находим координаты точки отвала на границе загрузочного окна при текущем положении ленты фрезы.

$$l^2 = 4\pi^2 R^2 (\delta_1 - \delta_2)^2 + (y_1 - y_2)^2. \quad (4.21)$$

Уравнение (4.21) определяющее расстояние между 2-мя точками.

$$l = l_1(t) + l_2 \left(t - \frac{2\pi}{n \cdot \omega} \right). \quad (4.22)$$

Уравнение (4.22) длины ленты фрезы для 2х и 3х заходных фрез.

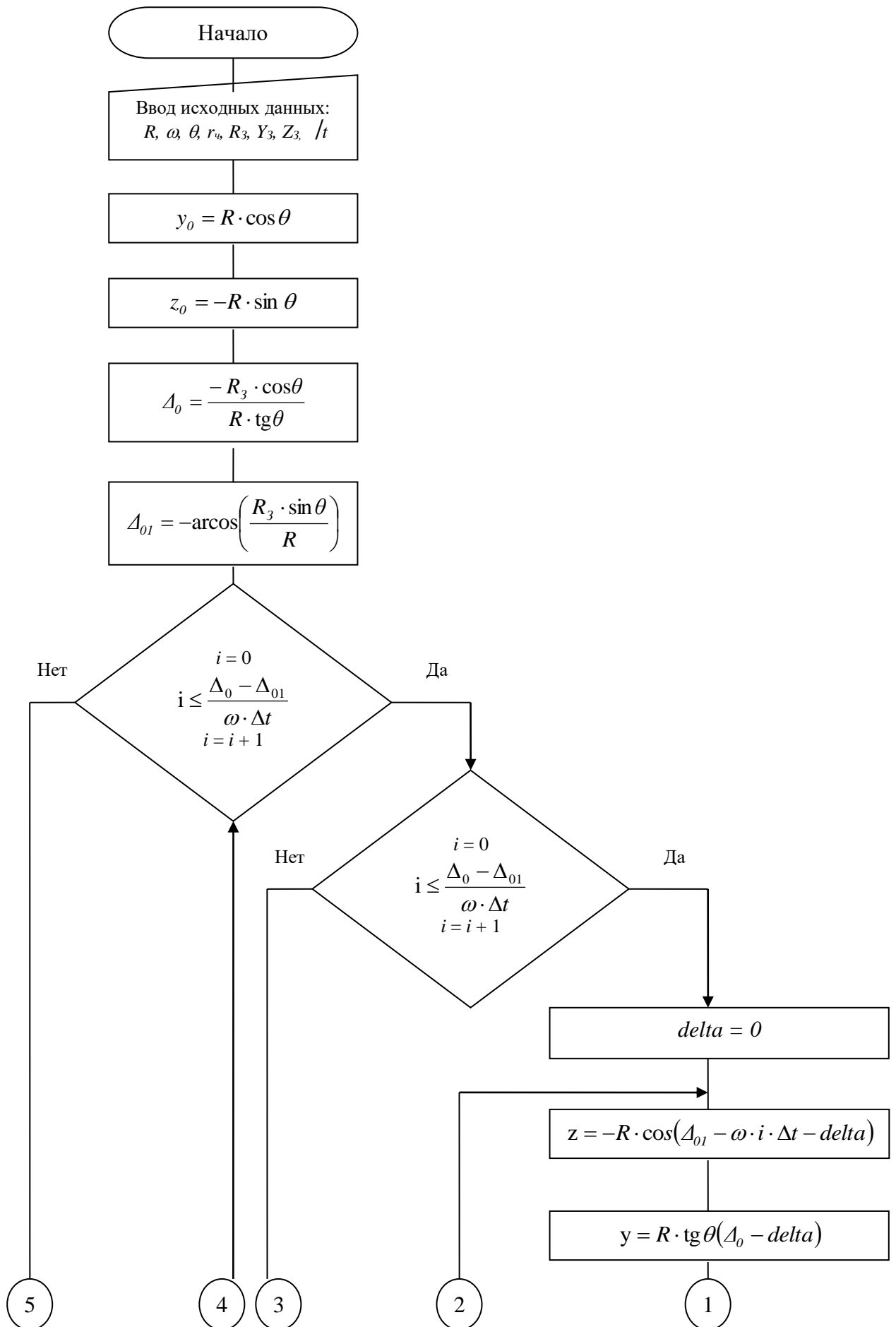


Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритма определения длины рабочего участка ленты фрезы

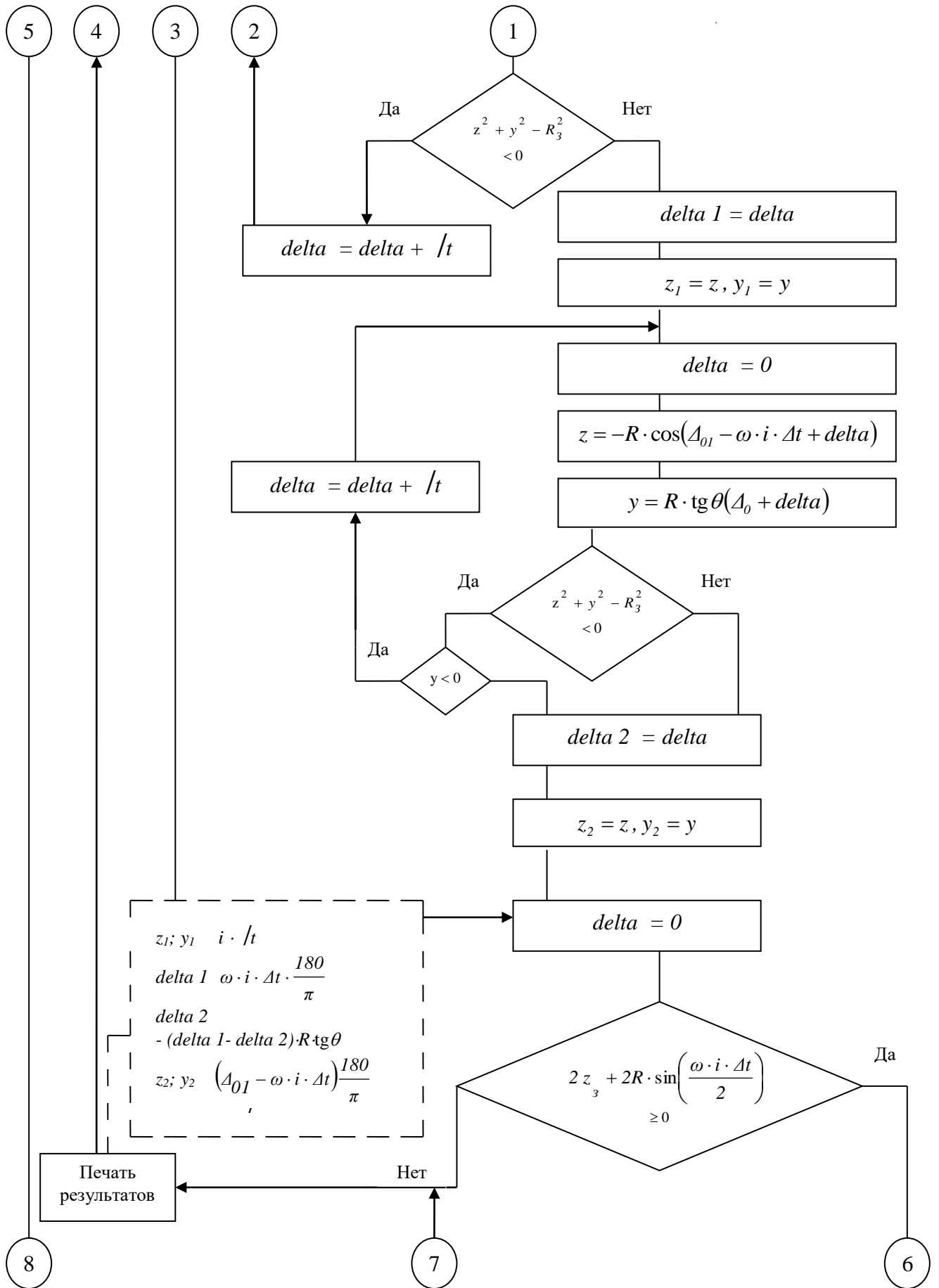


Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритма определения длины рабочего участка ленты фрезы

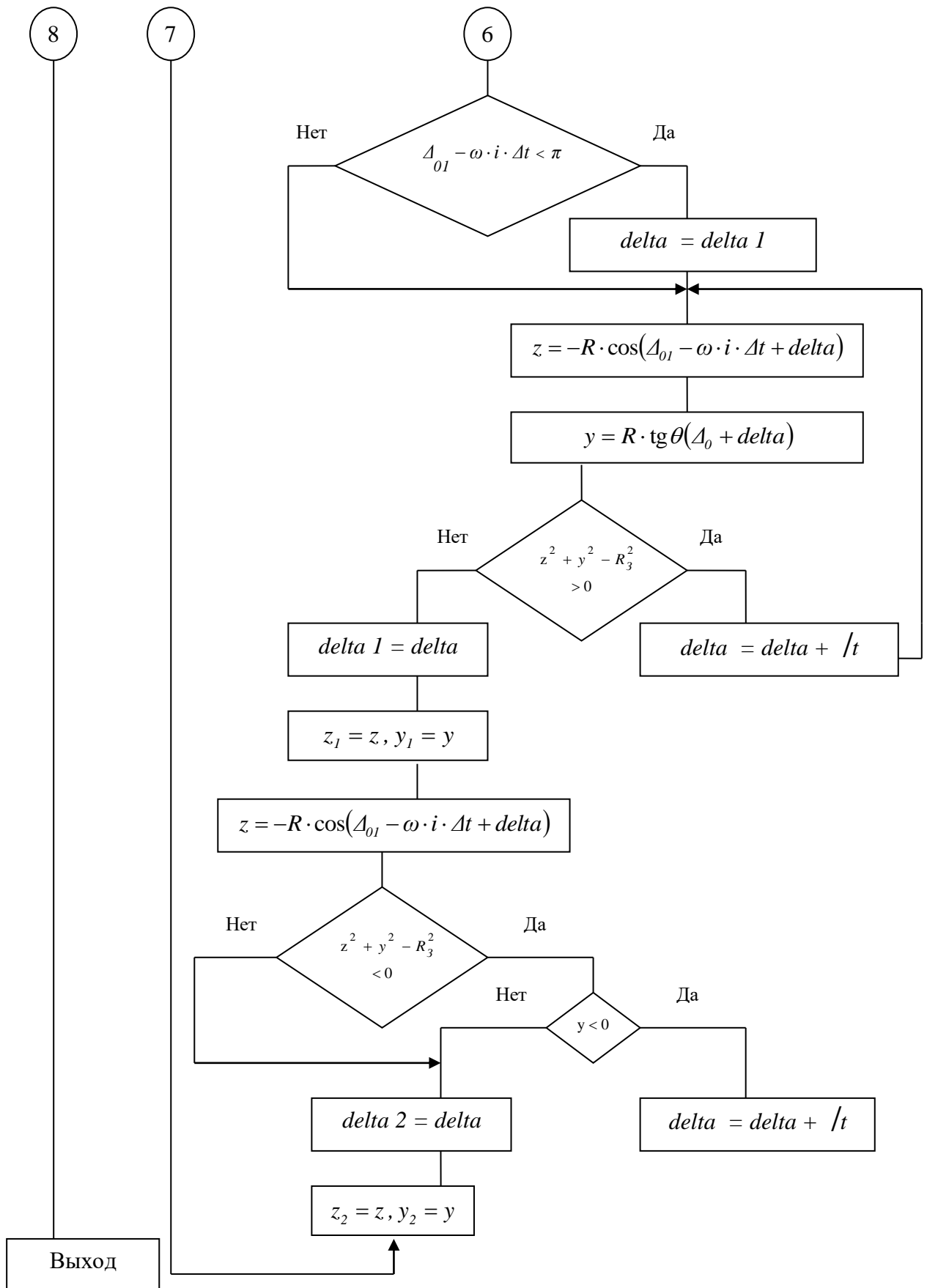


Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритма определения длины рабочего участка ленты фрезы

Численное решение на ЭВМ осуществлялось методом простой итерации. Блок-схема алгоритма определения длины рабочего участка ленты фрезы в зависимости от времени представлена на рисунке 4.10.

На рисунке 4.11 представлены графики изменения длины рабочего участка ленты фрезы в зависимости от времени. При проведении имитационного моделирования на ЭВМ фиксированными параметрами являлись: радиус ротора 0,3 м; угловая скорость фрезы 8 с^{-1} .

Варьировались 2 параметра: угол захода ленты фрезы 17 град, 24 град; радиус загрузочного окна 0,3 м, 0,25 м.

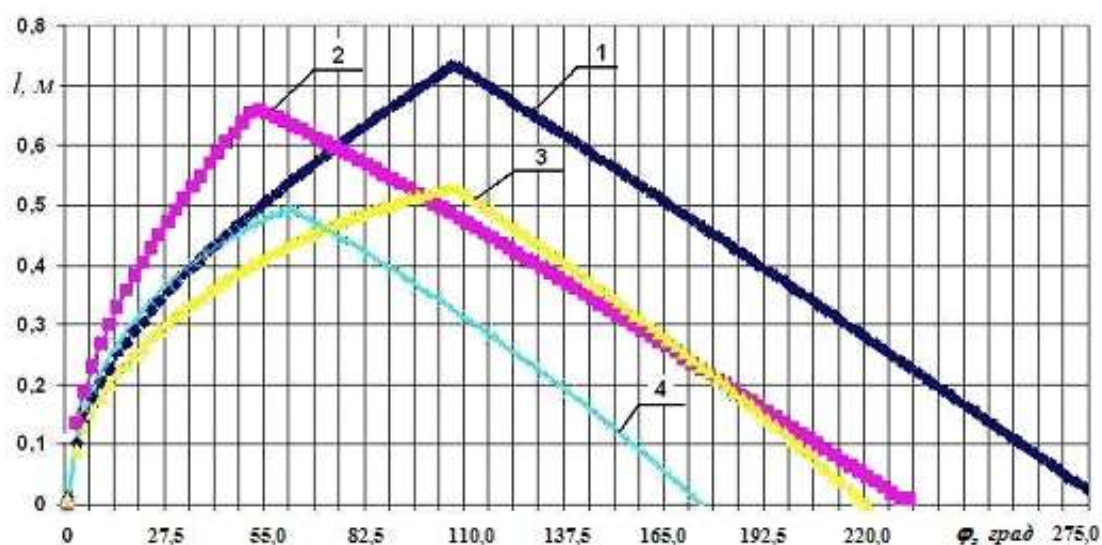


Рисунок 4.11 – Изменение длины ленты фрезы в области загрузочного окна:

- 1) $\theta=17$ град, $R_z = 0,3$ м; 2) $\theta=24$ град, $R_z = 0,25$ м; 3) $\theta=17$ град, $R_z = 0,25$ м;
- 4) $\theta=24$ град, $R_z = 0,3$ м.

Из графиков следует, что уменьшение угла захода приводит к увеличению загрузки.

Для случая многозаходной фрезы суммарная длина рабочей поверхности увеличивается и одновременно работает уже несколько заходов.

Для двухзаходной и трехзаходной фрез изменение суммарных длин участков лент фрезы одновременно находящихся в области загрузочного окна представлена на рисунке 4.12.

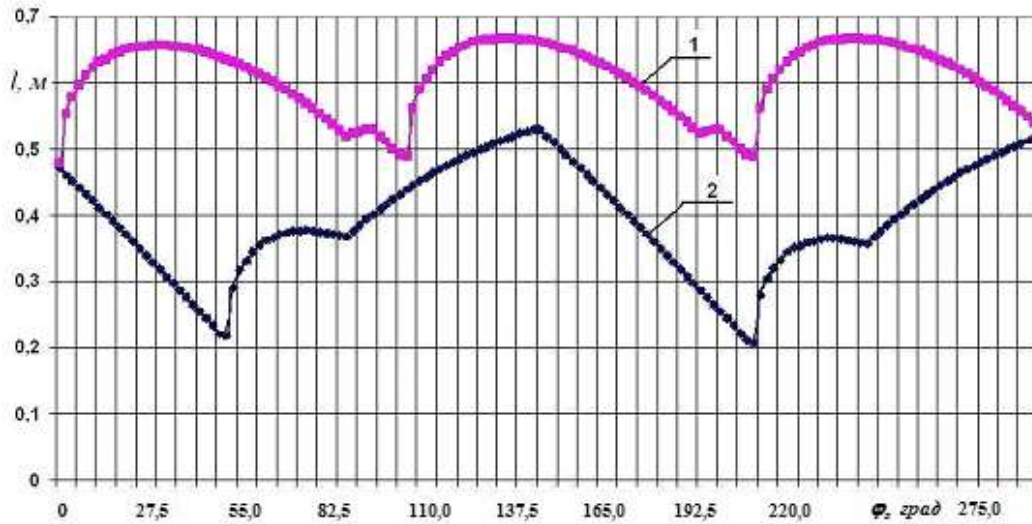


Рисунок 4.12 – Изменение длины ленты фрезы в области загрузочного окна:

1 – трехзаходная фреза; 2 – двухзаходная фреза.

Таким образом, многозаходная фреза с малым углом захода ленты фрезы обеспечивает одновременную разгрузку участка ленты фрезы большей длины.

Были получены уравнения регрессии (4.23, 4.25) изменения длины рабочего участка ленты фрезы при радиусах равных 0,3 м, 0,4 м, при этом варьируемыми параметрами являлись радиус загрузочного окна в диапазоне от 0,2 до 0,3 м, угол захода от 15 до 25 град. Регрессионный анализ осуществлялся методом наименьших квадратов по алгоритму Левенберга-Маквардта в программе STATISTICA. Полученные уравнения дают удовлетворительный результат в интервале времени от 0 до 0,6 секунд, при условии положительной величины длины рабочего участка l .

Точка перегиба определяется по зависимости (4.24).

Сама длина рабочего участка определяется по уравнению регрессии (4.23, 4.25).

$$l = \left(a_0 + a_1 \cdot R_z + a_2 \cdot \theta + a_3 \cdot R_z^2 + a_4 \cdot \theta^2 \right) + \left(a_0 + a_1 \cdot R_z + a_2 \cdot \theta + a_3 \cdot R_z^2 + a_4 \cdot \theta^2 \right) \cdot t + \left(a_0 + a_1 \cdot R_z + a_2 \cdot \theta + a_3 \cdot R_z^2 + a_4 \cdot \theta^2 \right) \cdot t^2. \quad (4.23)$$

$$t = b_0 + b_1 \cdot R_z + b_2 \cdot \theta + b_3 \cdot R_z^2 + b_4 \cdot \theta^2. \quad (4.24)$$

$$l = \left(a_0^1 + a_1^1 \cdot R_z + a_2^1 \cdot \theta + a_3^1 \cdot R_z^2 + a_4^1 \cdot \theta^2 + a_5^1 \cdot R \cdot \theta \right) + \left(a_0^2 + a_1^2 \cdot R_z + a_2^2 \cdot \theta + a_3^2 \cdot R_z^2 + \right.$$

$$+ a_4^2 \cdot \theta^2 \cdot a_5^2 \cdot R \cdot \theta) \cdot t + \left(a_0^3 + a_1^3 \cdot R_z + a_2^3 \cdot \theta + a_3^3 \cdot R_z^2 + a_4^3 \cdot \theta^2 \cdot a_5^3 \cdot R \cdot \theta \right) \cdot t^2. \quad (4.25)$$

Коэффициенты, приведенные в таблицах 4.3 и 4.4, которые подставляются в уравнение (4.23) и определяется рабочая длина участка ленты фрезы, аналогично коэффициенты в таблицах 4.5 и 4.6 подставляются в уравнение (4.25).

Таблица 4.3 – Коэффициенты уравнения регрессии (4.7) при $R = 0,3$ м

верхний индекс	1	2	3
a_0	0,085087	-3,0517	16,94441
a_1	0,127585	-11,7219	9,58119
a_2	-0,008786	0,4229	-1,85037
a_3	-0,235003	30,5406	-1,55707
a_4	0,000185	-0,0059	0,02932

Таблица 4.4 – Коэффициенты уравнения регрессии (4.9) при $R = 0,3$ м

верхний индекс	1	2	3
a_0	0,24423	-2,0643	2,4000
a_1	-1,25760	17,0941	-24,1088
a_2	0,00357	-0,0384	0,0133
a_3	4,62313	-34,3746	55,5078
a_4	-0,00006	0,0007	-0,0015

Таблица 4.5 – Коэффициенты уравнения регрессии (4.7) $R = 0,4$ м

верхний индекс	1	2	3
a_0	0,085087	-3,0517	16,94441
a_1	0,127585	-11,7219	9,58119
a_2	-0,008786	0,4229	-1,85037
a_3	-0,235003	30,5406	-1,55707
a_4	0,000185	-0,0059	0,02932

Таблица 4.6 – Коэффициенты уравнения регрессии (4.9) при $R = 0,4$ м

верхний индекс	1	2	3
a_0	0,24423	-2,0643	2,4000
a_1	-1,25760	17,0941	-24,1088
a_2	0,00357	-0,0384	0,0133
a_3	4,62313	-34,3746	55,5078
a_4	-0,00006	0,0007	-0,0015

На рисунке 4.13, 4.14 представлены поверхности: тах длина рабочего участка ленты фрезы определенная по формуле (4.21) и по уравнениям регрессии (4.23, 4.25), соответственно.

Таблица 4.7 – Коэффициенты уравнения регрессии (4.8)

	При $R = 0,3$ м	При $R = 0,4$ м
b_0	0,1731	-1,165
b_1	4,85	11,4125
b_3	-0,0504	-0,0556
b_3	-8,5938	-15,625
b_4	0,0009	0,001

При этом коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$ при $R = 0,3$ м, а при $R = 0,4$ м детерминации $R^2 = 0,98$. Максимальное абсолютное отклонение не превышает 0,05 м.

Данные коэффициенты справедливы при следующих ограничениях:

$$0,2 \leq R_z < 0,3$$

$$15 \leq \theta \leq 25$$

$$0 \leq t \leq 0,6$$

$$l \geq 0$$

$$0,3 \leq R_z \leq 0,4$$

$$15 \leq \theta \leq 25$$

$$0 \leq t \leq 0,6$$

$$l \geq 0$$

На рисунке 4.15, 4.16 представлены поверхности: длина рабочего участка ленты фрезы при конкретном времени определенная также по формуле (4.21) и по уравнениям регрессии (4.23, 4.25), соответственно для радиуса фрезы питателя 0,4 м.

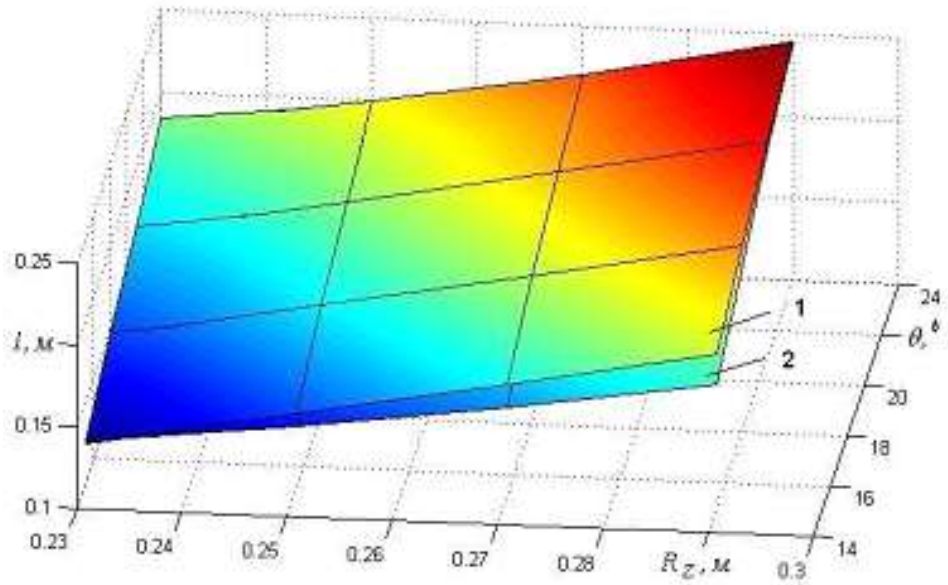


Рисунок 4.13 – Максимальная длина рабочего участка ленты фрезы теоретическая 1, определенная по (4.3) и по уравнениям регрессии (4.7) 2, для $R = 0,3 \text{ м}$

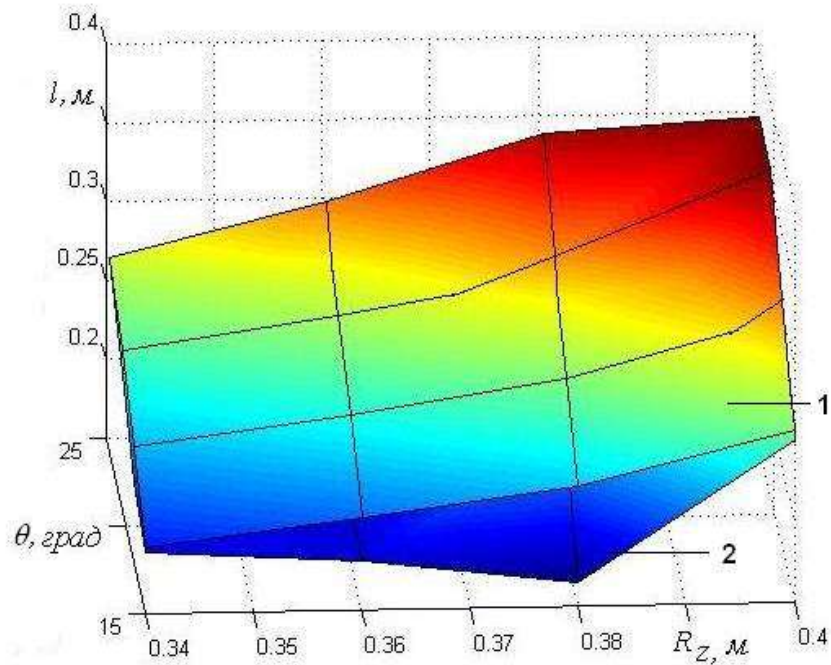


Рисунок 4.14 – Максимальная длина рабочего участка ленты фрезы теоретическая 1, определенная по (4.3) и по уравнениям регрессии (4.9) 2, для $R = 0,4 \text{ м}$

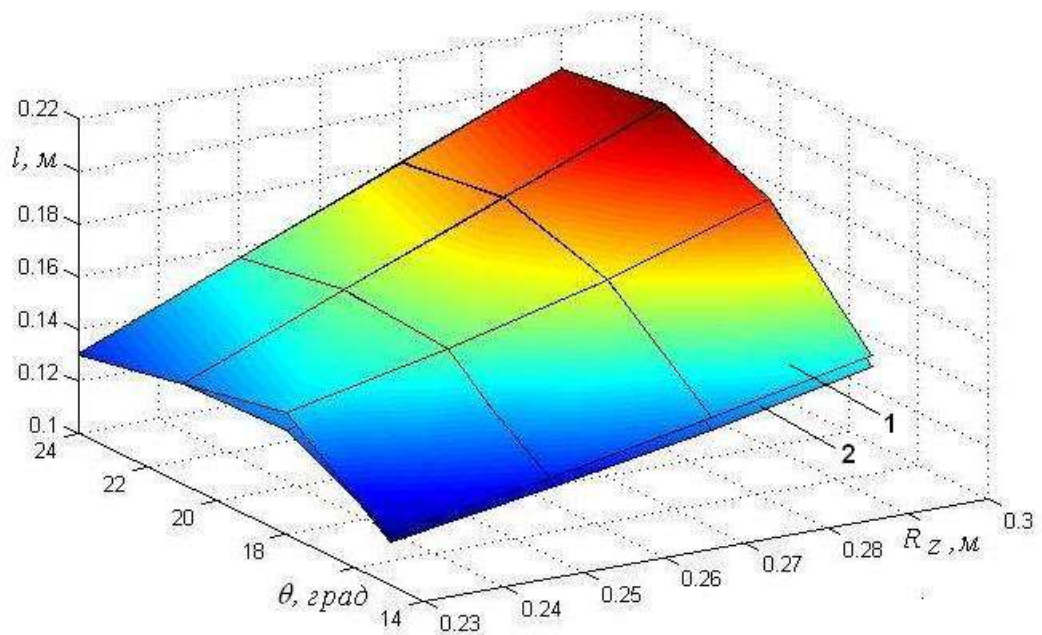


Рисунок 4.15 – Длина рабочего участка ленты фрезы
теоретическая 1 и по уравнениям регрессии 2 для $t = 0,2$ с

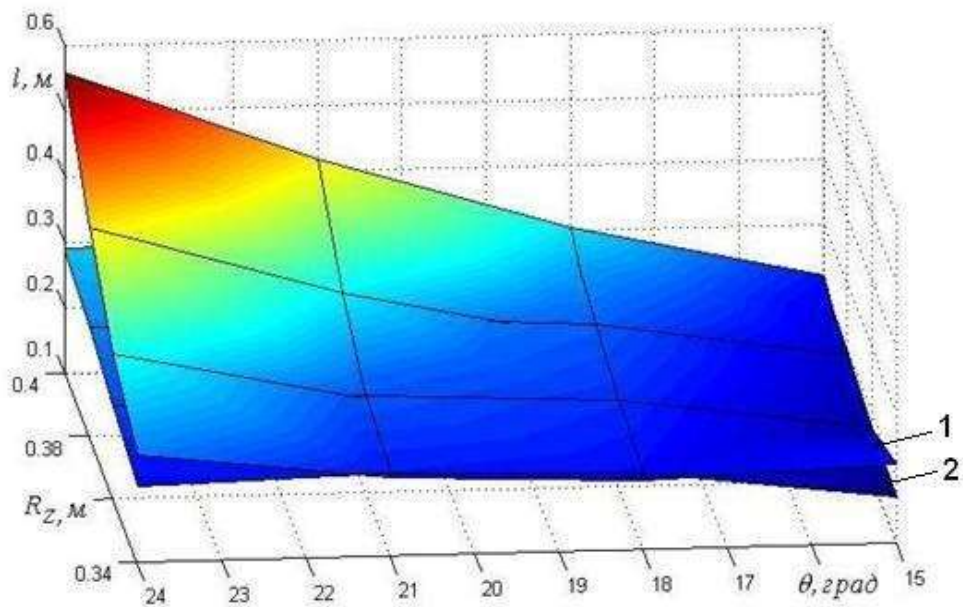


Рисунок 4.16 – Длина рабочего участка ленты фрезы
теоретическая 1 и по уравнениям регрессии 2 для $t = 0,2$ с

4.6 Определение характера движения снежных частиц при сходе с ленты фрезы

Был проведен вычислительный эксперимент по определению технологических параметров частиц при сходе с ленты фрезы в области загрузочного окна. Варьируемыми параметрами являлись: угол начала разгрузки ленты фрезы, угловая скорость вращения фрезы питателя ФРС, ω , радиус снежной частицы, r , ширина ленты фрезы, b . В качестве начальных условий были приняты результаты имитационного моделирования работы фрезы питателя ФРС, включающие в себя значения проекций вектора скорости снежной частицы в области загрузочного окна, v_x , v_y , v_z . Остальные технологические параметры питателя ФРС соответствовали значениям, представленным в таблице 3.1. Величина удельной мощности определялась с учетом формулы (3.30), где значение мощности представляло собой среднее значение суммы мощностей, найденных по формуле (3.30) на каждом вычислительном цикле.

На рисунках 4.17 и 4.18 представлены результаты определения угла разгрузки в зависимости от угловой скорости вращения ротора и ширины ленты фрезы, для частиц массой $0,08 \cdot 10^{-3}$ кг и $7,8 \cdot 10^{-3}$ кг, при плотности снега 160 кг/м^3 , и углом начала разгрузки 10^0 .

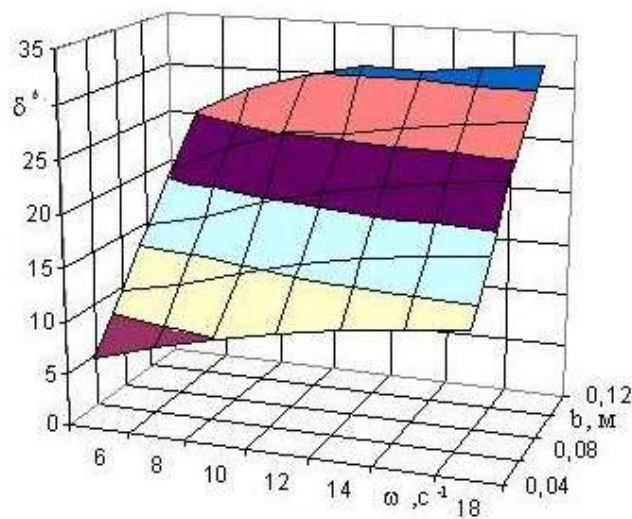


Рисунок 4.17 – Зависимость угла разгрузки от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы при $m = 0,08 \cdot 10^{-3}$ кг

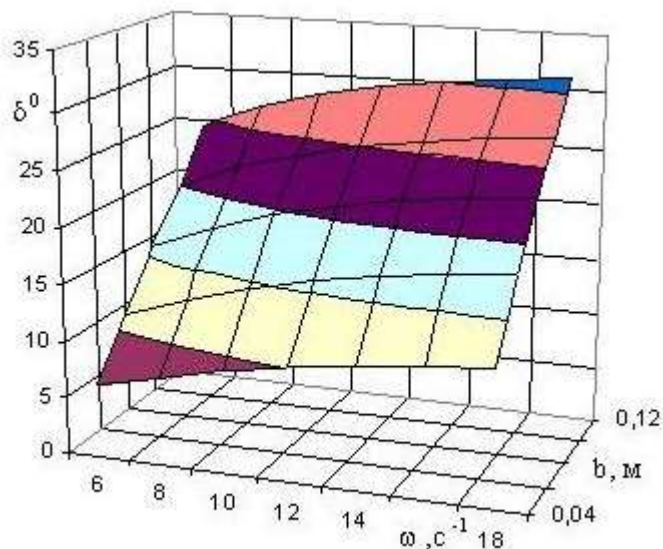


Рисунок 4.18 – Зависимость угла разгрузки от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы при $m = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг

Изменения угла разгрузки при увеличении угловой скорости и ширины ленты фрезы носит нелинейный характер. Увеличение угловой скорости вращения фрезы в два раза, приводит к увеличению угла разгрузки до 25%. При аналогичном увеличении ширины ленты фрезы наблюдается прирост угла разгрузки более чем в 2 раза. Т.е. увеличивая угловую скорость вращения, целесообразно ширину ленты фрезы уменьшать с целью обеспечения полной разгрузки снежной массы. Увеличение массы частицы не оказывает существенного влияния на угол разгрузки.

При увеличении ширины ленты фрезы наблюдается начальный рост проекции вектора скорости частицы на ось OX принятой системы координат [13]. При дальнейшем увеличении ширины ленты фрезы наблюдается уменьшение роста величины проекции вектора скорости частицы на ось OX, при этом влияние угловой скорости вращения фрезы становится незначительным. Увеличение радиуса частицы приводит к увеличению величины проекции вектора скорости частицы на ось OX на 2% (рисунки 4.19, 4.20).

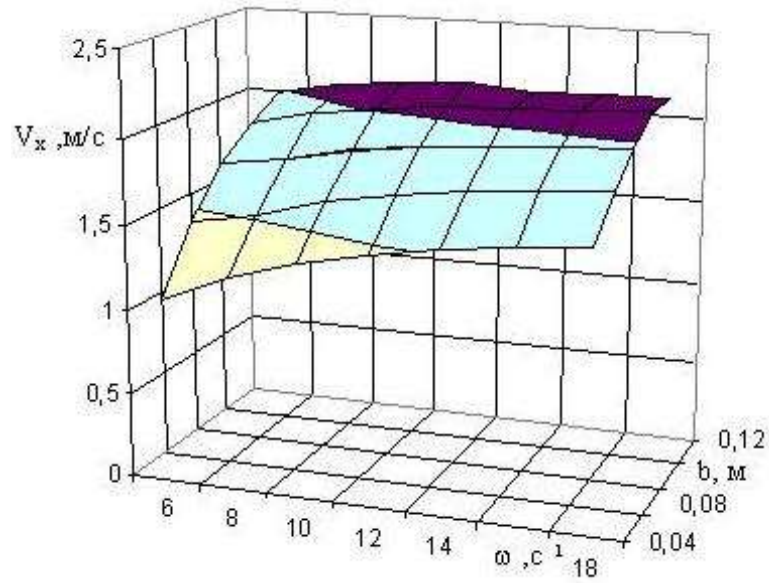


Рисунок 4.19 – Зависимость проекции вектора скорости частицы на ось OX при сходе с ленты фрезы от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы при $m = 0,08 \cdot 10^{-3}$ кг

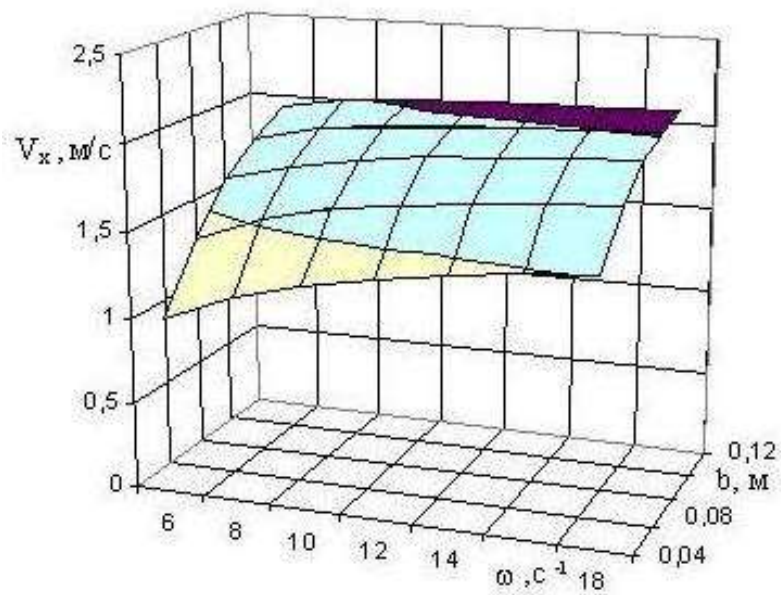


Рисунок 4.20 – Зависимость проекции вектора скорости частицы на ось OX при сходе с ленты фрезы от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы при $m = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг

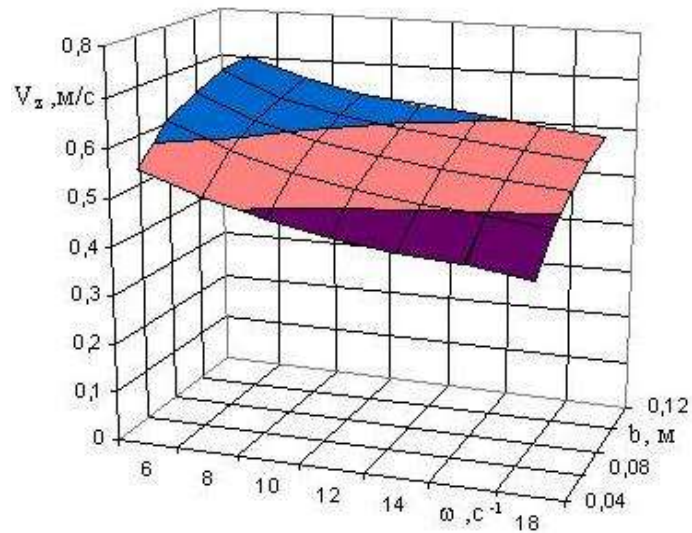


Рисунок 4.21 – Зависимость проекции вектора скорости частицы на ось OZ при сходе с ленты фрезы от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы при $m = 0,08 \cdot 10^{-3}$ кг

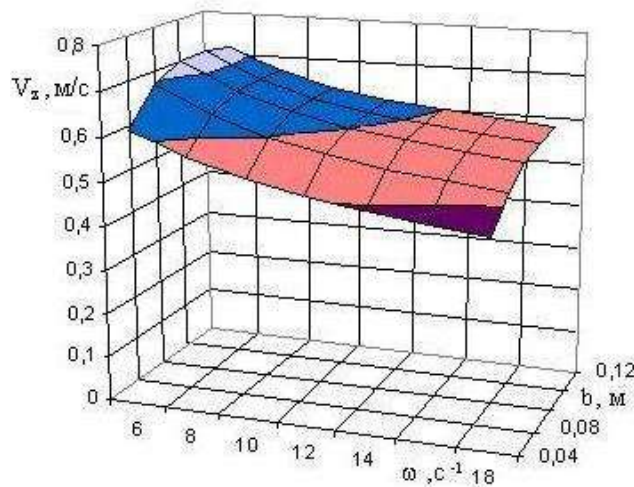


Рисунок 4.22 – Зависимость проекции вектора скорости частицы на ось OZ при сходе с ленты фрезы от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы при $m = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг

При увеличении угловой скорости вращения ленты фрезы наблюдается уменьшение проекции вектора скорости частицы на ось OZ принятой системы координат. В диапазоне угловых скоростей от 6 до 12 с^{-1} наблюдается максимум величины проекции вектора скорости частицы на ось OZ , который составляет

0,727...0,749 при ширине ленты фрезы 0,1 и 0,08 соответственно, и 0,603...0,615 при ширине ленты фрезы 0,12. Большим размерам частиц соответствует меньшие значения проекции вектора скорости. Таким образом, при увеличении угловой скорости вращения фрезы наблюдается увеличение проекции вектора скорости на ось OX с одновременным уменьшением проекции вектора скорости частицы на ось OZ , что позволяет предположить о возрастании давления на снежный массив перед метательным аппаратом, что безусловно является положительным фактом (рисунки 4.21, 4.22) [13].

На рисунках 4.23 и 4.24 представлены зависимости удельной мощности от угловой скорости вращения фрезы питателя и ширины ленты фрезы при разгрузке фрезы для частиц массой $0,08 \cdot 10^{-3}$ кг и $7,8 \cdot 10^{-3}$ кг, соответственно, и начальном угле разгрузки 10^0 . Общим для рассматриваемых случаев является рост удельной мощности при увеличении угловой скорости вращения фрезы. Характер роста имеет практически линейный. Отличительной особенностью влияния ширины ленты фрезы на удельную мощность процесса является то, что увеличение ширины ленты фрезы на 20% от начальной 0,04 м, при угловой скорости вращения менее 10 с^{-1} , обуславливает увеличение удельной мощности на 9%, однако при ширине ленты фрезы более 0,1 м наблюдается снижение удельной мощности на 1%, а при угловой скорости вращения фрезы более 10 с^{-1} - уже на 3%. Характер этого изменения имеет слабовыраженный нелинейный характер. При увеличении размеров частицы величина удельной мощности уменьшается, что объясняется увеличением производительности. При увеличении размеров частиц на 30%, удельная мощность уменьшается в 4 раза. Уравнения регрессии, полученные в результате регрессионного анализа программе STATISTICA, имеют вид:

- для частицы с массой $0,08 \cdot 10^{-3}$ кг; $N_{y\partial}$, Вт $\text{с}/\text{м}^3$:

$$N_{y\partial} = -34547,69 \cdot 10^{-3} + 21903,86 \cdot 10^{-3} \cdot \omega - 49215,48 \cdot 10^{-3} \cdot b. \quad (4.26)$$

- для частицы с массой $7,8 \cdot 10^{-3}$ кг; $N_{y\partial}$, Вт $\text{с}/\text{м}^3$:

$$N_{y\partial} = -367,69 \cdot 10^{-3} + 158,86 \cdot 10^{-3} \cdot \omega - 33373,28 \cdot 10^{-3} \cdot b^2 + 4365,72 \cdot 10^{-3} \cdot b. \quad (4.27)$$

Величина коэффициента детерминации равна 0,997 и 0,995, соответственно.

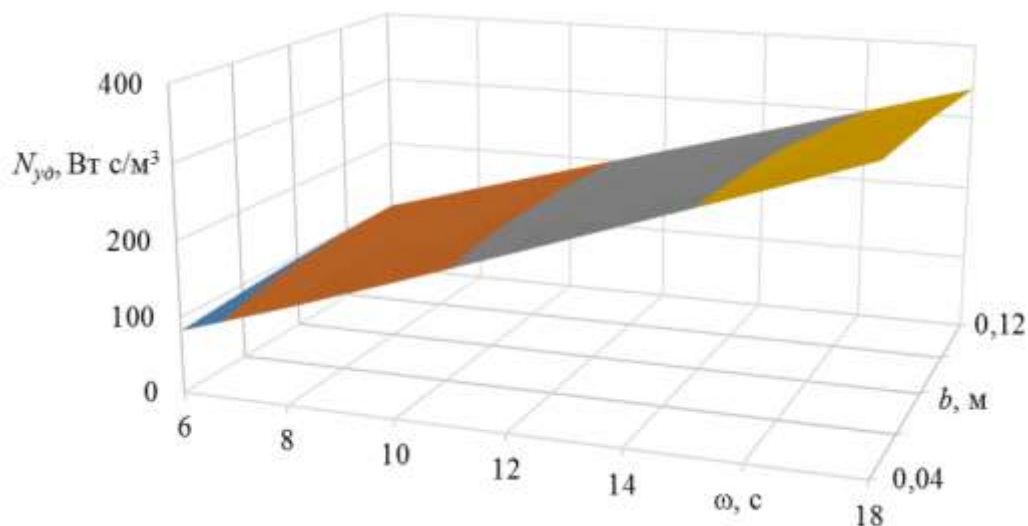


Рисунок 4.23 – Зависимость удельной мощности при сходе частицы с ленты фрезы от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы при $m = 0,08 \cdot 10^{-3}$ кг

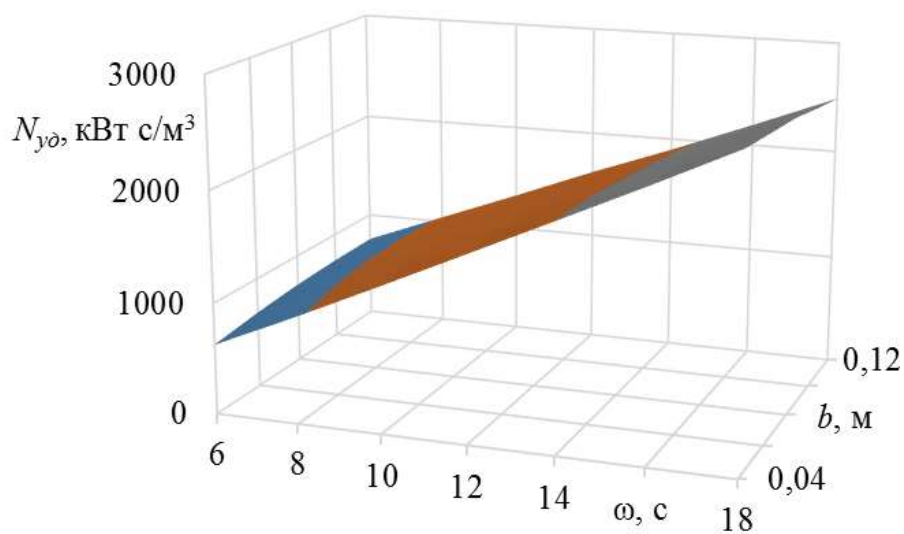


Рисунок 4.24 – Зависимость удельной мощности при сходе частицы с ленты фрезы от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы при $m = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг

Увеличение начального угла разгрузки на 10^0 от вертикальной оси, приводит к 13% снижению величины удельной мощности (рисунки 4.25, 4.26).

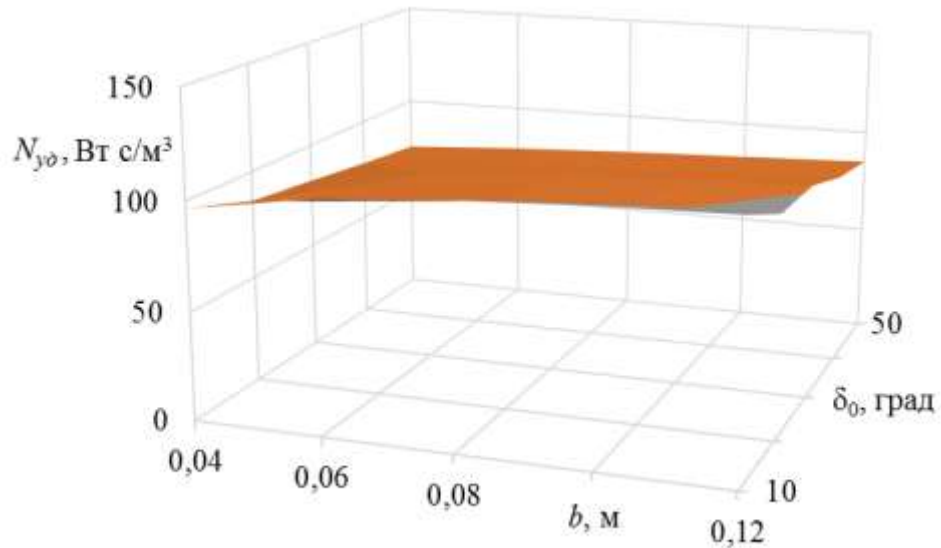


Рисунок 4.25 – Зависимость удельной мощности при сходе частицы с ленты фрезы от начального угла разгрузки, ширины ленты фрезы при $m = 0,08 \cdot 10^{-3}$ кг и угловой скорости фрезы 8 с^{-1}

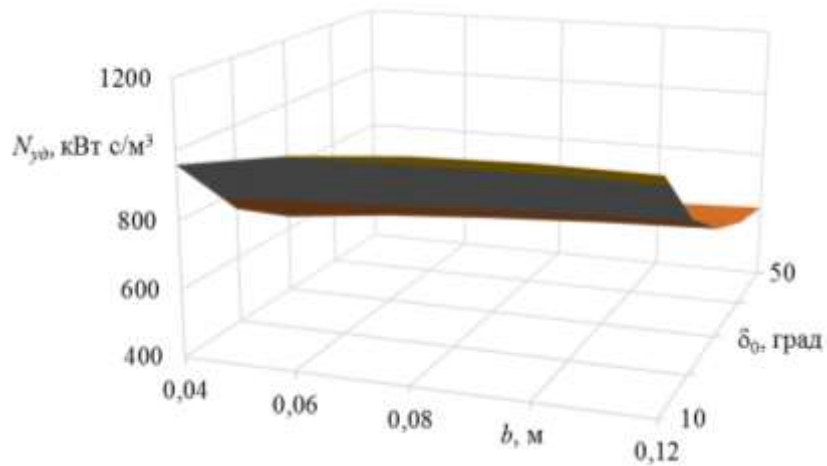


Рисунок 4.26 – Зависимость удельной мощности при сходе частицы с ленты фрезы от начального угла разгрузки, ширины ленты фрезы при $m = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг и угловой скорости фрезы 8 с^{-1}

Уравнения регрессии имеют вид:

- для частицы массой $0,08 \cdot 10^{-3}$ кг, $N_{y\partial}$, Вт $\text{с}/\text{м}^3$:

$$N_{y\partial} = 103,73 - 1,16 \cdot \delta_0 + 0,008 \cdot \delta_0^2 + 176,49 \cdot b. \quad (4.28)$$

- для частицы массой $7,8 \cdot 10^{-3}$ кг, $N_{y\delta}$, кВт с/м³:

$$N_{y\delta} = 1178,89 - 27,85 \cdot \delta_0 + 0,291 \cdot \delta_0^2 + 1027,62 \cdot b. \quad (4.29)$$

Значения коэффициентов детерминации составили 0,97 и 0,99, соответственно.

В целом угол разгрузки изменяется от 0 до 113°, при этом максимальное значение угла разгрузки для частицы массой $7,8 \cdot 10^{-3}$ кг составило 35° при начальном угле разгрузки 10°. Таким образом, при использовании ленты фрезы с переменной шириной, обеспечивается полная разгрузка снежной массы транспортируемой такой лентой.

Основные выводы по главе

1. Сформулирован критерий оценки эффективности рабочего процесса питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, позволяющий оценить эффективность транспортировки снежной массы питателем фрезерно-роторного снегоочистителя при уборке снежного массива в трехмерном пространстве.

2. Осуществлен анализ параметров работы питателя ФРС: заданы технологические параметры фрезы питателя ФРС и физические характеристики транспортируемой снежной массы; произведена проверка корректности модели работы питателя ФРС; анализ результатов расчета движения снежной частицы в питателе ФРС и анализ влияния числа заходов ленты фрезы на удельную мощность процесса транспортирования снежной массы.

3. Вследствие проведенных теоретических исследований выявлены зависимости, которые устанавливают связь между удельной мощностью процесса разгрузки фрезы питателя ФРС и от ширины ленты фрезы, угловой скорости вращения фрезы, от начального угла разгрузки и массы снежной частицы. Увеличение угловой скорости вращения фрезы на 30% приводит к 50% росту

удельной мощности. Увеличение ширины ленты фрезы на 20% от начальной 0,04 м, при угловой скорости вращения менее 10 с^{-1} , обуславливает увеличение удельной мощности на 9%, однако при ширине ленты фрезы более 0,1 м наблюдается снижение удельной мощности на 1%, а при угловой скорости вращения фрезы более 10 с^{-1} - уже на 3%. Увеличение начального угла разгрузки на 10^0 от вертикальной оси, приводит к 13% снижению величины удельной мощности. Для питателя с переменной шириной ленты фрезы теоретически определенные значения удельной мощности уменьшились на 23%. Теоретически ожидаемое уменьшение значения величины удельной мощности для фрезерно-роторного снегоочистителя с питателем с переменной шириной ленты фрезы по сравнению с фрезерно-роторным снегоочистителем с питателем с постоянной шириной ленты фрезы составит 12%.

4. В результате регрессионного анализа статистических данных основных параметров питателя ФРС получены функциональные зависимости изменения длины рабочего участка ленты фрезы в области загрузочного окна, позволяющие осуществлять обоснованный выбор числа заходов ленты фрезы питателя ФРС и ее угол захода в области загрузочного окна для фрез различного диаметра, при проектировании новых и модернизации существующих ФРС.

5. Разработаны алгоритм и методика выбора технологических параметров фрезы питателя ФРС, также пакет прикладных программ, позволяющих рассчитать кинематические параметры питателя и ширину ленты фрезы на ЭВМ.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРРЗЕРНО-РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ

Одним из важных этапов данного диссертационного исследования, в рамках комплексного метода исследований, являлось проведение экспериментальных исследований рабочего процесса питателя ФРС. Основной задачей данных экспериментальных исследований являлось подтверждение адекватности разработанной математической модели «питатель ФРС – снежный массив» и подтверждение эффективности работы фрезы с переменной шириной ленты [1].

5.1 Объект экспериментального исследования фрезерно-роторного снегоочистителя

Экспериментальные исследования работы ФРС проводились на реальной модели ФРС HUTER SGC 4100 (рисунок 5.1), технические характеристики которого представлены в таблице 5.1, а также на экспериментальной установке ФРС с аналогичными техническими характеристиками.



Рисунок 5.1 – Исследуемая модель ФРС HUTER SGC 4100

Таблица 5.1 – Характеристики Huter SGC 4100

Тип	Снегоуборщик
Модель	Huter SGC 4100
Вид	Колесный
Тип двигателя	Бензиновой, четырехтактный
Модель двигателя	huter ss ohv
Мощность двигателя	4045 Вт
Объем двигателя	179 см ³
Объем топливного бака	3,6 л
Расход топлива	1,7 л/ч
Тип привода	Самоходный
Тип коробки передач	Механическая
Максимальная скорость движения	5 км/ч
Количество скоростей вперед	5
Количество скоростей назад	2
Стартер	Ручной
Фреза	Двухзаходная
Тип фрезы	Зубчатая
Материал корпуса	Металл
Материал фрезы	Металл
Материал редуктора	Металл
Материал желоба	Металл
Ширина захвата снега	56 см
Высота захвата снега	54 см
Дальность выброса снега	12 м
Уровень шума	94 дБ
Вес	73 кг

5.2 План эксперимента и измерительные приборы

Физический эксперимент проводился на модели питателя ФРС, технические характеристики которого следующие: угловая скорость вращения фрезы $\omega = 15\text{с}^{-1}$; лента фрезы с постоянной шириной $b = 4$ см, лента фрезы с переменной шириной $b =$ от 2 см до 8 см; количество заходов $n = 1$.

При выполнении экспериментальных исследований применялись следующие средства измерений: видеокамера (рисунок 5.3 а), линейка измерительная металлическая с погрешностью измерений 0,5 мм (рисунок 5.3 б); штангенциркуль, позволяющий производить измерения с точностью до 0,05 мм.



Рисунок 5.2 – Фреза питателя HUTER SGC 4100

Проведение измерений в процессе эксперимента всегда сопровождается погрешностями и ошибками измерений. Для уменьшения их величины при измерении и последующей обработке параметров работы фрезы питателя ФРС их значения принимались как среднее арифметическое по пяти замерам [1].

План эксперимента заключался в следующем:



а)



б)

Рисунок 5.3 – Измерительные приборы: а) видеокамера; б) измерительная рулетка.

- сферическая частица, радиусом $r = 0,021$ м, из полимерного материала с коэффициентом внешнего трения, 0,26, из состояния покоя, при следующих начальных условиях, в принятой системе координат:

$$x = y = 0, z = -R, v_x = v_y = v_z = 0, \quad (5.1)$$

под действием фрезы перемещалась в питателе ФРС, в направлении загрузочного окна;

- на видеокамеру непрерывно регистрировалась траектория движения частицы в физической модели питателя ФРС;

- обработка полученного видеоматериала движения частицы в питателе ФРС заключалась в разбиении на отдельные кадры всего видеоряда в программе Windows Move Maker;

- масштабный коэффициент определялся как отношение размера частицы на полученных изображениях, к ее реальному физическому размеру. Величина масштабного коэффициента, M_B , составила:

$$M_B = \frac{0,01}{0,021} = 0,455, \text{ пикс./м}; \quad (5.2)$$

- по полученным кадрам осуществлялось определение скоростей движения частицы. Для этого по величине скорости съемки, составившей 25 кадр/с.,

выбирались соседние кадры съемки с заданным шагом и делились на величину скорости съемки, таким образом, определялись интервалы движения. Затем сравнением текущего положения частицы на соседних кадрах, которое определялось с помощью линейки, находили расстояние пройденное частицей. Полученное расстояние переводилось в, м., произведением на масштабный коэффициент M_B , определялось реальное расстояние пройденное частицей за исследуемый интервал времени;

- из отношения определенного расстояния на интервал времени, пропорциональный частоте кадров полученного видеоряда, определяли скорость движения частицы за исследуемый интервал времени.

Использовались следующие параметры:

Радиус фрезы питателя ФРС, 0,2 м;

Угол захода ленты фрезы питателя ФРС, 19°;

Диаметр транспортируемого тела, 0,022 м;

Коэффициент трения тела по поверхности отвала 0,26;

Угловая скорость вращения фрезы 10 с⁻¹, 12 с⁻¹, 15 с⁻¹.

На питатель действовал один варьируемый фактор – угловая скорость вращения фрезы питателя ФРС.

В качестве отклика рассматривали траекторию движения частицы по поверхности отвала питателя $x = f(y)$, и проекции вектора скорости частицы в системе координат $OXYZ$, $v_x = f(v_y)$ (рисунок 3.1) Необходимо оценить функции отклика, т.е. найти связь между факторами и откликом [3, 157]. Функция отклика для перемещений была задана в виде:

$$x = \exp \cdot (b_0 + b_1 \cdot y) / (1 + \exp \cdot (b_2 + b_3 \cdot y)), \quad (5.3)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты функции.

Функция отклика для проекций вектора скорости частицы имела вид:

$$v_z = b_0 + b_1 \cdot v_x^2 + b_2 \cdot v_x; \quad (5.4)$$

При планировании эксперимента выбран план полного факторного эксперимента типа 2^1+1 . Число опытов 3. Число повторов каждого опыта приняли равным 3. Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Факторы	Отклик		
	$\omega, \text{с}^{-1}$	Повторы опыта	Относительное отклонение, %	Абсолютное отклонение, м
1	10	1 см. рис. 5.6	12	0,0057
2	12	2 см. рис. 5.7	11	0,0106
3	15	3 см. рис. 5.8	12	0,03

Так же были проведены экспериментальные исследования по определению фактически потерянной снежной массы в зависимости от угла поворота фрезы. Исследования проводились на экспериментальной установке модели ФРС. Основные геометрические размеры фрезы питателя экспериментальной установки, представлены на рисунке 5.3.

В качестве снежной среды использовались прессованные древесные опилки [15]. План эксперимента заключался в следующем:

1. Формировалась призма из материала, моделирующего снег, высота призмы соответствовала ширине ленты фрезы (рисунок 5.4) 0,04 м. Объем призмы транспортируемого материала составил: $0,00146 \text{ м}^3$. Среднее значение массы загружаемого материала в увлажненном состоянии в межлопастное пространство было равно 0,45 кг. Этот объем соответствовал бы положению фрезы при угле поворота 360° , скорости перемещения ФРС, 1,4 м/с и угловой скорости вращения фрезы 6 рад/сек, т.е. данные параметры аналогичны параметрам работающей фрезы питателя ФРС при достижении ею загрузочного окна.

2. Далее осуществлялся поворот фрезы на угол 30° (рисунок 5.5 а, 5.5 б, 5.5 в). Осуществлялся сбор материала не попавший в межлопастное пространство ленты фрезы, затем взвешивался на электронных весах, измерительная погрешность 1 г.

3. Затем п.2 повторялся для углов 60° и 90° (рисунок 5.5 в).

Аналогично проводился эксперимент для фрезы с переменной шириной ленты фрезы (рисунок 5.6).

Результаты сбора и взвешивания материала представлены в таблице 5.3.

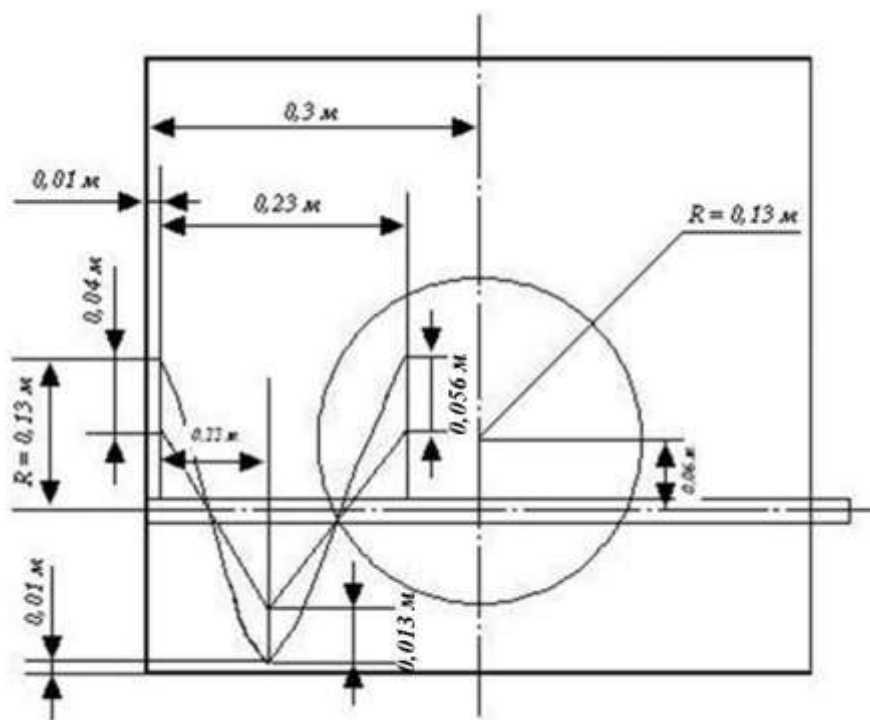


Рисунок 5.3 – Геометрические размеры фрезы питателя ФРС экспериментальной установки



Рисунок 5.4 – Экспериментальная установка по определению фактически потерянной снежной массы при различных углах поворота фрезы (вид сверху)



а)

б)

в)

Рисунок 5.5 – Экспериментальная установка по определению фактически потерянной снежной массы при различных углах поворота фрезы



Рисунок 5.6 – Экспериментальная установка по определению фактически потерянной снежной массы в зависимости от угла поворота фрезы с переменной шириной (вид сверху)

Таблица 5.3. – Массы потерянного материала при различных углах поворота фрезы

№ эксперимента	Угол поворота фрезы, град	Масса собранного материала	
		Постоянная лента фрезы	Переменная лента фрезы
1	30	0,04	-
	60	0,08	-
	90	0,11	-
2	30	0,043	-
	60	0,082	-
	90	0,115	-
3	30	0,044	-
	60	0,083	-
	90	0,12	-

По результатам полученных экспериментальных исследований построен график зависимостей количества снежной массы, dm , не попадающей в область загрузочного окна при разгрузке ленты фрезы, которой она была вырезана из массива при различных углах поворота фрезы (рисунок 5.7), полученные результаты были аппроксимированы уравнением регрессии:

$$dm = 1,3326 \varphi, \quad (5.5)$$

при этом коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$.

Полученные параметры потерянной транспортируемой снежной массы, хорошо коррелируются с теоретическими результатами, исключаящими потерю снежной массы. Максимальная абсолютная погрешность составила $\delta = 0,02$ гр, при среднем значении массы, равной 450 гр., загружаемого в межлопастное пространство материала

При проведении экспериментальных исследований фрезы с переменной шириной потери снежной массы не наблюдались. Ожидаемый прирост производительности работы питателя составляет 6 %.

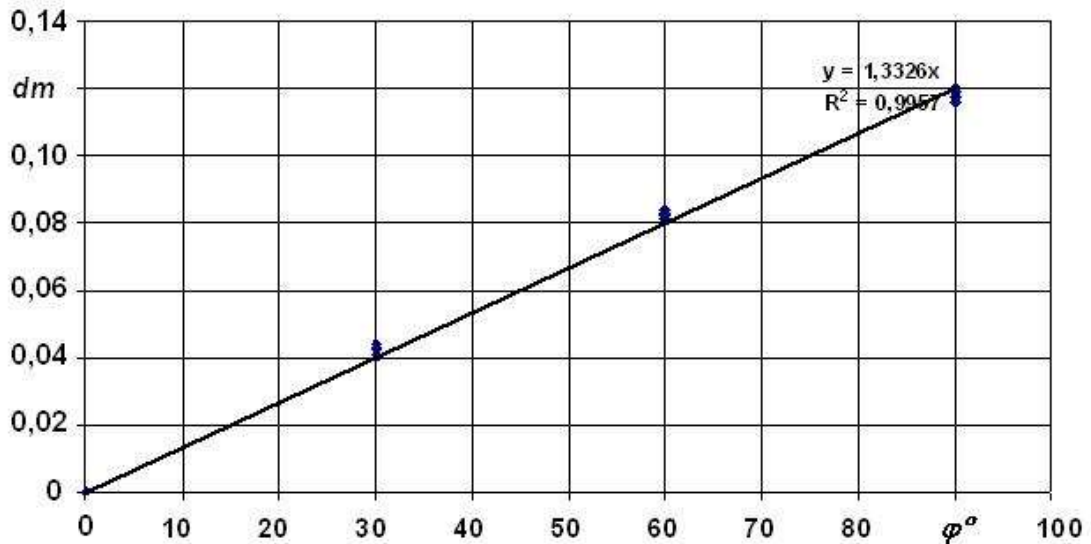


Рисунок 5.7 – График зависимостей потерь снежной массы от угла поворота фрезы

5.3 Анализ результатов экспериментального исследования фрезерно-роторного снегоочистителя

Проверка адекватности математической модели работы питателя ФРС основывается на сравнении результатов теоретических исследований математической модели работы питателя ФРС и результатов исследований ее физической модели для подтверждения возможности дальнейшей реализации результатов теоретических исследований и выводов, полученных на их основе. В качестве оценки адекватности математической модели работы питателя ФРС были выбраны изменения координат положения снежной частицы и скорости ее перемещения в питателе ФРС.

На рисунках 5.8, 5.9, 5.10 представлены траектории движения частицы, полученные в результате проведенного физического эксперимента и в результате имитационного моделирования работы питателя ФРС при тех же начальных условиях и исходных данных, соответственно. На рисунке 5.11 представлены

изменения проекций на оси OX и OZ вектора скорости движения частицы в питателе ФРС.

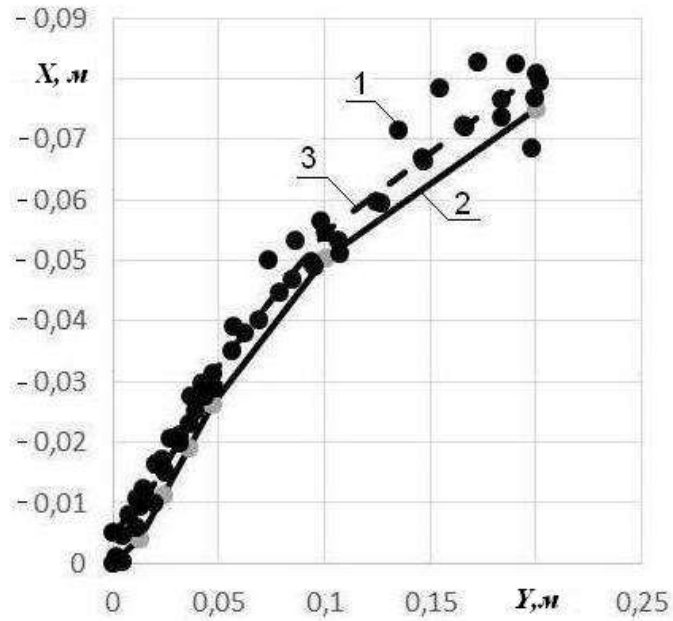


Рисунок 5.8 – Траектория движения частицы в питателе ФРС при угловой скорости вращения фрезы 8 с^{-1} , $R = 0,2$:
1 – результаты эксперимента; 2 – теоретические результаты;
3 – уравнение регрессии

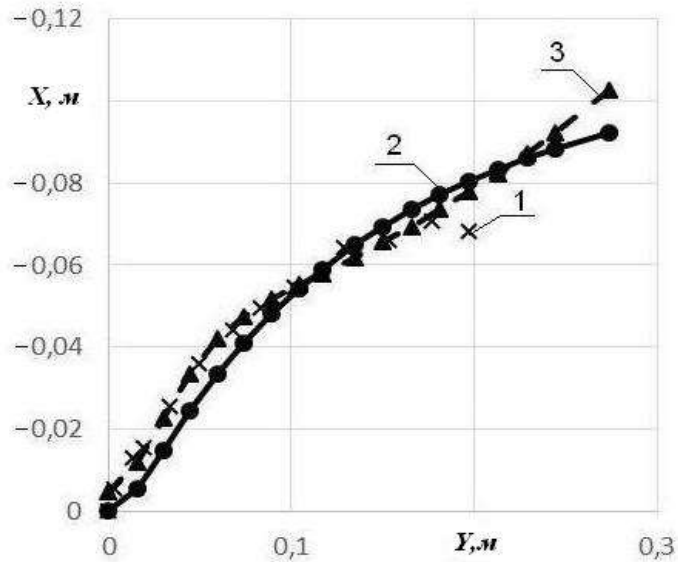


Рисунок 5.9 – Траектория движения частицы в питателе ФРС при угловой скорости вращения фрезы 10 с^{-1} , $R = 0,2$:
1 – результаты эксперимента; 2 – теоретические результаты;
3 – уравнение регрессии

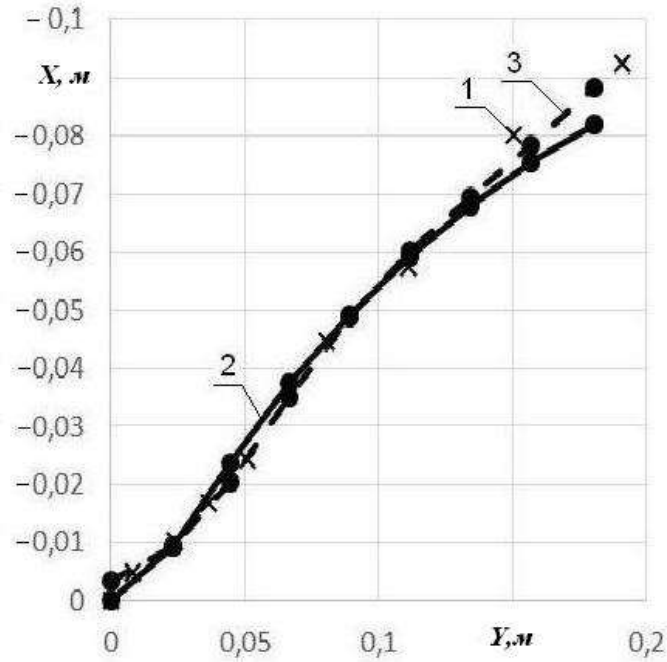


Рисунок 5.10 – Траектория движения частицы в питателе ФРС при угловой скорости вращения фрезы 15 с^{-1} , $R = 0,2$:
 1 – результаты эксперимента; 2 – теоретические результаты;
 3 – уравнение регрессии

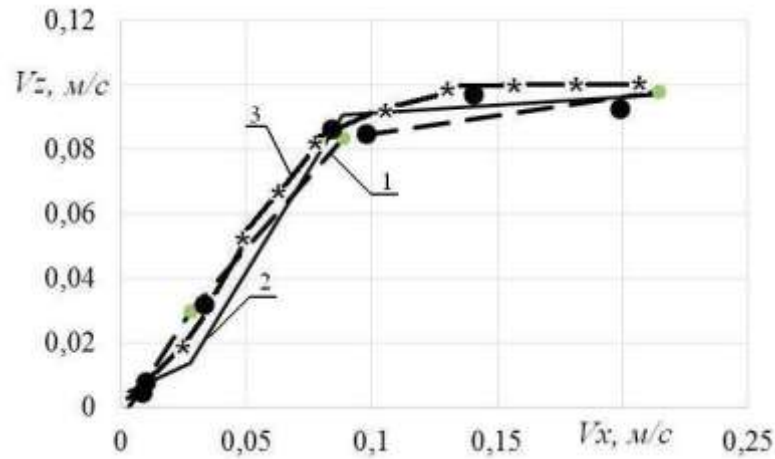


Рисунок 5.11 – Изменение проекций вектора скорости частицы в питателе ФРС при угловой скорости вращения фрезы 8 с^{-1} , $R = 0,2$:
 1 – результаты эксперимента; 2 – теоретические результаты;
 3 – уравнение регрессии

В результате аппроксимации экспериментальных данных были получены аппроксимирующие уравнения положения частицы на питателе для угловой скорости вращения фрезы питателя 8 с^{-1} :

$$x = \frac{e^{-5,14+59,49 \cdot y}}{1 + e^{-1,89+55,81 \cdot y}}; \quad (5.6)$$

где x – положение частицы по глубине питателя, y – положение частицы по ширине питателя;

для угловой скорости вращения фрезы питателя ФРС, 10 с^{-1} :

$$x = \frac{e^{-5,18+71,48 \cdot y}}{1 + e^{-1,91+67,85 \cdot y}}; \quad (5.7)$$

для угловой скорости вращения фрезы питателя ФРС, 15 с^{-1} :

$$x = \frac{e^{-5,57+50,39 \cdot y}}{1 + e^{-2,29+45,59 \cdot y}}. \quad (5.8)$$

Уравнение регрессии изменения проекций вектора скорости частицы в питателе ФРС для угловой скорости вращения фрезы питателя 8 с^{-1} :

$$v_z = b_0 + b_1 \cdot v_x^2 + b_2 \cdot v_x = -0,0045 - 4,095 \cdot v_x^2 + 1,355 \cdot v_x; \quad (5.9)$$

где v_x – проекция вектора скорости частицы на ось OX , v_z – проекция вектора скорости частицы на ось OZ ;

Значение коэффициента множественной регрессии составило: $R^2 = 0,98$.

Максимальное абсолютное отклонение между теоретически определенными координатами положения частицы в питателе и экспериментально определенными составило $0,03 \text{ м}$. Максимальное абсолютное отклонение между теоретическим проекциями вектора скорости и полученными экспериментально составило для проекции вектора скорости $0,17 \text{ м/с}$. Максимальные относительные отклонения траектории движения частицы и проекций вектора ее скорости в эксперименте, и траектории движения, и проекции вектора скорости полученных в результате решения математической модели работы питателя ФРС, соответственно, составили $11,8\%$ и $11,6\%$.

Полученные значения максимальных относительных погрешностей положения снежной частицы и ее проекций ее вектора скорости в питателе ФРС не превышают величины допустимой относительной погрешности равной 12% . Достигнутая степень адекватности математической модели рабочего процесса питателя ФРС является приемлемой для решения поставленных в работе задач. Основные причины расхождения результатов теоретических и экспериментальных исследований могут быть обусловлены принятыми при

составлении математической модели работы питателя ФРС допущениями об отсутствии перекачивания снежных частиц и их сферической форме, а также погрешностями при видео регистрации движущейся частицы в питателе ФРС и последующей обработкой полученных изображений движения частицы.

5.4. Рекомендации по технической (инженерной) реализации

Базируясь на результатах проведенного анализа патентных и научно-технических источников, посвященных интенсификации работы питателя ФРС, проведенных теоретических и экспериментальных исследований работы питателя ФРС было разработано техническое решение фрезы питателя ФРС, на которое получен охранный документ (Приложение Г). Данное техническое решение предложено впервые.

Полезная модель относится к снегоуборочной технике, а именно к ФРС, и предназначена для увеличения пропускной способности фрезы питателя ФРС.

Известно устройство, патент на изобретение № 2068044 РФ, в котором конструктивное исполнение фрезы питателя в области загрузочного окна представляет собой соединение встречных заходов фрез, что позволит увеличить загружаемое количество снега в метательный аппарат, за один оборот фрезы.

Однако известное устройство обладает следующими недостатками: не учитывается то, что объем вырезаемой снежной массы увеличивается от края фрезы к загрузочному окну метательного аппарата, возможен только торцевой привод фрезы.

Из известных технических решений по повышению эффективности работы фрезы питателя ФРС наиболее близким по своей технической сущности к заявляемому объекту является патент на полезную модель № 5599, в котором предлагается к барабанной фрезе установить две лопатки под углом 180° в области загрузочного окна.

Недостатками данного устройства являются введение дополнительных элементов в конструкцию фрезы питателя ФРС, что приводит к усложнению ее конструкции.

Задачей полезной модели является минимизация потерь снежной массы при ее перемещении от края фрезы к загрузочному окну и в процессе ее загрузки в метательный аппарат.

При этом достигаются следующие технические результаты: минимизируются потери снежной массы в процессе ее транспортирования в питателе ФРС; увеличивается коэффициент заполнения ротора метательного аппарата снежной массой, и как следствие, возрастает количество транспортируемого снега в единицу времени.

Указанный технический результат достигается тем что, фреза содержит ленту фрезы питателя, отличается тем что, с целью повышения пропускной способности фрезы, ширина ленты фрезы питателя выполнена переменной, возрастающей от края фрезы к загрузочному окну, пропорционально объему снежной массы, образующейся в процессе транспортирования вырезанной снежной массы фрезой питателя.

Полезная модель поясняется прилагаемой фигурой, на которой показана конструкция устройства.

На рисунке 5.12 изображены: 1 – вал, 2 – лента фрезы питателя, 3 – спицы.

Принцип работы устройства заключается в следующем: у наружного края фрезы вырезается определенный объем снежной массы, по мере вращения фрезы, посредством вала 1 и ленты 2, вырезанный объем снега транспортируется к питателю, при этом к этому объему добавляются дополнительные объемы снежной массы, вырезанные последующими витками, таким образом, к концу ленты фрезы питателя 2 объем снежной массы увеличивается, т.к. ширина ленты фрезы питателя также возрастает то, следовательно, к загрузочному окну доставляется большее количество снежной массы.

Таким образом, принципиальным отличием предлагаемого устройства является переменная ширина ленты фрезы питателя [119], при этом происходит снижение потерь снега при его транспортировании.

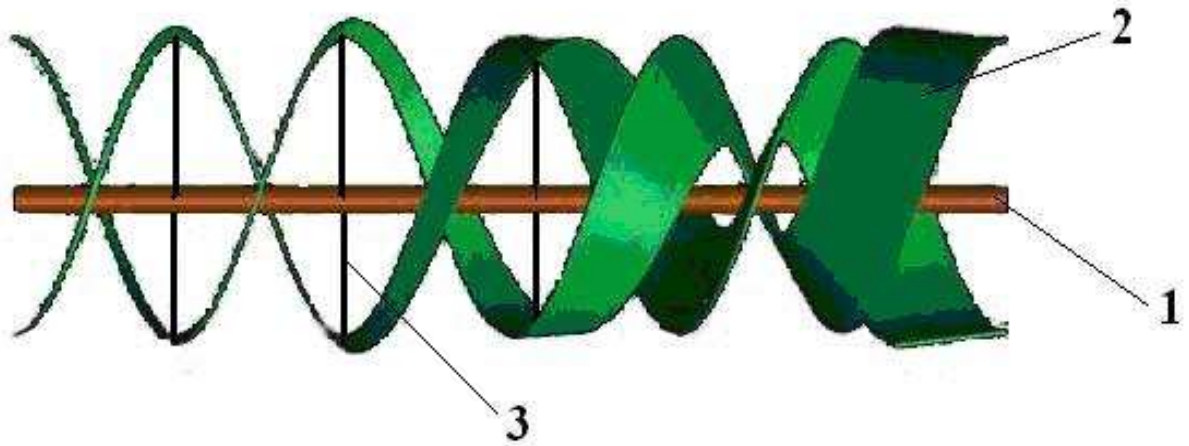


Рисунок. 5.12 – Конструкция фрезы, где 1 – вал; 2 – лента фрезы питателя; 3 – спицы.

Основные выводы по главе

1. Экспериментальные исследования проводились на физической модели питателя ФРС, в результате были получены экспериментальные траектории движения частицы в питателе, определены их уравнения регрессии. Экспериментально были определены потери транспортируемой массы фрезой питателя ФРС с постоянной шириной ленты фрезы и с переменной шириной ленты.

2. Сравнение экспериментальных траекторий с теоретическими в результате имитационного моделирования на ЭВМ показали удовлетворительную сходимость. Относительная погрешность не превышает 12 % во всех случаях. Можно считать, что разработанная математическая модель адекватна. В результате проведенных экспериментальных исследований по работе фрезы питателя с постоянной шириной ленты потери снежной массы составили 6% от общей транспортируемой массы. При экспериментальных исследованиях работы фрезы с переменной шириной ленты потерь не наблюдалось.

3. Предложенные инженерные решения позволяют обеспечить выбор технологических параметров питателя для всех классов ФРС; снизить динамические воздействия на ленту фрезы, а также повысить эффективность работы питателя ФРС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Усовершенствованная математическая модель динамической системы «фрезерно-роторный снегоочиститель – питатель – снежный массив», на основе которой была создана система моделирования рабочего процесса питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, включающая в себя набор алгоритмов и программы для электронно-вычислительной машины, что позволило произвести имитационное моделирование процесса транспортирования снежной массы в питателе фрезерно-роторного снегоочистителя и исследовать динамические процессы, возникающие в процессе взаимодействия снежной массы с лентой фрезы питателя. Подтверждена адекватность математической модели, расхождение результатов экспериментальных и теоретических траекторий движения частицы и проекций вектора ее скорости соответственно составили 11,8% и 11,6%.

2. Сформулирован критерий эффективности работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя – удельная мощность процесса транспортирования снежной массы фрезой питателя.

3. Установлены функциональные зависимости удельной мощности от ширины ленты фрезы, угловой скорости вращения фрезы, от начального угла разгрузки и массы снежной частицы. Увеличение угловой скорости вращения фрезы на 30% приводит к 50% росту удельной мощности. Увеличение ширины ленты фрезы на 20% от начальной 0,04 м, при угловой скорости вращения менее 10 с^{-1} , обуславливает увеличение удельной мощности на 9%, однако при ширине ленты фрезы более 0,1 м наблюдается снижение удельной мощности на 1%, а при угловой скорости вращения фрезы более 10 с^{-1} – на 3%. Увеличение начального угла разгрузки на 10° от вертикальной оси, приводит к 13% снижению величины удельной мощности. Составлены уравнения регрессии изменения длины рабочего участка ленты фрезы при ее различных радиусах. Полученные функциональные зависимости представлены в графическом виде и в виде уравнений регрессии и позволяют определить основные параметры питателя фрезерно-роторного

снегоочистителя. Величина коэффициента детерминации составила не менее $R^2 = 0,98$.

4. Разработанная методика определения параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя позволила выполнять модернизацию конструкции питателя путем изменения его радиуса, угловой скорости вращения и ширины ленты фрезы, которая может использоваться в производственных организациях и учебном процессе. Предложено перспективное решение фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя с переменной шириной ленты, новизна которого подтверждена патентом на полезную модель Российской Федерации. Использование данного решения позволило повысить эффективность работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя. Теоретически ожидаемое уменьшение значения величины удельной мощности для фрезерно-роторного снегоочистителя с питателем с переменной шириной ленты фрезы по сравнению с фрезерно-роторным снегоочистителем с питателем с постоянной шириной ленты фрезы составит 12%. Прогнозируемый экономический эффект от внедрения составил 16000 руб. в год на одну машину.

Направлениями и перспективами дальнейшей разработки темы являются исследования, направленные на оптимизацию параметров метательного аппарата фрезерно-роторного снегоочистителя.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

R – радиус фрезы;

V – поступательная скорость снегоочистителя;

ω – угловая скорость вращения фрезы;

h – высота снежного покрова;

R_z – радиус загрузочного окна;

θ – угол захода ленты фрезы;

c – смещение центра загрузочного окна к оси вращения фрезы;

δ_0 – угол между точкой отвала и горизонтальной плоскостью;

t – время;

n – число заходов фрезы;

W_c – объем сегмента;

b – ширина ленты фрезы;

W_n – объем призмы;

φ – угол поворота фрезы;

$N_{уд}$ – удельная мощность снегоочистителя;

N – мощность снегоочистителя;

Π – количество снежной массы, транспортируемый питателем за один оборот фрезы;

N_ϕ – сила нормальной реакции поверхности ленты фрезы;

α_ϕ – угол между нормальной реакцией поверхности ленты фрезы и горизонтальной осью OX;

α – угол между силой нормальной реакции поверхности отвала и горизонтальной осью OX;

N_ψ – сила нормальной реакции поверхности отвала;

ψ – угол между силой трения частицы о поверхность отвала и вертикальной осью OZ;

γ – угол между силой нормальной реакции поверхности отвала и вертикальной осью OZ;

ρ – плотность снежного покрова;

$b_{ш}$ – ширина стружки;

$f_{вн}$ – коэффициент внутреннего трения снега;

$\psi_{фр}$ – коэффициент, характеризующий проскальзывание снега;

θ – угол подъема винтовой линии, проходящей через центр тяжести слоя снега;

$f_{вн}$ – угол внешнего трения;

B – ширина фрезы;

T – шаг ленты фрезы;

r – радиус частицы;

m – масса частицы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ФРС – фрезерно-роторный снегоочиститель

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулаева, О. В. Выбор и обоснование основных параметров механизмов передвижения мостовых кранов : специальность 05.05.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О. В. Абдулаева ; науч. рук. Н. С. Галдин ; СибАДИ. – Омск : СибАДИ, 2015. – 190 с. – Текст : непосредственный.
2. Автомобили СССР. Грузовые автомобили с бортовой платформой : номенклатурный справочник / НИИавтопром. – Москва : НИИавтопром, 1971. – 151 с.. – Текст : непосредственный.
3. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с. – Текст : непосредственный.
4. Алексеева, Т. В. Гидравлические машины и гидропривод мобильных машин : учебное пособие / Т. В. Алексеева, Н. С. Галдин, Э. Б. Шерман. – Новосибирск : Изд-во Новосибирского ун-та, 1994. – 212 с. – Текст : непосредственный.
5. Алексеева, Т. В. Оценка и повышение точности землеройно-транспортных машин : учебное пособие / Т. В. Алексеева, В. С Щербаков. – Омск : СибАДИ, 1981. – 99 с. – Текст : непосредственный.
6. Аленицын, А. Г. Краткий физико-математический справочник / А. Г. Аленицын, Е. И. Бутиков, А. С. Кондратьев. – Москва : Наука, 1990. – 368 с. – Текст : непосредственный.
7. Алешков, Д. С. Влияние кинематических характеристик питателя и базовой машины фрезерно-роторного снегоочистителя на процесс отделения стружки / Д. С. Алешков, Н. Ю. Урсова (Аюпова Н.Ю.) – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2012. – Вып. 5(27). – С. 7–10.
8. Алешков, Д. С. Влияние основных параметров фрезерно-роторного снегоочистителя на вырезаемый объем снежной стружки / Д. С. Алешков, Н. Ю. Урсова (Аюпова Н.Ю.). – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2013. – № 5(33). – С. 10-14.

9. Алешков, Д. С. Математическое описание работы фрезы питателя / Д. С. Алешков, Н. Ю. Урусова (Аюпова Н.Ю.) – Текст : непосредственный // Инновации и исследования в транспортном комплексе : материалы первой Международной. научно-практической конференции, Курган, 23-24 мая 2013 г. / УрГУПС, КИЖТ. – Курган, 2013. – С. 6-9.

10. Алешков, Д. С. Нелинейная множественная регрессия показателей рабочего процесса фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова. – Текст : электронный // Техника и технологии строительства : электронный журнал. – 2015. – № 3(3). – С. 6-10. – URL: https://sibadi.org/upload/PIO/ttc/TiTS_3_3_2015.pdf (дата обращения 15.06.2019).

11. Алешков, Д. С. Обоснование ширины ленты фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2017. – № 2(54). – С. 7-11.

12. Алешков, Д. С. Определение плотности снега / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова. – Текст : электронный // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки : материалы Международной научно-практической конференции / СО АВН, СибАДИ. – Омск, 2014. - Кн. 1. – С. 90-92. – URL: <http://bek.sibadi.org/fulltex/EPD992pdf>. (дата обращения: 14.05.2019).

13. Алешков, Д. С. Повышение эффективности фрезерно-роторного снегоочистителя путем совершенствования его конструкции : специальность : 05.05.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. С. Алешков ; науч. рук. В. С. Щербаков; СибАДИ. – Омск : СибАДИ, 2001. – 204 с. – Текст : непосредственный.

14. Алешков, Д. С. Тенденции развития снегоочистителей отбрасывающего действия / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова. – Текст : непосредственный // Прогрессивные технологии и процессы : сборник научных статей Международной молодежной научно-практической конференции, Курск, 25-26 сентября 2014 г.: в 2-х т. – Курск, 2014. – Т. 1. – С. 34-37.

15.Алешков, Д. С. Экспериментальные исследования физической модели питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова. – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2016. – № 5(51). – С. 49-54.

16. Алешков Д.С. Модель формирования снежных валов при работе фрезерно-роторного снегоочистителя / Алешков Д.С., Суковин М.В. – Текст : непосредственный // Вестник евразийской науки. 2018. Т. 10. № 6. С. 58

17.Алешков Д.С. Экспериментальные исследования работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя с переменной шириной ленты фрезы [Электронный ресурс] / Д. С. Алешков, Н. Ю. Аюпова. - Текст : электронный // СибАДИ. Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : сборник материалов IV-й Международной научно-практической конференции, Омск 28-29 ноября 2019 года / СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2019. - С. 4-8. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42386825_68624093.pdf (дата обращения 04.09.2020).

18.Амосов, А. А. Вычислительные методы для инженеров : учебное пособие / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. – Москва : Высшая школа, 1994. – 544 с. – Текст : непосредственный.

19.Аристархов, Г. Н. Расчет мощности фрезерных машин, предназначенных для укрепления вяжущими материалами / Г. Н. Аристархов. – Текст : непосредственный // Строительное и дорожное машиностроение. – 1956. – № 2. – С. 5.

20.Аюпова, Н. Ю. Определение критерия эффективности работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Н. Ю. Аюпова. – Текст : непосредственный // Инновации и исследования в транспортном комплексе : III Международная научно-практическая конференция в год 70-летия Победы в Великой Отечественной войне, Курган, 4-5 июня 2015 г. : в двух частях. Ч. I / РАТ [и др.]. – Курган, 2015. – С. 32-35.

21.Баловнев, В. И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – 2-е изд. – Москва : Машиностроение, 1994. – 432 с. – Текст : непосредственный.

22.Баловнев, В. И. Определение мощности двигателя для привода ротора автодорожных снегоочистителей / В. И. Баловнев. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1961. – № 5. – С. 15.

23.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.

24.Баловнев, В. И. Оценка технико-экономической эффективности дорожно-строительных машин на этапе проектирования / В. И. Баловнев, А. Б. Ермилов. – Москва : МАДИ, 1984. – 102 с. – Текст : непосредственный.

25.Баловнев, В. И. Расчет некоторых геометрических параметров ротора автодорожных снегоочистителей / В. И. Баловнев. – Москва : Автотрансиздат, 1958. – 20 с. – Текст : непосредственный.

26.Баранов, А. А. Выбор поверхности дефлектора / А. А. Баранов. – Текст : непосредственный // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1998. – № 1. – С. 32.

27.Бардачидзе, И. А. Выбор рациональных параметров малогабаритного фрезерно-роторного снегоочистителя с бортовым поворотом : специальность 05.05.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. А. Бардачидзе ; Моск. автомоб. дор. ин-т. – Москва : МАДИ, 1987. – 223 с. – Текст : непосредственный.

28.Беляев, В. В. Повышение точности планировочных работ автогрейдерами с дополнительными опорными элементами рабочего органа : специальность 05.05.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Омск : СибАДИ, 1987. – 266 с. – Текст : непосредственный.

29. Бермант, А. Ф. Краткий курс математического анализа : учебное пособие / А. Ф. Бермант, И. Г. Араманович. – 15-е изд., стереотипное. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 736 с. – Текст : непосредственный.

30. Борзенкова А.В. Изменения толщины снежного покрова и суточной интенсивности снегопадов, влияющие на расходы по уборке магистралей в российских городах / Борзенкова А.В., Шмакин А.Б. – Текст : непосредственный // Лед и снег. 2012. №2 (118). С. 59-70.

31. Борьба со снегом и гололедом на транспорте / Под ред. А. П. Васильева. – Москва : Транспорт, 1986. – 216 с. – Текст : непосредственный.

32. Брауде, В. И. Системные методы расчета грузоподъемных машин / В. И. Брауде. – Ленинград : Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1985. – 181 с. – Текст : непосредственный.

33. Бялобжеский, Г. В. Зимнее содержание автомобильных дорог / Г. В. Бялобжеский. – Текст : непосредственный // Автомобильные дороги. – 1974. – № 11. – С. 21.

34. Бялобжеский, Г. В. Очистка автомобильных дорог от снега / Г. В. Бялобжеский, А. Н. Иванов, Д. А. Шалман. – Москва : Транспорт, 1972. – 105 с. – Текст : непосредственный.

35. Бутенин, Н. В. Введение в аналитическую механику / Н. В. Бутенин. – Москва : Наука, 1971. – 264 с. – Текст : непосредственный.

36. Вейнберг, В. Н. Снег, иней, град, лед и ледники / В. Н. Вейнберг. – Изд. 2-е. – Москва ; Ленинград : ОНТИ, 1936. – 232 с. – Текст : непосредственный.

37. Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах. Построение структурных схем при решении задач на АВМ : методические указания / СибАДИ ; сост. В. С. Щербаков. - Омск : СибАДИ, 1977. – 16 с. – Текст : непосредственный.

38. Гласко, Н. С. Классификация и оценка конструктивного совершенства роторно-лопастных метателей грунта / Н. С. Гласко, Н. И. Деревянчук – Текст : непосредственный // Труды МАДИ. – Москва, 1967. – Вып. 137. – С. 208.

39. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – Изд. 6-е, стереотипное. – Москва : Высшая школа, 1998. – 479 с. – Текст : непосредственный.

40. Гопин, О. Б. Качество работ дает фреза / О. Б. Гопин. – Текст : непосредственный // Строительная техника и технологии. – 2001. – № 3 (май-июнь). – С. 34-37.

41. ГОСТ Р 50597-2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля : национальный стандарт РФ : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 сентября 2017 г. N 1245-ст) : дата введения 2018-06-01 / разработан ФАУ "РОСДОРНИИ ; внесен Техническими комитетами по стандартизации ТК 278 "Безопасность дорожного движения" и ТК 418 "Дорожное хозяйство" – Текст : электронный // ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет / АО «Кодекс». – Версия: 6.4.2.40 (x64).

42. ГОСТ 19.701-90. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 26.12.90 N 3294 : дата введения 1992-01-01 / разработан и внесен Государственным комитетом СССР по вычислительной технике и информатике. – Москва : Изд-во стандартов, 1992. – 22 с. – Текст : непосредственный.

43. ГОСТ 15840-70. Снегоочистители. Термины и понятия : государственный стандарт Союза ССР : утвержден Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР 16 декабря 1969 г. (протокол N 210) : введен в действие Постановлением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР от 6 апреля 1970 г. N 449 : дата введения 1971-01-01 / разработан ВНИИЗЕММАШ. – Текст : электронный – // ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет / АО «Кодекс». – Версия: 6.4.2.40 (x64).

44.Гофф, А. Г. Борьба со снежными лавинами / А. Г. Гофф, Г. Ф. Оттен. – Текст : непосредственный // Снег и снежные обвалы в Хибинах. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1938. – Вып. № 1 . – С. 71-98.

45.Гришин, В. К. Математическая обработка и интерпретация физического эксперимента / В. К. Гришин, Ф. А. Живописцев, В. А. Иванов. – Москва : Изд-во Московского университета, 1988. – 318 с. – Текст : непосредственный.

46.Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – Москва : Мир, 1989. – 510 с. – Текст : непосредственный.

47.Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2013 год / Росгидромет. – Москва : Росгидромет, 2014. – 109 с. – Текст : непосредственный.

48.Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год / Росгидромет. – Москва : Росгидромет, 2019. – 79 с. – Текст : непосредственный.

49.Дорожные машины. Основы теории и расчета : учебное пособие для вузов / А. И. Анохин, Е. Р. Петерс, И. М. Эвентов, Н. Я. Хархута ; под ред. А. И. Анохина. – Москва : Дориздат, 1950. – 372 с. – Текст : непосредственный.

50.Дорожно-строительные машины и комплексы / В. И. Баловнев, А. Б. Ермилов, А. Н. Новиков [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1988. – 384 с.– Текст : непосредственный.

51.Дорожно-строительные машины и комплексы : учебник для вузов / В. И. Баловнев, Г. В. Кустарев, Е. С. Локшин [и др.] ; МАДИ(ТУ), СибАДИ. – 2-е изд., доп. и перераб. - Москва ; Омск : СибАДИ, 2001. – 526 с. – Текст : непосредственный.

52.Дорожные машины : учебник для втузов : в 2-х частях. Ч. 2. Машины для устройства дорожных покрытий / К. А. Артемьев, Т. В. Алексеева, В. Г. Белокрылов [и др.] – Москва : Машиностроение, 1982. – 396 с. – Текст : непосредственный.

53. Дорожная техника : каталог-справочник / под общ. ред. Б. С. Марышева, Ю. Ф. Устинова. – Москва : Ассоциация «РАДАР», 2004. – Вып. 4. – 94 с. – Текст : непосредственный.

54. Дорожная техника 2003 : каталог-справочник. – Санкт-Петербург : ООО «Информационное агентство «Партнер», 2003. – 182 с. – Текст : непосредственный.

55. Дубков, В. В. Обоснование выбора типа катков для уплотнения асфальтобетонных смесей при пониженных температурах воздуха : специальность 05.05.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. В. Дубков ; науч. рук. В. Б. Пермяков ; СибАДИ. – Омск, 1999. – 150 с. – Текст : непосредственный.

56. Дюнин, А. К. Механика метелей / А. К. Дюнин. – Новосибирск : изд-во СибАН СССР, 1963. – 24 с. – Текст : непосредственный.

57. Ермилов, А. Б. Вероятностная оценка снежного фона эксплуатации снегоочистительных и снегоуборочных машин / А. Б. Ермилов, Л. Н. Абрамов. – Москва : МАДИ, 1986. – 30 с. – Текст : непосредственный.

58. Ермилов, А. Б. Расчет и проектирование машин для летнего содержания дорог / А. Б. Ермилов. – Москва : МАДИ, 1988. – 89 с. – Текст : непосредственный.

59. Ермилов, А. Б. Расчет и проектирование снегоочистителей : учебное пособие / А. Б. Ермилов. – Москва : МАДИ, 1989. – 107 с. – Текст : непосредственный.

60. Живейнов, Н. Н. Строительная механика и металлоконструкции строительных и дорожных машин / Н. Н. Живейнов, Г. Н. Карасев, Н. Ю. Цвей. – Москва : Машиностроение, 1988. – 280 с. – Текст : непосредственный.

61. Завадский, Ю. В. Статистическая обработка эксперимента в задачах автомобильного транспорта / Ю. В. Завадский. – Москва : МАДИ, 1982. – 136 с. – Текст : непосредственный.

62. Зайцев, Е. Ф. Анализ процесса отбрасывания материала лопастными метателями с горизонтальной осью вращения / Е. Ф. Зайцев, А. Н. Иванов //

Труды / ЛПИ им М. И. Калинина. – Москва : Машиностроение, 1967. – № 299. – С. 208. – Текст : непосредственный.

63. Закиров, М. Ф. Оптимизация рабочей скорости фрезерно-роторного снегоочистителя / М. Ф. Закиров. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2015. – № 10. – С. 55-57.

64. Зеленин, А. Н. Машины для земляных работ : учебное пособие для вузов / А. Н. Зеленин, В. И. Баловнев, И. П. Керов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 370 с. – Текст : непосредственный.

65. Зимнее содержание автомобильных дорог / Г. В. Бялобжеский, А. К. Дюнин, В. Н. Денисов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1966. – 224 с. – Текст : непосредственный.

66. Зуев, В. А. Исследование рабочих органов погрузчиков силоса / В. А. Зуев. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1969. – № 4. – С. 23.

67. Иванов, А. Н. Интенсификация рабочего процесса метательного аппарата роторных снегоочистителей / А. Н. Иванов, Л. А. Кузнецов, Ю. П. Поливанов. – Москва : ЦНИИТЭстроймаш, 1981. – Вып. 1. – 43 с. – Текст : непосредственный.

68. Иванов, А. Н. Снегоочистители отбрасывающего действия / А. Н. Иванов, В. А. Мишин. – Москва : Машиностроение, 1981. – 159 с. – Текст : непосредственный.

69. Иванов, А. Н. Создание новых отечественных дорожных снегоочистителей / А. Н. Иванов, Л. И. Лившиц, Л. А. Скворцов [и др.]. – Москва : НИИИнфстройдоркоммунмаш, 1965. – 102 с. – Текст : непосредственный.

70. Исследования рабочих органов землеройных машин непрерывного действия / З. Е. Гарбузов, Г. А. Мутушев, Г. Б. Нарет, Л. Н. Смирнов. – Москва : НИИИнфстройдоркоммунмаш, 1966. – Текст : непосредственный.

71. Кавалеров, А. А. Геометрические параметры лопастных метателей / А. А. Кавалеров – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1967. – № 1. – С. 18.

72.Кавалеров, А. А. Экспериментальное исследование работы метателя грунта с неподвижным кожухом – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1968. – № 2. – С. 16.

73.Казакова, Е. В. Ежедневная оценка локальных значений и объективный анализ характеристик снежного покрова в рамках системы численного прогноза погоды COSMO-Ru : специальность 25.00.30 : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Е. В. Казакова ; Гидрометеорол. науч.-исслед. центр РФ. – Москва, 2015. – 181 с. Текст : непосредственный.

74.Карабан, Г. Л. Снегоуборочные машины / Г. Л. Карабан, К. М Полтев. – Москва : изд-во Минкоммунхоза РСФСР, 1955. – 136 с. – Текст : непосредственный.

75.Карабан, Г. Л. Снегоуборочные машины / Г. Л. Карабан. – Москва : изд-во Минкоммунхоза РСФСР, 1962. – 122 с. – Текст : непосредственный.

76.Карабан, Г. Л. Машины для содержания и ремонта автомобильных дорог и аэродромов / Г. Л. Карабан, В. И. Баловнев, И. А Засов. – Москва : Машиностроение, 1975. – 367 с. – Текст : непосредственный.

77.Караваев, Б. И. Сравнительные испытания роторных метателей с подвижным, неподвижным кожухами / Б. И Караваев. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1973. – № 1. – С. 20.

78.Карташов, С. И. Физико-механические свойства и процессы формирования снежно-фирнового покрова Восточной Антарктиды / С. И. Карташов. – Москва : изд-во АН СССР, 1962. – 109 с. – Текст : непосредственный.

79.Касинов, Б. Н. Снегоочиститель ДЭ-210А / Б. Н. Касинов – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1984. – № 7. – С. 18.

80.Кишинский, М. И. Борьба со снежными заносами на автомобильных лесовозных дорогах / М. И. Кишинский. – Москва : Лесная промышленность, 1964. – 127 с. – Текст : непосредственный.

81.Классификация работ по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования : согласовано Министерством финансов Российской Федерации 29.01.2002 г. , Министерством экономического развития и торговли

Российской Федерации 12.11.2001 г. : утверждено распоряжением Государственной службы дорожного хозяйства Министерства транспорта Российской Федерации № ИС-5-р от 03.01.2002 г. / А. П. Васильев, Ю. М. Яковлев, М. Г. Горячев [и др.] ; РОСАВТОДОР. – Москва : МТРФ : Росавтодор, 2002. – 12 с. – Текст : непосредственный.

82.Княжев, Ю. М. Оптимальное управление энергетическими процессами землеройно-транспортных машин : учебное пособие / Ю. М. Княжев. – Омск : СибАДИ, 1997. – 156 с. – Текст : непосредственный.

83.Княжев, Ю. М. Теоретические основы методов управления оптимальными режимами рабочих процессов землеройно-транспортных машин : специальность 05.05.04 "Дорожные и строительные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ю. М. Княжев ; Сибирский автомобильно-дорожный институт. – Омск : СибАДИ, 1996. – 42 с. – Текст : непосредственный.

84. Козин, В. В. Физико-географические факторы пространственно-временной изменчивости снежного покрова нефтегазопромыслового региона : монография / В. В. Козин, Э. А. Кузнецова. – Нижневартовск : Изд-во Нижневартовского гос. ун-та, 2015. – 151с. – Текст : непосредственный.

85.Козлов, Д. В. Основы гидрофизики : учебное пособие / Д. В. Козлов. – Москва : изд-во МГУП, 2004. – 246 с. – Текст : непосредственный.

86.Колотилин, В. Е. Учет механических свойств снежного покрова при исследовании нагрузок в трансмиссиях машин с роторно-винтовым движителем / В. Е. Колотилин. – Текст : непосредственный // Исследования и испытания дорожных и строительных машин / НИСИ. – Новосибирск, 1977. – С. 96-103.

87.Коммунальная техника 2001: каталог-справочник. – Москва : Росбизнес, 2001. – 176 с. – Текст : непосредственный.

88.Кондратьев, А. С. Увеличение плотности снега под влиянием сжимающей нагрузки / А. С. Кондратьев, И. В. Крагельский, А. А. Шахов – Текст : непосредственный // Физико-механические свойства снега и их использование в

аэродромном и дорожном строительстве. – Москва : Ленинград : изд-во АН СССР. – 1945. – С. 5-9.

89.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.

90.Костевич, А. А. Исследование и совершенствование фрезерно-роторных снегоочистителей / А. А. Костевич, М. В. Мальцев, А. Г. Семенов. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2005. – № 39. – С. 193-200.

91.Кузнецов, В. Г. Повышение производительности оборудования за счет уменьшения налипания грунта / В. Г. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1996. – № 4. – С. 7.

92.Курганов, В. М. Логистика. Управление автомобильными перевозками: практический опыт / В. М. Курганов. – Москва : Книжный мир, 2007. – 448 с. – Текст : непосредственный.

93.Лазута, И. В. Система автоматизации проектирования устройства управления рабочим органом бульдозерного агрегата : специальность 05.13.12 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. В. Лазута. – Омск , 2010. – 149 с. – Текст : непосредственный.

94.Лившиц, Б. А. Машины и организация механизированной уборки городов / Б. А. Лившиц. – Москва : МАДИ, 1985. – 76 с. – Текст : непосредственный.

95.Лингейтис, Л. П. Роторные разбрасыватели чернозема / Л. П. Лингейтис. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности технологии и механизации строительного производства. – Вильнюс, 1985. – С. 60.

96.Лингейтис, Л. П. Расчет параметров роторных метателей распределителей грунта / Л. П. Лингейтис. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1988. – № 1. – С. 17.

97. Литвинов, А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А. С. Литвинов. – Москва : Машиностроение, 1971. – 416 с. – Текст : непосредственный.

98. Лобов, Н. А. Динамика грузоподъемных кранов / Н. А. Лобов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 160 с. – Текст : непосредственный.

99. Логистика: экономика, производство, транспорт, распределение, маркетинг / Национальная логическая ассоциация. – Текст : непосредственный // Тара и упаковка. – 2011. – № 8. – С. 12 – 13.

100. Любимов, А. М. Влияние воздушного потока на среднюю скорость движения зерна по решетку / А. М. Любимов. – Текст : непосредственный // Труды / Челябинский ин-т механизации и электрификации сельского хозяйства. – Челябинск, 1958. – Вып. VI. – С. 208.

101. Малис, А. Я. Машины для очистки зерна воздушным потоком / А. Я. Малис. – Москва : Машгиз, 1962. – 265 с. – Текст : непосредственный.

102. Марышев, Б. С. Машины для зимнего содержания автомобильных дорог / Б. С. Марышев. – Текст : непосредственный // Дорожная техника и технология. – 2001. – № 3-4. – С. 35.

103. Машины для городского хозяйства / Г. Л. Карабан, В. И. Баловнев, И. А. Засов, Б. А. Лившиц. – Москва : Машиностроение, 1988. – 272 с. – Текст : непосредственный.

104. Машины для содержания и ремонта городских и автомобильных дорог : учебное пособие / В. И. Баловнев, В. И. Мещеряков, М. А. Беляев [и др.]. – 2-е изд., дополн. и перераб. – Москва ; Омск : ОАО «Омский дом печати», 2005. – 768 с. – Текст : непосредственный.

105. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега : руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова. – Русское издание / Ш. Фирц, Р. Л. Армстронг, И. Дюран. – Москва : Институт географии РАН, Гляциологическая ассоциация, 2012. – 80 с. – Текст : непосредственный.

106. Меньшиков, Р. А. Определение мощности на привод питателя малогабаритного фрезерно-роторного снегоочистителя / Р. А. Меньшиков, М. Ф.

Закиров – Текст : непосредственный // Молодые ученые-ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 20-21 апреля 2016 г. / ответственные за выпуск А. П. Тюрин, В. В. Сяктерева. – Ижевск, 2016. – С. 85-89.

107. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – Москва : Наука, 1981. – 481 с. – Текст : непосредственный.

108. Мутушев, Г. А. Исследование двухроторных рабочих органов экскаваторов для рытья оросительных каналов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Г. А. Мутушев ; Ленингр. инж.-строит. ин-т. – Ленинград, 1966. – 22 с. – Текст : непосредственный.

109. Мхитарян, А. М. Аэродинамика / А. М. Мхитарян. – Москва : Машиностроение, 1976. – 448 с. – Текст : непосредственный.

110. Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – Москва : Наука, 1971. – 260 с. – Текст : непосредственный.

111. Никулин, П. И. Экспериментальные исследования тяговых качеств колесного движителя на снежной поверхности / П. И. Никулин, В. Н. Геращенко. – Текст : непосредственный // Исследование самоходных колесных землеройно-транспортных машин : сборник научных трудов. – Воронеж : Воронежский инж.-строит. ин-т, 1987. – 218 с.

112. Оболенский, В. Н. Климат Лесного по данным метеорологической обсерватории Ленинградского лесного института за 1890-1925 г. : монография / В. Н. Оболенский. – Ленинград : изв. Ленинградского лесного ин-та, 1929. – 218 с. – Текст : непосредственный.

113. Орехов, О. И. Выбор параметров ротора снегоочистителя для городских дорог : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О. И. Орехов. – Москва : Академия коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова, 1964. – Текст : непосредственный.

114. Орехов, О. И. Исследование метательного механизма роторных снегоочистителей / О. И. Орехов. – Текст : непосредственный // Механизация и автоматизация в коммунальном хозяйстве : сборник трудов / ОНТИ ЛКХ. – Москва, 1962. – Вып. XV. – 170 с.
115. Отдельные разделы гидропривода мобильных машин : учебное пособие / Т. В. Алексеева, Б. П. Воловиков, Н. С. Галдин, Э. Б. Шерман. – Омск : ОмПИ, 1989. – 69 с. – Текст : непосредственный.
116. Павлов, Н. И. Трение по снежным поверхностям / Н. И. Павлов. – Текст : непосредственный // Метеорология и гидрология. – 1940. – № 4. – С. 116.
117. Панов, В. И. Исследование зависимости трения скольжения по снежному покрову от различных факторов / В. И. Панов. – Текст : непосредственный // Снегоходные машины : сборник трудов / Горьковский политехнический ин-т им. А. А. Жданова. – Горький, 1967. – Т. XXIII, вып. 7. – С. 24.
118. Пановко, Я. Г. Механика деформируемого тела / Я. Г. Пановко. – Москва : Наука, 1985. – 287 с. – Текст : непосредственный.
119. Пат. 151371 РФ, МПК E01H 5/09. Фреза питателя фрезерно-роторного снегоочистителя : заявитель и патентообладатель СибАДИ. – № 2014137230/13 : заявл. 15.09.2014 : опубл. 10.04.2015 / Алешков Д. С., Аюпова Н. Ю. – 1 с. – Текст : непосредственный.
120. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – Москва : Высшая школа, 1989. – 367 с. – Текст : непосредственный.
121. 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.
122. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление : учебник для втузов : в 2-х т. – Т. 1. / Н. С. Пискунов. — Москва : Интеграл-Пресс, 2006. – 544 с. – Текст : непосредственный.

123. Подиновский, В. В. Оптимизация по последовательно применяемым критериям / В. В. Подиновский, В. М. Гаврилов. – Москва : Советское радио, 1975. – 192 с. – Текст : непосредственный.
124. Поливанов, Ю. П. Аэродромный шнекороторный снегоочиститель ДЭ-210Б / Ю. П. Поливанов – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1986. – № 11. – С. 19.
125. Поливанов, Ю. П. Направления развития аэродромных роторных снегоочистителей : обзорная информация / Ю. П. Поливанов, Ф. К. Клашанов, В. С. Симонов. – Москва : ЦНИИТЭстроймаш, 1987. – (Серия 2 «Дорожные машины». Вып.3.). – 54 с. – Текст : непосредственный.
126. Поливанов, Ю. П. Совершенствование конструкции рабочего органа шнекороторного снегоочистителя / Ю. П. Поливанов. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1984. – № 12. – С. 20.
127. Рабинович, С. С. Механические метатели непрерывного действия : обзор / С. С. Рабинович. – Москва : ЦНИИТМАШ, 1960. – 41 с. – Текст : непосредственный.
128. Ремонт и содержание автомобильных дорог : справочник инженера-дорожника / А. П. Васильев, В. И. Баловнев, М. Б. Корсунский [и др.] ; под. ред. А. П. Васильева. – Москва : Транспорт, 1989. – 287 с. – Текст : непосредственный.
129. Решетов, Д. Н. Надежность машин : учебное пособие / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. – Москва : Высшая школа, 1988. – 238 с. – Текст : непосредственный.
130. Седов, Л. И. Механика сплошной среды : в 2-х. т. / Л. И. Седов – 2-е изд., исправленное и дополненное. – Москва : Наука, 1973. – Т. 1. – 584 с. – Текст : непосредственный.
131. Смирнов, В. С. Теоретические и экспериментальные исследования по прицельному метанию грунта : сообщение 117 / В. С. Смирнов, Л. М. Грудин ; Минтрансстрой СССР, Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства. – Москва : [Б. и.], 1958. – 115 с. – Текст : непосредственный.

132. Снег : справочник / под ред. Д. М. Грея, Д. К. Мейла. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. – 751 с. – Текст : непосредственный.
133. Снегоочиститель фрезерный КО-207 : руководство по эксплуатации. – Северодвинск : ОАО «Севдормаш», 2000. – 39 с. – Текст : непосредственный.
134. Снегоочиститель шнекороторный КО-605-1М : руководство по эксплуатации. – Северодвинск : ОАО «Севдормаш», 2000. – 86 с. – Текст : непосредственный.
135. Снегоуборочная техника МТД из США и Канады : рекламные проспекты. – Москва : ООО «Контурс-СДМ», 2000. – 15 с. – Текст : непосредственный.
136. Соколов, А. М. Повышение эффективности эксплуатации снегоуборочной техники с учетом слоистости снежного покрова : специальность 05.05.04 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. М. Соколов. – Нижний Новгород, 2007. – 160 с. – Текст : непосредственный.
137. Солонов, Г. В. Анализ работы роторных снегоочистителей с продольной и поперечной осями вращения : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Г. В. Солонов. – Москва, 1951. – 18 с. – Текст : непосредственный.
138. Справочник конструктора дорожных машин / под ред. И. П. Бородачева. – Москва : Машиностроение, 1973. – 500 с. – Текст : непосредственный.
139. СП 131.13330.2018. Строительная климатология : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 28 ноября 2018 г. N 763/пр. : дата введения 2019-05-29 / Исполнители - НИИСФ РААСН, ФГБУ "ТГО. – Текст : электронный // ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет / АО «Кодекс». Версия: 6.4.2.40 (x64).
140. Стернин, Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах / Л. Е. Стерни. – Москва : Машиностроение, 1974. – 212 с. – Текст : непосредственный.

141. Строительная, дорожная и специальная техника отечественного производства : краткий справочник / А. А. Глазов, Н. А. Манаков, А. В. Панкратов. – Москва : ЗАО «Бизнес-арсенал», 2000. – 816 с. – Текст : непосредственный.

142. Тарасов, В. Н. Теоретическая механика / В. Н. Тарасов, И. В. Бояркина, М. В. Коваленко. – Москва : Изд-во ТрансЛит, 2010. – 560 с. – Текст : непосредственный.

143. Тихонов, А. А. Анализ технических характеристик фрезерно-роторных снегоочистителей / А. А. Тихонов. – Текст : непосредственный // News of Science and Education. – 2018. – Т. 1, № 4. – С. 003-005.

144. ТУ 3 – 869 – 97. Снегоочиститель фрезерно-роторный УМ-75. – Омск, 1998. – 48 с. – Текст : непосредственный.

145. Турбин, Б. Г. Сельскохозяйственные машины. Теория, конструкция и расчет / Б. Г. Турбин, А. Б. Лурье, С. М. Григорьев. – Москва ; Ленинград : Машгиз, 1963. – 575 с. – Текст : непосредственный.

146. Урусова, Н. Ю. (Аюпова Н.Ю.) К вопросу движения снежной стружки под действием винтовой лопасти питателя в зоне резания / Н. Ю. Урусова (Н.Ю. Аюпова); науч. рук. Д. С. Алешков – Текст : непосредственный // Научные труды молодых ученых, аспирантов и студентов : межвузовский сборник / СибАДИ. – Омск, 2012. – Вып. 9. – С. 273-276.

147. Урусова, Н. Ю. (Аюпова Н.Ю.) Кинематические особенности работы фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Н. Ю. Урусова (Н.Ю. Аюпова). – Текст : непосредственный // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России : материалы международной 66-й научно-технической конференции : в 2 кн. – Кн. 1 / СибАДИ. – Омск, 2012. – С. 403-406.

148. Феодосьев, В. И. Соппротивление материалов : учебник для вузов / В. И. Феодосьев. – 9-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1986. – 512 с. – Текст : непосредственный.

149. Шалман, Д. А. Исследование рабочих органов фрезерно-роторных снегоочистителей / Д. А. Шалман. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1961. – № 6. – С. 30-33.
150. Шалман, Д. А. Снегоочистители / Д. А. Шалман. – Ленинград : Машиностроение, 1973. – 216 с. – Текст : непосредственный.
151. Штайн, А. И. Оценка технического уровня снегоочистителей / А. И. Штайн, В. Э. Ронгонен. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 1990. – № 8. – С. 19.
152. Щербаков, В. С. Методы управления комплектом машин трубоукладочной колонны : монография / В. С. Щербаков, А. Н. Шабалин, М. С. Корытов. – Омск : СибАДИ, 2014. – 152 с. – Текст : непосредственный.
153. Эвентов, И. М. Снегоочистители / И. М. Эвентов. – Москва ; Ленинград : Машгиз, 1954. – 144 с. – Текст : непосредственный.
154. Эксплуатация специальных автомобилей для содержания и ремонта городских дорог / В. И. Баловнев, Г. Л. Карабан, И. А. Засов [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1992. – 263 с. – Текст : непосредственный.
155. 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.
156. Яншин, А. А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВМ : учебное пособие / А. А. Яншин. – Москва : Радио и связь, 1983. – 312 с. – Текст : непосредственный.
157. Aleshkov D. Aerodynamic characteristics of the milling and rotary snowblower feeder in the loading gate area / Aleshkov D., Sukovin M. – Текст : непосредственный // International review of mechanical engineering (IREME). 2017. Vol. 11, no. 9. P. 701–708.
158. Multi-scale modeling of snow microstructure / A. Carbone, B. M. Chiaia, B. Frigo, C. Turk. – Текст : непосредственный // Journal for Multiscale Computational Engineering. – 2013. – Vol. 11, no. 2. – P. 177–184.

159. Horrigan Timothy. Estimated Snow Parameters for Vehicle Mobility Modeling in Korea, Germany and Interior Alaska : special Report 95-23 (September, 1995) / Timothy Horrigan, Roy E. Bates. – Philadelphia, 1995. – 8 p. –URL: https://pdfs.semanticscholar.org/3950/d2399a53d166ff5befa917d35fe01a65eb62.pdf?_ga=2.145588340.1526573275.1575018416-1354705086.1571993829 (дата обращения 15.07.2019). – Текст : электронный.

160. The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7. 2 / V. Vionnet, S. Morin, A. Boone [et al]. – Текст : непосредственный // Geoscientific Model Development . – 2012. – No 5. – P. 773–791.

161. Yong N. Raymond. Snow mechanics: machine-snow interaction / N. Raymond Yong, Masa Fukue. – Текст : непосредственный // Snow removal and ice control research Transportation Research Board Special Report. – 1979. – Issue 185. – P 355.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

(справочное)

Технико-экономическая эффективность внедрения фрезы питателя ФРС
с переменной шириной ленты

Предлагается ввести в эксплуатацию ФРС в питателе которого используется фреза с переменной шириной ленты взамен фрезы с постоянной шириной ленты фрезы. Что позволяет минимизировать потери снежной массы транспортируемой фрезой в питателе к загрузочном окне метательного аппарата и соответственно увеличить производительность питателя и сократить время работы ФРС.

Необходимо оценить эффективность внедрения модернизированной фрезы питателя ФРС.

При заданных технологических параметрах ФРС (таблица 3.1), и плотности снега 160 кг/м³ (снег свежеснеженный), объемная производительность питателя с фрезой постоянной шириной ленты по формуле (3.18) представлена в таблице 2.

Учитывая, тот факт, что стоимость фрезы с переменной шириной ленты возросла за счет увеличения металлоемкости определим увеличение ее стоимости, при стоимости листовой стали 26 руб./кг. Результаты стоимости фрезы с постоянной шириной ленты и переменной шириной ленты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Стоимость фрез с различной шириной ленты

Фреза	<i>m</i> , кг	Стоимость, руб.
Фреза с постоянной шириной ленты	0,839	21,8
Фреза с переменной шириной ленты	1,702	44,3

Согласно ОДМ 218.5.001-2008, количество единиц роторной техники необходимой для ликвидации снежного заноса определяется по формуле (1):

$$N_p = \frac{W_{уб}}{П_э \cdot t_э}, \quad (1)$$

где $W_{уб}$ – количество снега, подлежащего уборке, м³; $П_э$ – эксплуатационная производительность снегоочистителя, м³/ч; $t_э$ – директивное время на уборку снежных отложений, ч.

При уборке площадки размером 30x30 м и толщине снежного покрова 0,02 м, объем снежной массы, которую необходимо удалить составит $W_{уб} = 18 \text{ м}^3$ [15, 30].

Используя формулу (1) определим директивное время, которое потребуется для очистки заданной территории одним ФРС. Директивное время необходимое для уборки заданного объема снега ФРС с фрезой питателя постоянной ширины и для ФРС с фрезой переменной ширины представлены в таблице 2.

Необходимо отметить, что годовые текущие издержки на эксплуатацию базового и модернизированного ФРС отличаются по затратам на энергоносители. По все остальным показателям они идентичны.

Общие затраты на уборку территории за директивное время, при стоимости одного Вт 4 руб. представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Общие затраты на уборку территории

	Стандартная фреза	Модернизированная фрезы
Производительность, м ³ /ч	6,4764	11,71638
Директивное время на уборку снежных отложений, ч	2,779322	1,536310703
Затраты мощности за директивное время, Вт	335073,7	198100,5777
Стоимость, руб	1340,295	792,402311

При этом экономия эксплуатации ФРС с переменной шириной ленты фрезы составит 547 руб. 89 коп.

Экономический эффект от эксплуатации ФРС с переменной шириной ленты фрезы за холодный период года в течение 30 маш. · час. составит 16436 руб. 70 коп.

Приложение Б
(справочное)

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель

генерального конструктора

АО «Омсктрансмаш»

к.т.н. *Д.В. Беляев* В.В. Беляев

« *15* » *Декабря* 2019 г.



Акт

внедрения инженерной методики определения основных конструктивных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя

В «Омсктрансмаш» внедрена методика определения основных конструктивных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, разработанная соискателем ФГБОУ ВО «СибАДИ» Аюповой Н.Ю.

Методика позволяет определить основные конструктивные и технологические параметры питателя фрезерно-роторного снегоочистителя с использованием ЭВМ.

Методика включает в себя обобщенную расчетную схему, математическую модель процесса транспортирования снежной массы фрезой питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, алгоритм оптимизации основных конструктивных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя на основе программного продукта для расчета геометрических, кинематических и силовых параметров работы фрезы при ее взаимодействии со снежной массой.

Применение методики позволяет снизить трудоемкость разработки фрезы питателя, обеспечивающей минимальные потери снежной массы при ее транспортировании в питателе и загрузке в метательный аппарат фрезерно-роторного снегоочистителя.

Главный конструктор по
разработке специальной и
гражданской продукции

Б.И. Еременко
Б.И. Еременко

Приложение В
(справочное)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение
высшего образования
«Сибирский автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «СибАДИ»

к.т.н., доцент  С.В. Мельник

«  » 2019 г.



АКТ

внедрения методики определения основных параметров питателя
фрезерно-роторного снегоочистителя в учебный процесс по направлению
23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы» и
по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»

Методика определения основных параметров питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, разработанная инженером ФГБОУ ВО «СибАДИ» Люповой Н.Ю., используется при курсовом и дипломном проектировании для подготовки бакалавров по направлению 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», а также по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» на факультете «Нефтегазовая и строительная техника» ФГБОУ ВО «СибАДИ».

Методика позволяет определить основные параметры питателя фрезерно-роторного снегоочистителя с использованием ЭВМ.

Разработанная методика универсальна и подходит для определения параметров питателя различных моделей фрезерно-роторных снегоочистителей.

Кандидат техн. наук, профессор,
зав. кафедрой «Техника для строительства
и сервиса нефтегазовых комплексов и
инфраструктур» ФГБОУ ВО «СибАДИ»



А.И. Демиденко

Приложение Г
(справочное)

