

## **АННОТАЦИЯ**

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)  
по направлению подготовки 8D071 – «Инженерия и инженерное дело»,  
по образовательной программе 8D07102 – «Машиностроение».

**МОЛДАХАНОВА БЕКБОЛАТА АСКЕРХАНОВИЧА**

### **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВОГО ПИТАТЕЛЯ ФРЕЗЕРНО-РОТОРНОГО СНЕГООЧИСТИТЕЛЯ, ОСНАЩЕННОГО ЛОПАСТНЫМ УСКОРИТЕЛЕМ**

**Актуальность диссертационной работы.** Диссертация выполнена в рамках Государственной программы инфраструктурного развития Республики Казахстан «Нұрлы жол» на 2020-2025 годы, на соискание степени доктора философии PhD по направлению подготовки 8D071 – «Инженерия и инженерное дело», образовательная программа докторантуры PhD 8D07102 – «Машиностроение».

Интенсивное развитие промышленности Республики Казахстан приводит к увеличению транспортных перевозок не только в летнее, но и в зимнее время, в течение которого случаются снежные аномалии, из-за которых прекращается движение по дорогам и закрываются аэродромы, что, в свою очередь, определяет повышенные требования к эффективности работы, например, к скорости и способности уборки больших объемов снега, к затрачиваемой на это мощности, и т.д., снегоочистителей, особенно фрезерно-роторных, используемых при выполнении экстренных снегоуборочных работ с высокопроизводительными темпами.

Существует большое количество разнообразной техники для борьбы со снежными заносами (с плужными, фрезерными, щеточными и другими рабочими органами), наиболее универсальными и эффективными из которых представляются фрезерно-роторные снегоочистители.

К недостаткам рабочего процесса известных снегоочистителей относятся: большое тяговое сопротивление; значительные энергозатраты на передвижение; несовершенство конструкции, приводящее к образованию призмы волочения снежной массы перед рабочим органом, на перемещение которой вынужденно затрачивается дополнительная энергия (мощность).

Известны конструкции снегоочистителей, рабочие органы которых оснащены ускорителями рабочего процесса, в том числе, ускорителями лопастного типа. Указанные ускорители, за счет автономной скоростной переработки скапливающегося по центру рабочего органа снежного массива, способствуют его своевременной подаче в ротор-метатель, однако имеют ряд конструктивных недостатков, препятствующих свободному прохождению снега в зону метания. Все известные конструкции ускорителей за счет неподвижных и необходимых элементов крепежа к корпусу рабочего органа или за счет массивного привода ускорителя, расположенных по центру винтового питателя, прямо напротив ротора-метателя, тормозят наплывающую снежную массу и

сами способствуют образованию волоочимой призмы снега, на вынужденную транспортировку которой затрачивается значительная часть энергии.

Исследования рабочих органов снегоочистителей, в которых лопастные ускорители, в совокупности с рациональным изменением угла подъема винтовой ленты питателя, исключали бы образование призмы волоочения снега перед рабочим органом и, тем самым, позволяли бы перераспределить освободившуюся часть энергии, ранее затрачиваемую на волочение снежной призмы, например, с движителя на рабочий орган, и в свою очередь обеспечили бы общее повышение производительности снегоочистителя, отсутствуют.

Отсутствие исследований рабочего процесса лопастных ускорителей, а также исследований влияния угла подъема и наклона винтовой ленты питателя на силы сопротивления и крутящий момент определяют **актуальность исследования.**

**Гипотезой исследования** является предположение о возможности эффективной очистки дорог от снежных завалов фрезерно-роторными снегоочистителями за счет применения лопастных ускорителей и установки рационального угла подъема винтовой ленты питателя.

**Целью исследования** является установление зависимостей, описывающих рабочий процесс винтового питателя и лопастного ускорителя фрезерно-роторного снегоочистителя.

Для достижения цели решены следующие **задачи**:

- выполнен конструктивный анализ патентных и научно-технических сведений, а также определены тенденции формирования конструкций рабочего оборудования фрезерно-роторных снегоочистителей (далее - ФРС);

- разработаны конструкции винтовых питателей ФРС, оборудованных лопастным ускорителем;

- определена вероятностная оценка снежного фона эксплуатации снегоочистительных машин в РК;

- разработана и исследована математическая модель процесса взаимодействия фрезерного винтового питателя и лопастного ускорителя с разрабатываемым снежным массивом;

- разработаны экспериментальные модели винтового питателя ФРС с лопастным ускорителем и подтверждены полученные аналитическим путем результаты;

- предложена конструкция винтового питателя ФРС с рациональным углом подъема винтовой ленты и оригинальным методом монтажа и независимого привода лопастного ускорителя, обеспечивающая максимальную эффективность очистки автомобильных дорог от снежных завалов.

**Методы исследования.** 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 винтового питателя с лопастным ускорителем ФРС со снежным массивом, а также научных положений теоретической механики и физического моделирования применительно к винтовому питателю и лопастному ускорителю ФРС.

Экспериментальные исследования заключались в проведении пассивного полнофакторного эксперимента с использованием разработанной экспериментальной установки рабочего органа ФРС и анализом данных в программе Excel.

В процессе проведения диссертационных исследований использовались следующие пакеты прикладных программ: AutoCAD, КОМПАС-3D Viewer, MATLAB, Microsoft Visual Studio C#, STATISTICA, EXCEL, 3D Surface Plotter.

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

- экспериментальным путем подтверждена гипотеза о возможности эффективной очистки дорог от снежных завалов фрезерно-роторными снегоочистителями за счет применения лопастных ускорителей и установки рационального угла подъема винтовой ленты питателя;

- теоретическим путем установлены зависимости между составляющими сил сопротивления взаимодействию винтового питателя с разрабатываемым материалом от угла подъема винтовой линии и частоты вращения полуфрез питателя, рабочей скорости снегоочистителя;

- теоретическим путем установлена зависимость крутящего момента от угла подъема винтовой линии, рабочей скорости ФРС и частоты вращения винтового питателя;

- экспериментальным путем получены зависимости затрат мощности от скорости перемещения и угла подъема винтовой линии питателя;

- теоретическим путем установлена кинематика перемещения снежной массы вдоль лопастей ускорителя винтового питателя ФРС в процессе их разгрузки;

- теоретическим путем установлены сопротивления на лопатках ускорителя и предельные угловые скорости лопастного ускорителя.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- применение лопастных ускорителей в рабочих органах ФРС позволяет снизить сопротивления на рабочем органе и предотвратить образование перед ним снежной призмы волочения;

- закономерности изменения сил сопротивления взаимодействию винтового питателя с разрабатываемым материалом от угла подъема винтовой линии и частоты вращения полуфрез питателя, от рабочей скорости снегоочистителя;

- закономерности влияния диаметра, геометрической формы и частоты вращения лопастного ускорителя на силы сопротивления, момент и суммарную мощность рабочего процесса ФРС;

- рациональным углом подъема винтовой линии питателя ФРС, является угол  $\alpha=18-20^{\circ}$ ;

суммарная мощность, затрачиваемая на рабочий процесс винтового питателя с лопастным ускорителем, снижается в среднем на 12% по сравнению с мощностными затратами на рабочем органе снегоочистителя традиционной конструкции.

**Автор защищает:**

1. Конструктивные решения нового фрезерно-роторного снегоочистителя, винтовой питатель которого оснащен ускорителем лопастного типа;

2. Математическую модель, которая позволяет рассчитать изменение вертикальных  $R_v$  и горизонтальных  $R_g$  составляющих сил сопротивления и крутящего момента  $M_{кр}$  на винтовом питателе в зависимости от его параметров и режимов работы снегоочистителя;

3. Результаты экспериментальных исследований;

4. Методику расчета винтового питателя ФРС.

**Объектом исследования** служит рабочий процесс винтового питателя ФРС, оборудованного лопастным ускорителем.

**Предмет исследования** - закономерности рабочего процесса взаимодействия винтового питателя ФРС, оборудованного лопастным ускорителем, со снежным массивом.

**Практическая значимость** исследований заключается:

- в разработанных конструкциях и методике расчета параметров ФРС с лопастным ускорителем, позволяющих повысить эффективность процесса оперативной снегоочистки эксплуатируемых дорог в экстремальных условиях;

- в разработанном экспериментальном стенде для исследования физической модели ФРС, позволившим определить экспериментальные зависимости составляющих сил сопротивления, крутящего момента и дальности отбрасывания снега от параметров винтового питателя, и лопастного ускорителя, и их режимов работы.

Результаты исследований надлежащим методом оформлены и **внедрены** в рабочий процесс ТОО «Өскемен-Тазалық».

Получено **грантовое финансирование** МОН РК по госбюджетному проекту АР09260192 «Разработка инновационного фрезерно-роторного снегоочистительного рабочего оборудования с повышенной эффективностью работы» на 2021-2023 годы, в котором автор с начала проекта работал в должности младшего научного сотрудника.

**Краткое содержание.** В первой главе диссертации проведен обзор и анализ известных конструкций и теоретических исследований в области снегоочистительных машин. Выполнен анализ патентно-технических решений ФРС. Поставлены цели и задачи исследования.

Во второй главе дана вероятностная оценка снежной обстановки эксплуатации снегоочистительных машин на территории Республики Казахстан. Дана оценка возможной плотности снега и температуры снежного покрова. Проведен вероятностный анализ основных физико-механических свойств снега, построены полигоны распределения температуры воздуха и объемной массы снежного покрова по регионам Республики Казахстан.

Третья глава посвящена теоретическому анализу работы винтового питателя фрезерно-роторного снегоочистителя. Определены усилия и моменты сопротивлений при контакте винтового питателя ФРС с разрабатываемым снегом. Найдены составляющие вертикального и горизонтального усилий на винтовом питателе ФРС. Исследован рабочий процесс лопастного ускорителя винтового питателя ФРС. Рассчитаны предельные угловые скорости лопастного ускорителя. Произведена оценка мощности и энергоемкости процесса работы винтового питателя. Определены сопротивления на лопатках ускорителя, оказывающие значительное влияние на его энергопотребление и эффективность. Разработана математическая модель рабочего процесса ФРС, характеризующая

изменение вертикальных и горизонтальных сил сопротивления и крутящего момента на винтовом питателе в зависимости от его параметров и режимов работы снегоочистителя.

В четвертой главе описаны методика и оборудование экспериментальных исследований модели ФРС. Задачей экспериментальных исследований являлась качественная и количественная оценка влияния различных режимов работы винтового питателя ФРС на силовые и энергетические параметры, характеризующие рабочий процесс взаимодействия винтового питателя ФРС с разрабатываемой средой и сопоставлении с результатами теоретических исследований. Был выполнен факторный эксперимент и определены численные значения коэффициентов регрессии и их значимости, а также установлена адекватность моделей при обработке экспериментальных данных многофакторного эксперимента.

Были получены основные функциональные модели, представленные в форме уравнений регрессии для переменных в натуральном виде, характеризующие изменения крутящего момента, вертикальной и горизонтальной силы сопротивления, а также дальности отбрасывания снежной массы, которые подтвердили гипотезу о возможности эффективной очистки дорог от снежных завалов ФРС за счет применения лопастных ускорителей и установки рационального угла подъема винтовой ленты питателя.

Пятая глава посвящена анализу результатов экспериментальных исследований эффективности винтового питателя ФРС. Выполнен анализ результатов экспериментального определения угла подъема винтовой линии и режимов работы винтового питателя ФРС. Получены зависимости горизонтальной и вертикальной составляющих сопротивления фрезерованию снежного массива от угла подъема винтовой линии и рабочей скорости ФРС при постоянной частоте вращения и высоте разрабатываемого снега. Проанализирована отбрасывающая способность винтового питателя с ростом угла подъема винтовой линии и характер транспортирования материала по ее внутренней поверхности. Построены зависимости затрат мощности от соотношения относительной и рабочей скоростей ФРС, угла подъема винтовой линии и режимов работы питателя. Проанализирована эффективность процесса отбрасывания снега винтовым питателем ФРС в зону работы ротора-метателя. Составлены подробные фотограммы рабочего процесса с фиксацией реальной картины работы винтового питателя и лопастного ускорителя. Установлены области рациональных параметров конструктивных и режимных параметров винтового питателя ФРС.

**Личный вклад диссертанта.** Работа выполнена автором лично, автор выполнил патентный анализ известных конструкций, обзор теоретических исследований в области снегоочистительных машин. Разработал и исследовал математическую модель расчета параметров нового ФРС, оснащенного ускорителем лопастного типа. Разработал и изготовил экспериментальные стенды, смоделировал имитирующую снег специальную смесь, подобрал регистрирующую аппаратуру. Получил и сравнил аналитические и экспериментальные зависимости, описывающие работу винтового питателя ФРС с лопастным ускорителем.

**Публикация и апробация работы.** Основные положения диссертации опубликованы в 18 научных работах, в том числе в 3-х статьях, входящих в базу данных Scopus с процентилем выше 35 и одним патенте на изобретение РК, цитируемом в базе данных Web of Science, в 7 статьях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, в 3 Евразийских патентах и в 2-х патентах на изобретения РК, в 3 статьях, входящих в реферативную базу РИНЦ. Во всех публикациях представлены материалы и результаты теоретических и экспериментальных исследований рабочего процесса винтового питателя ФРС с лопастным ускорителем, дающие представления о процессах, протекающих как внутри снежной массы, так и в зоне ее соприкосновения с винтовым питателем или лопастным ускорителем ФРС, позволяющие выбрать рациональные параметры рабочего процесса снегоочистки и конструктивные параметры снегоочистителей. Дополнительно материалы диссертации представлены в 6 тезисах международных научно-практических и научно-методических конференций. Результаты исследований докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: на 79-й (2021) и 80-й (2022) МНМиНИК МАДИ (МАДИ, Москва, РФ); на VI и VII Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана», ВКТУ, (2021, 2022, 2023); МНПК, посвященной 30-летию Независимости Республики Казахстан: «Современный Казахстан: реформы образования и науки» (2021), Евразийский технологический университет; МНПК «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №13), посвященной 30-летию Независимости Республики Казахстан (2021), КарТУ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 174 страницах машинописного текста, состоит из обозначений и сокращений, введения, 5 разделов и заключения, включает 92 рисунка, 18 таблиц, список использованных источников из 123 наименований и 6 приложений.

Автор выражает благодарность коллективу кафедры «Дорожно-строительные машины» МАДИ и лично Кустареву Геннадию Владимировичу за оказанную помощь и консультации при проведении экспериментальных работ, а также директору ТОО «Өскемен-Тазалық» Байгунусову Айдосу Жомарткановичу за помощь и содействие в организации комиссии и внедрении опытной модели ФРС с лопастным ускорителем в производство.

**Результаты исследования и основные выводы.** Диссертация содержит новые научно-обоснованные результаты, использование которых обеспечивает решение важной прикладной задачи разработки методики расчета конструктивных параметров ФРС с лопастным ускорителем, обеспечивающего эффективную скоростную очистку автомобильных дорог от снежных завалов с наименьшим потреблением энергии:

1. Конструктивный анализ патентных и научно-технических сведений показал преимущества и перспективность исследования фрезерно-роторных рабочих органов перед другими сравниваемыми типами конструкций питателей, а также позволил разработать классификационную схему методов повышения эффективности работы питателей ФРС, выполняемую за счет рациональной

организацией рабочего процесса снегоочистки, исключая повышение мощности двигателя базовой машины.

2. Разработаны и защищены 3 Евразийскими и 2 Казахстанскими патентами на изобретения конструкции винтовых питателей ФРС, позволяющих за счет лопастного ускорителя повысить эффективность процесса оперативной снегоочистки эксплуатируемых дорог с наименьшими энергозатратами.

3. Определена вероятностная оценка снежного фона эксплуатации снегоочистительных машин в РК, объемная масса снежного покрова и температура которого подчиняются закону нормального распределения с вероятностью  $P_d = 95\%$ . Наиболее вероятные значения удельного сопротивления резанию 4,7-7,9, коэффициентов внешнего и внутреннего трения снега соответственно 0,07-0,08, 0,42-0,45;

4. Разработана математическая модель рабочего процесса винтового питателя ФРС, характеризующая изменение вертикальных  $P_v$  и горизонтальных  $P_g$  частей усилия и крутящего момента  $M_{кр}$  на винтовом питателе в зависимости от его параметров (угла  $\alpha$  подъема винтовой линии) и режимов работы снегоочистителя (окружной скорости питателя  $\omega$  и рабочей высоты снега  $H_0$ );

5. Разработаны экспериментальные стенды для исследования физической модели винтового питателя ФРС с лопастным ускорителем, позволяющие инверсировать процесс взаимодействия винтового питателя с материалом, в результате чего исключаются внешние помехи от передвижения модели винтового питателя ФРС.

6. Аналитическим путем полученные результаты подтверждены экспериментально. При установке лопастного ускорителя на винтовом питателе ФРС с углом  $\alpha = 18^\circ$  горизонтальное и вертикальное усилия разработки снежного массива и момент сопротивления на рабочем органе максимально уменьшаются на 25-30%, по сравнению с традиционной конструкцией винтового питателя, причем с увеличением толщины разрабатываемого слоя снега эффективность от использования лопастного ускорителя возрастает, что реализуется в росте производительности на 28 - 30%.

7. Анализ эффективности работы ФРС с лопастным ускорителем винтового питателя показывает, что энергоемкость процесса взаимодействия рабочего органа со снежным массивом по сравнению с существующей традиционной конструкцией на 22-25% меньше, при незначительном (на 1,5-2%) росте металлоемкости. Значение интегрального показателя эффективности работы ФРС снижается при установке лопастного ускорителя на винтовом питателе на 25-30%.

8. Теоретические и экспериментальные данные имеют расхождение в пределах 11-18%, что свидетельствует о достоверности теоретической модели и позволяет использовать ее в инженерных расчетах;

9. Предложена конструкция винтового питателя ФРС с рациональным углом подъема винтовой ленты  $\alpha = 18^\circ$  и оригинальным методом монтажа и независимого привода лопастного ускорителя, обеспечивающая максимальную эффективность очистки автомобильных дорог от снежных завалов. Опытная конструкция прошла апробирование и испытания в реальных производственных условиях.