

На правах рукописи



АЮПОВА Наталья Юрьевна

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

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные и
подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание

ученой степени кандидата технических наук

Омск – 2020

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

Научный руководитель

АЛЕШКОВ Денис Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» (г. Омск)

Официальные оппоненты:

ЖЕЛУКЕВИЧ Рышард Борисович,

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет (СФУ)», профессор кафедры авиационных горючесмазочных материалов (г. Красноярск)

ТИТЕНКО Владимир Владимирович,

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет (ОмГТУ)», доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» (г. Омск)

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ)» (г. Хабаровск)

Защита состоится «03» февраля 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ВАК РФ Д 212.250.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет СибАДИ» по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 3124. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistratury-i-aspirantury/studies/dissertations/63436/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ФГБОУ ВО «СибАДИ». Тел. 8(3812) 65-03-23, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru.

Автореферат разослан «16» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор



Кузнецова
Виктория Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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 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.

При проведении снегоочистных работ задействуется множество разнообразной дорожно-уборочной 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, 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 энергоемкости 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 «Омсктрансаш».

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и основные задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы и основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены современные тенденции развития ФРС, представлена классификация по их основным признакам, произведен обзор предшествующих исследований по выбору параметров ФРС, по физико-механическим свойствам снега. Сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследования.

Во второй главе обоснован комплексный метод выполнения работы, включающий как теоретические, так и экспериментальные исследования ФРС. Определены основные этапы работы, приведена ее структура в виде блок-схемы, основанная на принципах системного подхода и содержащая основные этапы и связи между ними.

В третьей главе представлена разработанная математическая модель сложной динамической системы работы питателя ФРС состоящая из следующих подсистем: ФРС, снежный массив. С учетом принятых допущений: фреза вращается с постоянной угловой скоростью; снегоочиститель движется поступательно с постоянной скоростью; снежная частица имеет выпуклую поверхность без заострений и ребер; вращением снежной частицы пренебрегаем; снежная частица скользит по поверхности отвала питателя и поверхности ленты фрезы; удар отсутствует.

В общем виде фреза питателя совершает поступательное движение со скоростью движения снегоочистителя, V и относительное вращение вокруг своей оси с угловой скоростью, ω .

Для математического описания работы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя были разработаны пространственные расчетные схемы движения снежной частицы (рисунок 1, 2) и расчетная схема траектории движения точки фрезы питателя (рисунок 3). Были введены две системы координат: инерциальная и локальная. Инерциальная система координат связана с движением всей машины. Локальная система координат связана с фрезой питателя ФРС.

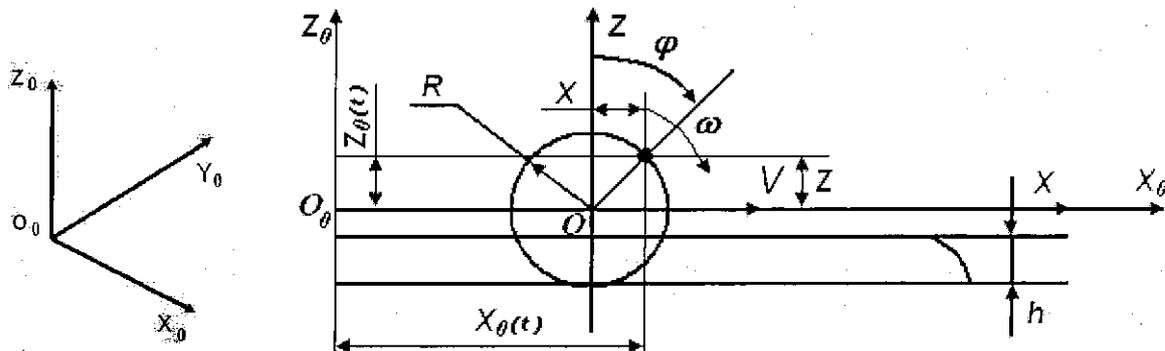


Рисунок 1 – Расчетная схема траектории движения фрезы, вид сбоку:
 h – высота снежного покрова

Произвольная точка фрезы в процессе вырезания стружки снега из снежного массива (рисунок 1) движется по траектории, которая в плоскости XOZ описывается уравнением циклоиды, а сама лента фрезы, в пространстве $OXYZ$, характеризуется так называемой винтовой линией. Известно, что в зависимости от соотношения поступательной скорости снегоочистителя и угловой скорости, уравнение циклоиды может принимать два вида, которые характеризуются наличием двух точек пересечения, или одной. Область решения неравенства (1) обеспечивает траекторию произвольной точки фрезы, где циклоида имеет пересечение со своей траекторией. Все, что находится под поверхностью, является областью решения неравенства (рисунок 4).

$$\omega \geq \frac{V}{R}. \quad (1)$$

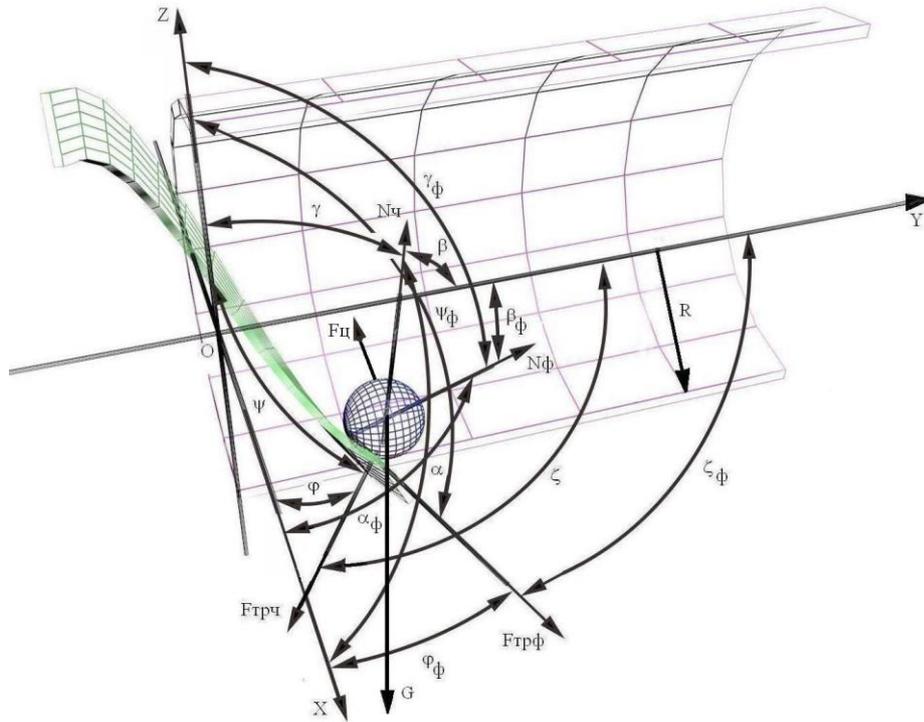


Рисунок 2 – Пространственная расчетная схема действующих сил на снежную частицу при ее взаимодействии с лентой фрезы

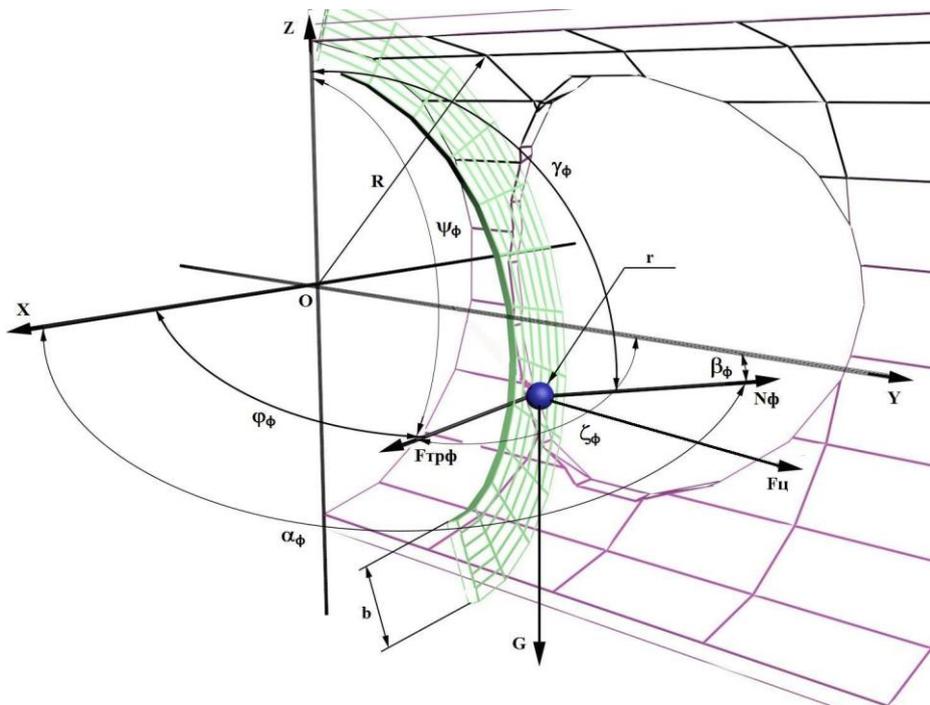


Рисунок 3 – Пространственная расчетная схема действующих сил на снежную частицу при ее взаимодействии с лентой фрезы в области загрузочного окна

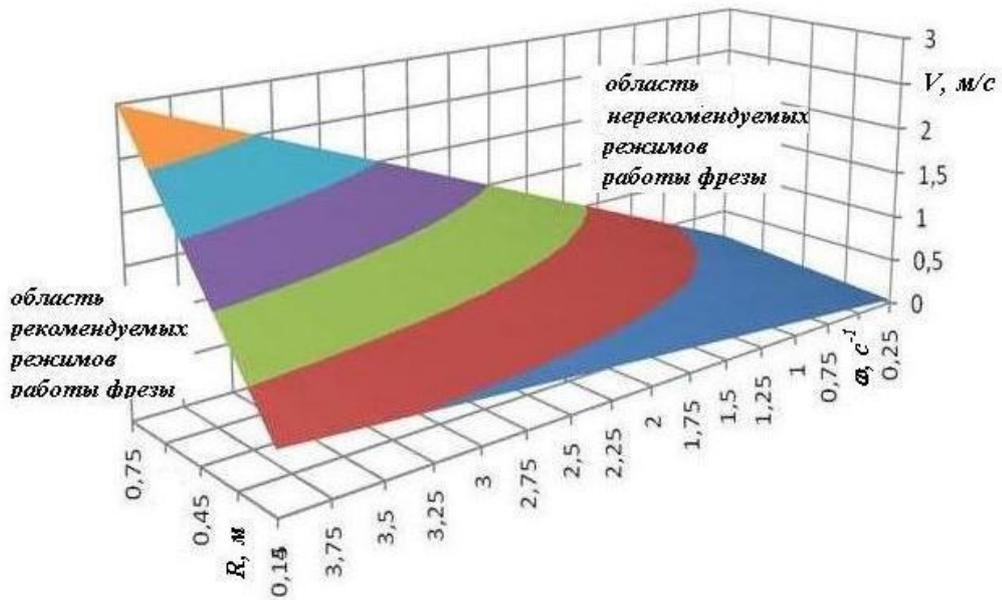


Рисунок 4 – Поверхность, определяющая характер движения точки фрезы в плоскости XOZ

Известно, что некоторый объем интерпретируется как тройной определенный интеграл, используя данный факт, был определен объем снежной призмы, который вырезает и транспортирует фреза питателя за один оборот, при этом считалось, что формируемый объем представляет собой сегмент S (рисунок 5). W_c – объем сегмента, который определяется по формуле (2), формула (3) W_n – это объем вырезаемой снежной призмы. Путем преобразований получается выражение (4), где объем сегмента в межлопастном пространстве равен объему вырезаемой снежной призмы.

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

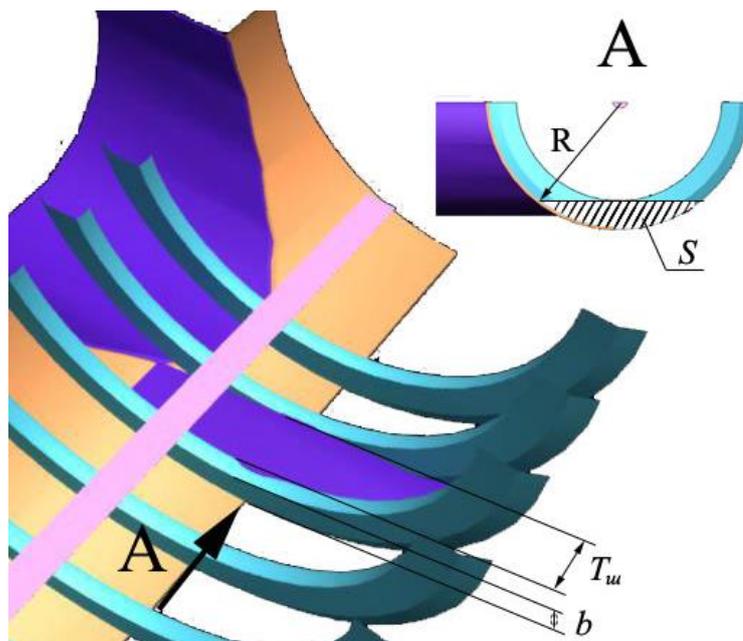


Рисунок 5 – Схема транспортирования снежной призмы

$$W_n = 4 \pi \cdot h \cdot R \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \frac{V}{n^2 \cdot \omega}; \quad (3)$$

$$\pi R^2 \cdot \left(\arccos \left(\frac{R-b}{R} \right) - \sin \left(\arccos \left(\frac{R-b}{R} \right) \right) \right) = n h \cdot \frac{V}{\omega} \varphi^2, \quad (4)$$

где R – радиус фрезы, м; b – толщина транспортируемой призмы снега, теоретически она совпадает с шириной ленты фрезы, м; n – число заходов фрезы; h – высота снежного покрова, м; V – скорость снегоочистителя, м/с; ω – угловая скорость вращения фрезы, с^{-1} ; φ – угол поворота фрезы, рад.

В результате анализа решения уравнения (4) были установлены зависимости изменения ширины ленты фрезы для однозаходной, двухзаходной и трехзаходной фрез в зависимости от угла поворота фрезы питателя (рисунок 6). Увеличение длины винтовой линии приводит к увеличению ширины ленты фрезы. Увеличение числа заходов фрезы уменьшает свободный объем между соседними витками фрезы, и замедляет рост ширины ленты фрезы.

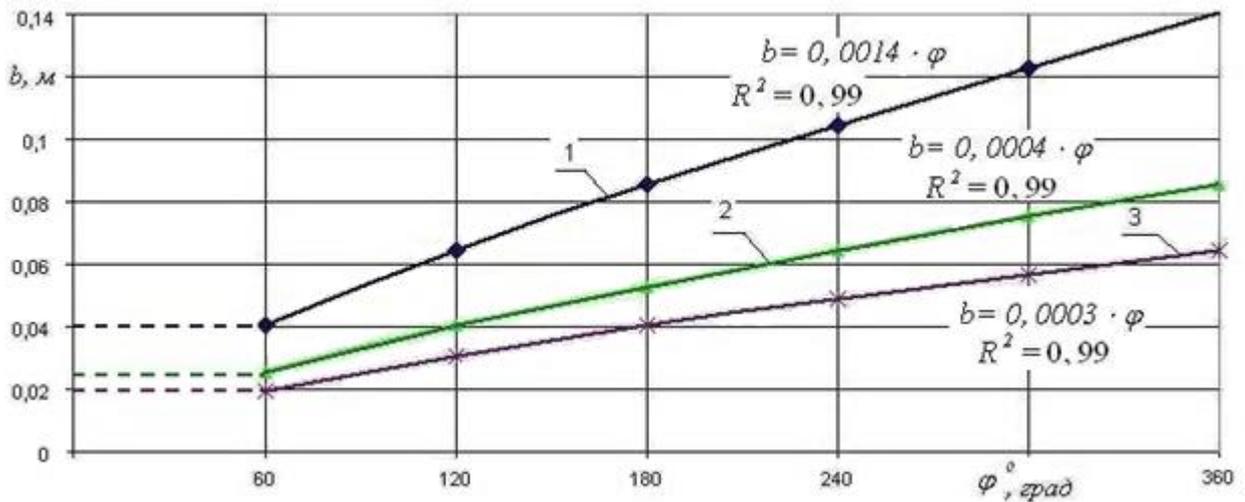


Рисунок 6 – Изменение ширины ленты фрезы для однозаходной, двухзаходной и трехзаходной фрез:

- 1 – ширина ленты однозаходной фрезы, м,
- 2 – ширина ленты двухзаходной фрезы, м;
- 3 – ширина ленты трехзаходной фрезы, м

На основании расчетных схем (рисунки 2, 3) и уравнений Лагранжа 1-го рода, с учетом связей, которые наложены на систему, получены уравнения движения снежной частицы в питателе (5-7), представленные дифференциальными уравнениями 2-ого порядка и выражения (8-9) для определения сил нормальных реакций отвала, N_{ch} , и фрезы, N_f . Уравнения представляют собой замкнутую систему уравнений, посредством которых описывается динамика движения снежной частицы в питателе ФРС. Уравнениями движения частицы по поверхности ленты фрезы получены из уравнений (5-9), в которых сила нормальной реакции поверхности отвала, N_{ch} , равна нулю, в результате получена система уравнений (10-13).

$$\ddot{x} = N_f \cdot B_x - N_{ch} \cdot A_x + \omega^2 \cdot x; \quad (5)$$

$$\ddot{y} = N_f \cdot B_y - N_{ch} \cdot A_y; \quad (6)$$

$$\ddot{z} = -N_f \cdot B_z + N_{ch} \cdot A_z - g + \omega^2 \cdot z; \quad (7)$$

$$N_f = \frac{1}{m} \left(\frac{\left((V_z^2 + V_x^2) \cdot S_1 \right) + g \cdot \left(\frac{S_1}{M_1} - \frac{x}{R_1} \right)}{\left(\frac{F_1 \cdot S_1}{M_1} - S_2 \right) - \omega^2 \cdot \left(\frac{x^2}{z} + z \right) \cdot \frac{S_1}{M_1}} \right); \quad (8)$$

$$N_{ch} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\frac{-(g \cdot x)}{R_1} + N_f \cdot S_2}{S_1}; \quad (9)$$

$$\ddot{x} = N_f \cdot B_x + \omega^2 \cdot x; \quad (10)$$

$$\ddot{y} = -N_f \cdot B_y; \quad (11)$$

$$\ddot{z} = -N_f \cdot B_z + \omega^2 \cdot z - g; \quad (12)$$

$$N_f = \frac{1}{m} \left(\frac{-g \cdot x}{(B_x \cdot z - B_z \cdot x) \cdot \frac{B_y \sqrt{(z^2 + x^2)}}{\theta}} \right), \quad (13)$$

где m – масса снежной частицы, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; x – координата снежной частицы по оси OX ; z – координата снежной частицы по оси OZ ; $A_x, A_z, A_y, B_x, B_z, B_y$ – дополнительные обозначения соотношений из уравнений движения снежной частицы; θ – угол захода фрезы, град.

Решение уравнений (8), (13) позволили определить мощность, N , Вт, сообщаемую питателю для транспортирования снежной частицы по формуле:

$$N = (R - r) \left\{ \left[N_\phi \cos \alpha_\phi + N_u \cos \alpha \right] \frac{Z}{R} + \left[N_\phi \cos \psi + N_u \cos \gamma \right] \frac{X}{R} \right\} \omega, \quad (14)$$

где R – радиус фрезы, м; r – радиус частицы, м; N_ϕ – сила нормальной реакции поверхности ленты фрезы; α_ϕ – угол между нормальной реакцией поверхности ленты фрезы и горизонтальной осью OX , рад; α – угол между силой нормальной реакции поверхности отвала и горизонтальной осью OX , рад; N_u – сила нормальной реакции поверхности отвала, Н; ψ – угол между силой трения частицы о поверхность отвала и вертикальной осью OZ , рад; γ – угол между силой нормальной реакции поверхности отвала и вертикальной осью OZ , рад; ω – угловая скорость, с⁻¹.

На рисунке 7 представлены внешний вид и результаты работы программы определения параметров снежной частицы и потребляемой питателем мощности.

Анализ математической модели проведен с использованием ЭВМ.

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_u, r_u, f_u, f_u), и совместно с предложенной математической моделью позволяют синтезировать ширину ленты фрезы питателя, обеспечивающего максимальную загрузку снежной массы в межлопастное пространство питателя ФРС.

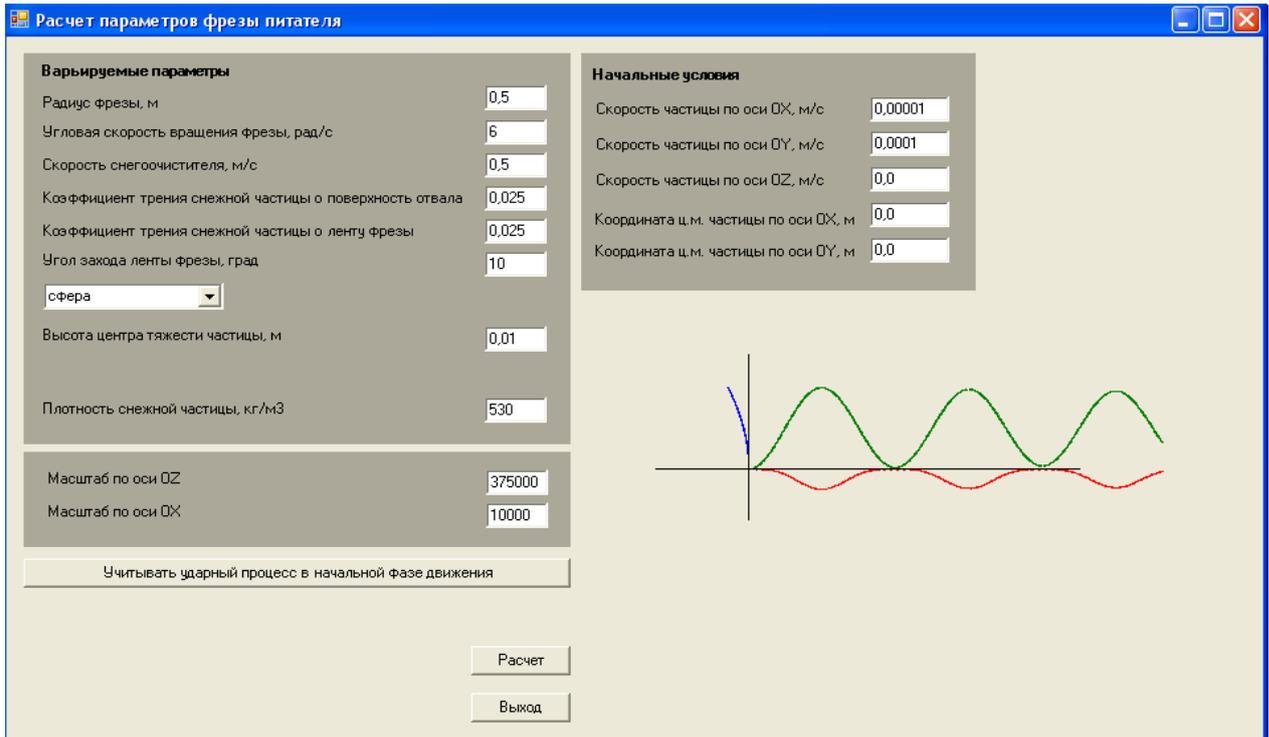


Рисунок 7 – Пример интерфейса программы вычисления параметров снежной частицы

В четвертой главе сформулирован критерий оценки эффективности рабочего процесса питателя ФРС, позволяющий снизить величину эксплуатационных расходов при уборке снежного массива. В качестве критерия эффективности в работе принята удельная мощность, которая в общем виде представляет собой отношение мощности к производительности (15). Мощность находится по формуле (14), а производительность, с учетом особенностей работы фрезы питателя определяется произведением объема вырезаемой призмы на скорость перемещения (16). Обоснованный критерий эффективности имеет вид, формула (17).

$$N_{y\delta} = \frac{N}{\Pi}, \quad (15)$$

где Π – масса снега, транспортируемого питателем за единицу времени, кг/с.

$$\Pi = 2\rho \cdot h \cdot R \cdot \frac{V}{n^3} \cdot \operatorname{tg} \theta; \quad (16)$$

$$N_{y\delta} = \frac{N \cdot n^3}{2 \cdot \rho \cdot h \cdot R \cdot V \cdot \operatorname{tg} \theta}. \quad (17)$$

где ρ – плотность снежного покрова, кг/м³; h – высота снежного покрова, м; R – радиус фрезы, м; V – поступательная скорость снегоочистителя, м/с; n – число заходов фрезы; θ – угол захода ленты фрезы, град.

На рисунке 8 представлены графики изменения длины участка ленты фрезы в области загрузочного окна в зависимости от времени. Варьировались 2 параметра: угол захода ленты фрезы и радиус загрузочного окна, R_z . Уравнение, на основании которого определяется длина участка ленты, находящаяся в области загрузочного окна, имеет вид:

$$\cos^2(\delta_0 \pm \omega \cdot t) + \operatorname{tg}^2 \theta \cdot (\delta_0 \pm \delta) = 1, \quad (18)$$

где δ_0 – угол между прямой проходящей через точку касания лентой фрезы окружности, ограничивающей область загрузочного окна перпендикулярно оси вращения фрезы и горизонтальной плоскостью; t – время, с.

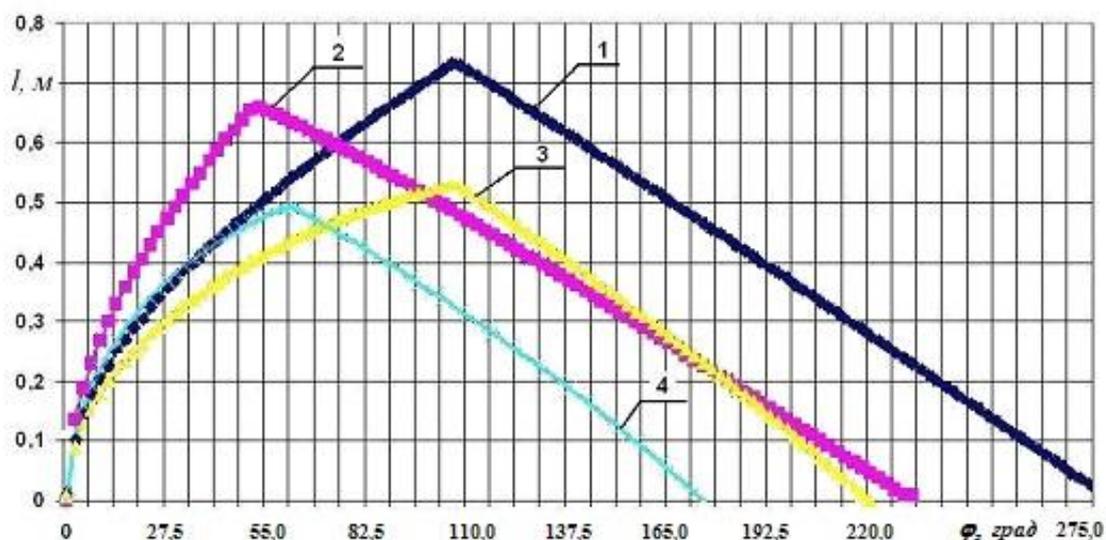


Рисунок 8 – Изменение длины ленты фрезы в области загрузочного окна:

- 1) $\theta=17$ град, $R_z = 0,3$ м, $\omega = 8$ с⁻¹; 2) $\theta=24$ град, $R_z = 0,25$ м, $\omega = 8$ с⁻¹;
- 3) $\theta=17$ град, $R_z = 0,25$ м, $\omega = 8$ с⁻¹; 4) $\theta=24$ град, $R_z = 0,3$ м, $\omega = 8$ с⁻¹.

Из графиков следует, что уменьшение угла захода приводит к увеличению длины ленты фрезы в области загрузочного окна. 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 (рисунок 9).

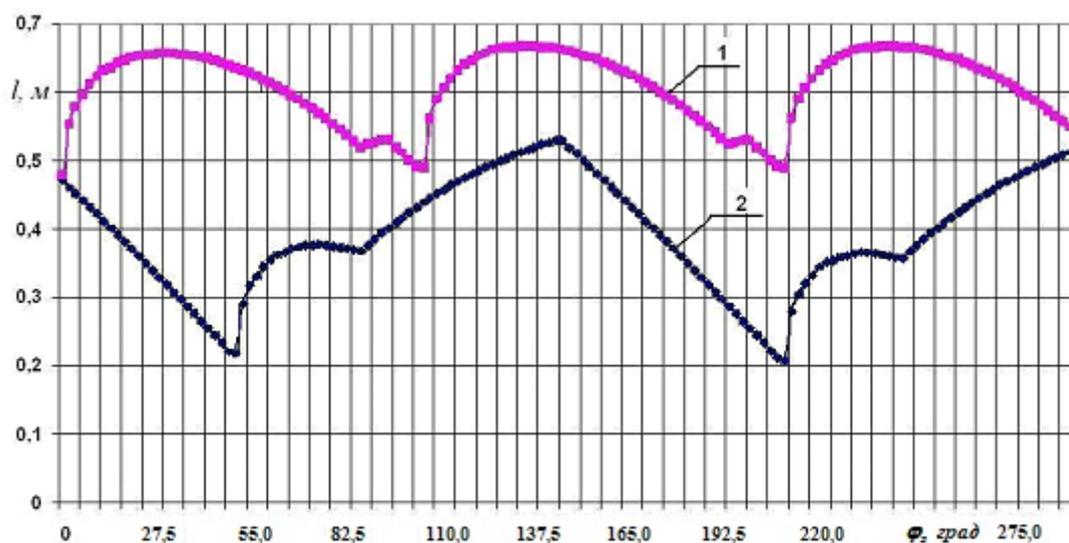


Рисунок 9 – Изменение длины ленты фрезы в области загрузочного окна:

- 1 – трехзаходная фреза; 2 – двухзаходная фреза.

Таким образом, многозаходная фреза с углом захода ленты фрезы менее 17° обеспечивает одновременную разгрузку участка ленты фрезы большей длины и равномерное заполнение.

Получены уравнения регрессии (19, 20) 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° . Регрессионный анализ осуществлялся методом наименьших квадратов по алгоритму Левенберга-Маквардта в STATISTICA. Полученные уравнения дают удовлетворительный результат в интервале времени от 0 до 0,6 секунд, при условии положительной величины длины рабочего участка l .

при $R = 0,3$ м; $l = \left(a_0 + a_1 \cdot R_z + a_2 \cdot \theta + a_3 \cdot R_z^2 + a_4 \cdot \theta^2 \right) + \left(a_0 + a_1 \cdot R_z + a_2 \cdot \theta + a_3 \cdot R_z^2 + a_4 \cdot \theta^2 \right) \cdot t + \left(a_0 + a_1 \cdot R_z + a_2 \cdot \theta + a_3 \cdot R_z^2 + a_4 \cdot \theta^2 \right) \cdot t^2$; (19)

при $R = 0,4$ м; $l = \left(a_0^1 + a_1^1 \cdot R_z + a_2^1 \cdot \theta + a_3^1 \cdot R_z^2 + a_4^1 \cdot \theta^2 + a_5^1 \cdot R \cdot \theta \right) + \left(a_0^2 + a_1^2 \cdot R_z + a_2^2 \cdot \theta + a_3^2 \cdot R_z^2 + a_4^2 \cdot \theta^2 + a_5^2 \cdot R \cdot \theta \right) \cdot t + \left(a_0^3 + a_1^3 \cdot R_z + a_2^3 \cdot \theta + a_3^3 \cdot R_z^2 + a_4^3 \cdot \theta^2 + a_5^3 \cdot R \cdot \theta \right) \cdot t^2$. (20)

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

В качестве примера на рисунках 10, 11 построены поверхности: максимальной длина рабочего участка ленты фрезы по (18) и по уравнениям регрессии (19, 20), для радиуса фрезы питателя 0,3 м.

При проведении численных экспериментов был установлен характер зависимостей: изменения угла разгрузки при увеличении угловой скорости и ширины ленты; зависимость средней мощности при сходе с ленты фрезы от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы. В качестве примера на рисунках 12 и 13 представлены данные зависимости для частиц массой $0,08 \cdot 10^{-3}$ кг, при плотности снега 160 кг/м³.

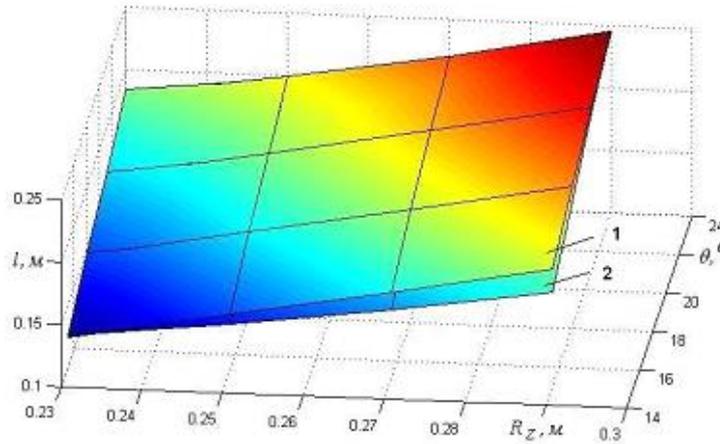


Рисунок 10 – Максимальная длина рабочего участка ленты фрезы теоретическая 1, определенная по (18) и по уравнениям регрессии (19) 2, для $R = 0,3$ м

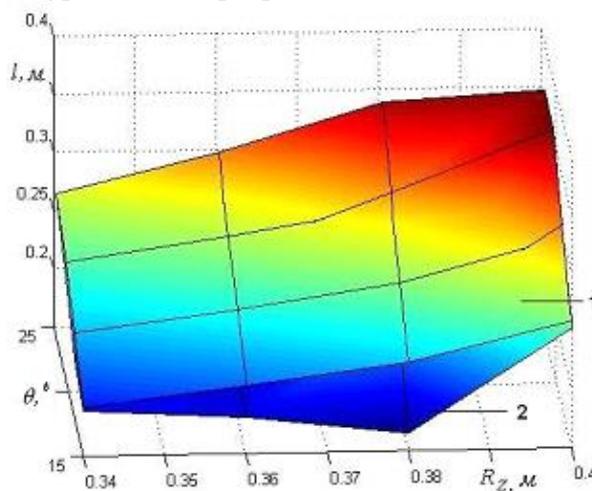


Рисунок 11 – Максимальная длина рабочего участка ленты фрезы теоретическая 1, определенная по (18) и по уравнениям регрессии (20) 2, для $R = 0,4$ м

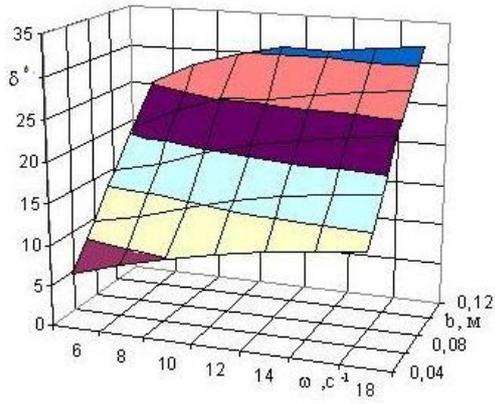


Рисунок 12 – Зависимость угла разгрузки от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты фрезы

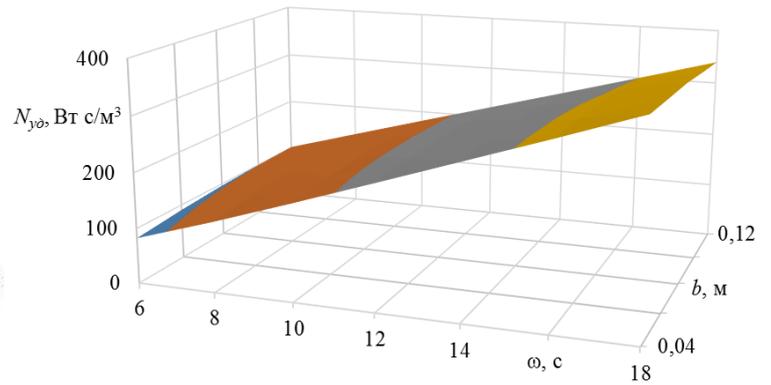


Рисунок 13 – Зависимость удельной мощности при сходе с ленты фрезы от угловой скорости вращения фрезы и ширины ленты

Разработаны алгоритм и методика выбора технологических параметров фрезы питателя ФРС (рисунок 14).

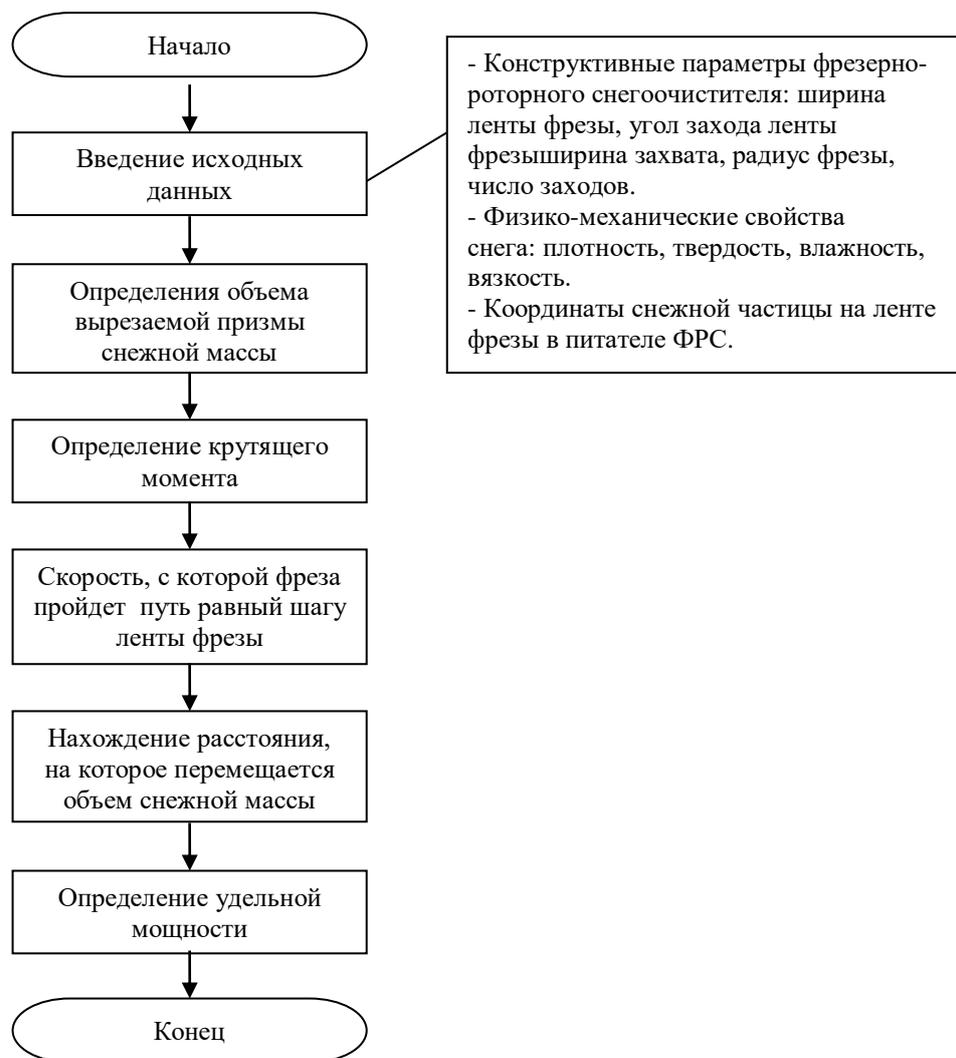


Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма определения удельной мощности

На основе проведенных вычислительных экспериментов с использованием разработанных прикладных программ, позволяющих рассчитать основные параметры питателя и ширину ленты фрезы, получены функциональные и регрессионные зависимости, позволяющие определять основные параметры питателя и оптимизировать их при проектировании новых и модернизации существующих ФРС.

В пятой главе проведены экспериментальные исследования, задачей которых являлось подтверждение адекватности разработанной математической модели и подтверждение работоспособности конструкторских разработок.

Эксперимент проводился на экспериментальной установке ФРС (рисунок 15), включающей в себя: фрезу питателя, отвал питателя, регулируемый электрический привод и действующей модели ФРС.

Проверка адекватности математической модели работы питателя ФРС основывалась на сравнении результатов теоретических исследований математической модели работы питателя ФРС с результатами исследований ее физической модели. В качестве факторов для оценки адекватности математической модели работы питателя ФРС были выбраны изменения координат положения снежной частицы и скорости ее перемещения в питателе ФРС.



Рисунок 15 – Экспериментальная установка и действующая модель ФРС

На рисунках 15, 16, 17 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 18 представлены проекции на оси OX и OZ вектора скорости движения частицы в питателе ФРС.

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

$$x = \frac{e^{-5,14+59,49 \cdot y}}{1 + e^{-1,89+55,81 \cdot y}}; \quad (21)$$

где x – положение частицы по глубине питателя, y – положение частицы по ширине питателя; для угловой скорости вращения фрезы питателя ФРС, 10 с^{-1} :

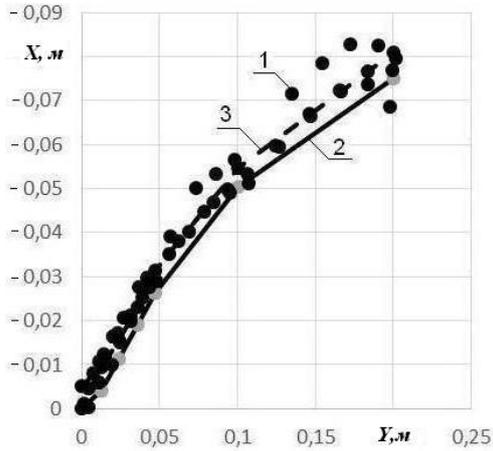


Рисунок 15 – Траектория движения частицы в питателе фрезерно-роторный снегоочиститель при угловой скорости вращения фрезы 8 c^{-1} , $R = 0,2 \text{ м}$:
1 – результаты эксперимента;
2 – теоретические результаты;
3 – уравнение регрессии

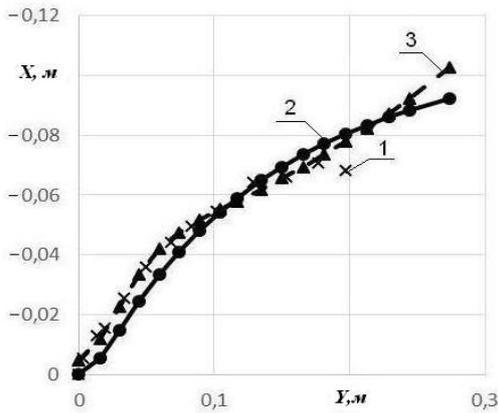


Рисунок 16 – Траектория движения частицы в питателе фрезерно-роторный снегоочиститель при угловой скорости вращения фрезы 10 c^{-1} , $R = 0,2 \text{ м}$:
1 – результаты эксперимента;
2 – теоретические результаты;
3 – уравнение регрессии

$$x = \frac{e^{-5,18+71,48 \cdot y}}{1 + e^{-1,91+67,85 \cdot y}}; \quad (22)$$

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

$$x = \frac{e^{-5,57+50,39 \cdot y}}{1 + e^{-2,29+45,59 \cdot y}}. \quad (23)$$

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

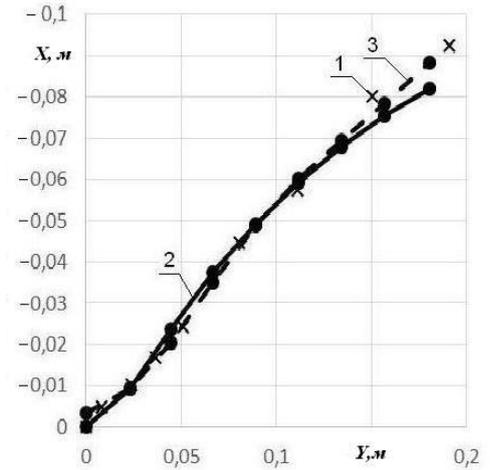


Рисунок 17 – Траектория движения частицы в питателе фрезерно-роторный снегоочиститель при угловой скорости вращения фрезы 15 c^{-1} , $R = 0,2 \text{ м}$:
1 – результаты эксперимента;
2 – теоретические результаты;
3 – уравнение регрессии

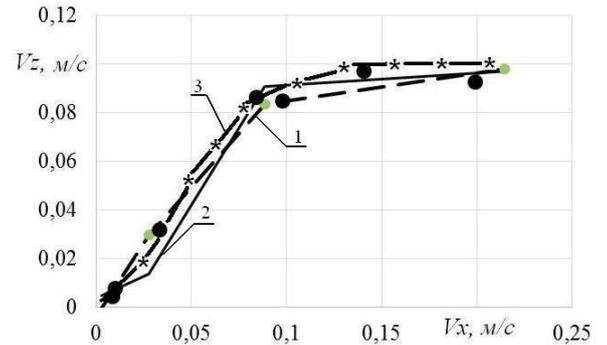


Рисунок 18 – Изменение проекций вектора скорости частицы в питателе фрезерно-роторный снегоочиститель при угловой скорости вращения фрезы 8 c^{-1} , $R = 0,2 \text{ м}$:
1 – результаты эксперимента; 2 – теоретические результаты;
3 – уравнение регрессии

$$v_z = b_0 + b_1 \cdot v_x^2 + b_2 \cdot v_x = -0,0045 - 4,095 \cdot v_x^2 + 1,355 \cdot v_x, \quad (24)$$

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

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

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

Для подтверждения работоспособности конструкторских разработок были проведены экспериментальные исследования по определению 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. На рисунке 19 а, 19 б, 19 в показаны положения фрезы, при которых осуществлялась оценка транспортируемой ею массы.



Рисунок 19 – Экспериментальное определение фактически не попавшей в область загрузочного окна снежной массы при различных углах поворота фрезы

Полученные результаты были аппроксимированы уравнением регрессии для ленты фрезы с постоянной шириной:

$$dm = 1,3326 \varphi. \quad (25)$$

При этом коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$. 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 ленты прирост производительности работы питателя составляет 6 %. Экономический эффект от эксплуатации ФРС с переменной шириной ленты фрезы в течение 30 маш. · час. составит 16436 руб. 70 коп.

Полученные значения максимальных относительных погрешностей положения снежной частицы и ее проекций ее вектора скорости в питателе ФРС не превышают величины относительной погрешности, равной 12%. Достигнутая степень адекватности математической

модели рабочего процесса питателя ФРС является приемлемой для решения поставленных в работе задач. Работоспособность конструкторской разработки так же получила экспериментальное подтверждение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Аюпова, Н. Ю. Влияние кинематических характеристик питателя и базовой машины фрезерно-роторного снегоочистителя на процесс отделения стружки / Д. С. Алешков, Н. Ю.

Урусова (Аюпова Н.Ю.) – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2012. – Вып. 5(27). – С.7–10.

2. Аюпова, Н. Ю. Влияние основных параметров фрезерно-роторного снегоочистителя на вырезаемый объем снежной стружки / Д. С. Алешков, Н. Ю. Урусова (Аюпова Н.Ю.) – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2013. – № 5(33). – С. 10-14.

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

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

Патенты и свидетельства:

5. Пат. 15137 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.

Статьи в материалах конференций и других изданий:

6. Урусова, Н. Ю. (Аюпова Н.Ю.) К вопросу движения снежной стружки под действием винтовой лопасти питателя в зоне резания / Н. Ю. Урусова (Аюпова Н.Ю.) ; науч. рук. Д. С. Алешков – Текст : непосредственный // Научные труды молодых ученых, аспирантов и студентов : межвузовский сборник / СибАДИ. – Омск, 2012. – Вып. 9. – С. 273-276.

7. Урусова, Н. Ю. (Аюпова Н.Ю.) Кинематические особенности работы фрезы питателя фрезерно-роторного снегоочистителя / Н. Ю. Урусова (Аюпова Н.Ю.) – 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.

8. 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.

9. 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).

10. 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.

11. 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).

12. 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).

АЮПОВА Наталья Юрьевна

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 30.10.2020
Формат 60x90 1/16. Бумага писчая.
Оперативный способ печати.
Усл. п. л. 1,25
Тираж 90

Опечатано в типографии ИПК СибАДИ
644080, г. Омск, пр. Мира, 5