

На правах рукописи



Лысянников Алексей Васильевич

**МЕТОДИКА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ НАГРУЗОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ ОТВАЛЬНОГО ТИПА
СНЕГОУБОРОЧНЫХ МАШИН**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель –

Желукевич Рышард Борисович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Капранов Борис Иванович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет», профессор кафедры физических
методов и приборов контроля качества

Тимонин Владимир Владимирович
кандидат технических наук, научный сотрудник
ФГБУН «Институт горного дела
им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения РАН»
(ИГД СО РАН)

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государствен-
ный университет» (ТОГУ), г. Хабаровск**

Защита диссертации состоится «11» июня 2013 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «30» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Винокуров Б. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно Программе Правительства Российской Федерации, «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденной 22 ноября 2008 года (№ 1734-р), протяженность автомобильных дорог общего пользования в России к 2030 году должна удвоиться и достичь более 1,35 млн. километров, количество аэродромов гражданской авиации должно возрасти с 315 до 500. Увеличение протяженности дорожных покрытий предполагает увеличение объемов работ по очистке их от снега. Для снегоочистки широко используются снегоуборочные машины, оснащенные рабочими органами отвального типа, в силу их универсальности, простоты конструкции, технического обслуживания, мобильности и относительно низкой стоимости.

Сложный характер физико-механических свойств уплотненных снежных образований, находящихся на дорожном покрытии, зависит от их структуры, частоты снегопадов, температуры и влажности окружающего воздуха, интенсивности и скорости движения транспорта, диктует необходимость современного подхода к уточнению оптимальных параметров углов резания и установки рабочих органов отвального типа, так как параметры используемые в настоящее время приводят к повышенным затратам энергии, которые можно сократить. Высокие темпы роста объемов работ по очистке дорожных покрытий от снега (ввиду увеличения протяженности дорог) и требования сокращения сроков их уборки обуславливают актуальность работ по снижению энергоемкости разрушения уплотненных снежных образований, улучшению качества очистки покрытий, совершенствованию технологии снегоочистки, повышению производительности без увеличения мощности базовой машины и эффективности использования снегоуборочной техники, что может быть осуществлено за счет применения новых методик и средств контроля нагрузочных параметров, позволяющих определить оптимальные углы резания и установки рабочих органов отвального типа.

Степень разработанности темы. Степень разработанности и рекомендации, выявленные в процессе анализа работ, посвященных исследованиям нагрузочных параметров рабочих органов отвального типа, взаимодействия рабочего оборудования с уплотненными снежными образованиями не отражают особенности процесса резания, фактические затраты энергии и отсутствуют методики контроля нагрузочных параметров, возникающих при взаимодействии рабочих органов с разрабатываемым массивом. Используемые средства контроля нагрузочных параметров имеют ряд недостатков, наиболее значимым из которых является взаимное влияние составляющих усилие резания (горизонтальной, боковой, вертикальной) друг на друга, в результате чего снижается точность измерений. Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями, изучение влияния физико-механических свойств снежных образований, углов резания и установки рабочего органа на составляющие усилия резания и энергоемкость, разработка средств, методик контроля и расчета нагрузочных параметров рабочих органов являются актуальными, поскольку позволят определить оптимальные параметры установки рабочего оборудования.

Цель работы. Повышение эффективности использования снегоуборочной техники за счет внедрения методики и средств контроля нагрузочных параметров рабочих органов отвального типа.

Задачи исследований:

1. Разработать методики контроля нагрузочных параметров, возникающих при взаимодействии моделей рабочих органов отвального типа с уплотненными снежными образованиями и проведения экспериментальных исследований.

2. Разработать средство контроля нагрузочных параметров возникающих при взаимодействии моделей рабочих органов отвального типа с уплотненными снежными образованиями.

3. На основе разработанных методики и средств контроля оценить влияние физико-механических свойств уплотненных снежных образований, углов резания и установки рабочего органа отвального типа и глубины резания на энергоемкость и обосновать оптимальные параметры среза.

4. Разработать математические модели взаимодействия рабочего органа отвального типа с разрушаемыми уплотненными снежными образованиями, методику расчета усилий резания и практические рекомендации по выбору оптимальных параметров среза.

Объект исследования – взаимодействие рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями.

Предмет исследований – нагрузочные параметры, возникающие при взаимодействии рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями.

Научная новизна работы заключается:

1. Разработана методика контроля нагрузочных параметров возникающих при взаимодействии модели рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями, позволяющая определять оптимальные параметры углов резания и установки рабочего органа, обеспечивающие резание снежных образований с минимальной энергоемкостью.

2. Получены зависимости составляющих усилие резания от углов установки рабочего органа отвального типа, углов и глубины резания, и физико-механических свойств уплотненных снежных образований, позволяющие количественно оценить влияние этих параметров на составляющие усилие резания.

3. Разработаны математические модели процесса взаимодействия рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями, позволяющие моделировать изменение нагрузочных параметров, производительности и скорости снегоочистки дорожных покрытий.

4. Разработана методика расчета усилий, возникающих при взаимодействии рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями, позволяющая повысить эффективность использования снегоуборочной техники.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные математические модели, средства и методики контроля и расчета нагрузочных параметров позволяют определять расчетные нагрузки, возникающие на рабочих органах отвального типа в зависимости от параметров глубины, ширины, угла

резания и установки рабочего оборудования и физико-механических свойств снежных образований, а также энергоемкость процесса.

Полученные результаты, разработанная методика расчета усилий резания и практические рекомендации по выбору оптимальных параметров углов резания и установки используются при проектировании рабочих органов отвального типа и дорожно-эксплуатационными организациями при выполнении работ по очистке дорожных покрытий от снега с целью повышения эффективности использования снегоуборочной техники, а также применяются в учебном процессе в Института нефти и газа Сибирского федерального университета.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач использовался комплексный подход, включающий анализ существующего опыта в области разрушения мерзлых грунтов, снежных и снежно-ледяных образований различным режущим инструментом, элементы механики процесса резания различных материалов и методы математического моделирования. Экспериментальные исследования основаны на теории планирования эксперимента, использовании стандартных и специально разработанных запатентованных стендов и приборов, и обработке экспериментальных данных с помощью пакетов прикладных программ Mathcad 14, MATLAB, Power Graph, MS Excel.

Положения, выносимые на защиту:

- методика контроля нагрузочных параметров, возникающих при взаимодействии модели рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями;
- средство контроля нагрузочных параметров, возникающих при взаимодействии модели рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями;
- результаты экспериментальных исследований процесса резания уплотненных снежных образований;
- регрессионная, аналитическая и непараметрическая математические модели взаимодействия рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями;
- методика расчета усилий, возникающих при взаимодействии рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями;
- практические рекомендации по выбору оптимальных параметров углов резания и установки рабочего органа отвального типа для дорожно-эксплуатационных организаций.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных автором, обеспечивается необходимым объемом экспериментальных исследований, удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментально полученных зависимостей, использованием оборудования и средств измерений утвержденного типа, прошедших поверку, позволивших с приемлемой точностью осуществлять измерения требуемых параметров, обработкой полученных результатов с применением ЭВМ, пакетов стандартных программ и методов математической и статистической обработки данных.

Основные научные положения и результаты теоретических и эксперимен-

тальных исследований представлены на VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука» (Красноярск, 2010), на III Международной научно-практической конференции «Проблемы диагностики и эксплуатации автомобильного транспорта» (Иркутск, 2011), на Международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири», посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета (Тюмень, 2011), на Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2011», (Могилев, 2011), на III научной конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2011), на Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса» (Новокузнецк, 2011), на Всероссийской 65-й научно-технической конференции ФГБОУ ВПО СибАДИ с международным участием (Омск, 2011), на IV Всероссийской научно-практической конференции СамНЦ РАН «Актуальные проблемы машиностроения» (Самара, 2012), на Международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2012» (Одесса, 2012), на X Международной научно-технической конференции Чтения памяти В. Р. Кубачека «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (Екатеринбург, 2012).

Автор признан победителем и отмечен дипломами 1-й и 2-й степени в следующих конкурсах: Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук (Санкт-Петербург, 2012); Всероссийский конкурс «Наукоемкие инновационные проекты молодых ученых» (Санкт-Петербург, 2012).

Реализация и внедрение результатов работы. На разработанное средство контроля нагрузочных параметров получен патент Российской Федерации. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Аэропорт Емельяново» (г. Красноярск) и в учебный процесс Института нефти и газа Сибирского федерального университета, при подготовке инженеров специальностей 190204.65 «Средства аэродромно-технического обеспечения полетов авиации» и 190110.65 «Транспортные средства специального назначения». Все результаты практического применения диссертационных исследований подтверждаются соответствующими актами.

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 32 научных работах, из них 12 в журналах, рекомендованных ВАК. Получены патенты на изобретение № 2463407, № 2461809 и патент на полезную модель № 111149.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 174 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 141 наименования, семи приложений объемом 30 страниц, содержит 58 рисунков и 61 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель, представлены объект и предмет исследования, методы исследования, отмечены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, указана практическая ценность полученных результатов.

В первой главе дан обзор условий формирования снежного наката на дорожных покрытиях, рассмотрены способы борьбы со снежно-ледяными образованиями, приведен анализ нормативных документов по эксплуатационному содержанию покрытий дорог и аэродромов, плужных снегоочистителей, навесного снегоуборочного оборудования, современного состояния исследований в области изучения физико-механических свойств и механической разработки снежного массива, средств и методик контроля нагрузочных параметров рабочих органов дорожных машин.

Наличие на дорожных покрытиях снежных образований снижает коэффициент сцепления, что оказывает негативное воздействие на безопасность взлетно-посадочных операций воздушных судов, скорость движения транспортных потоков, аварийность на дорогах и травматизм участников дорожного движения. Содержание дорожных покрытий в зимнее время в состоянии, обеспечивающем возможность безопасного движения по ним, является одной из главных проблем для дорожно-эксплуатационных организаций Сибири и северных регионов России. Большой вклад в теорию разрушения и резания грунтов, снега и льда, а также в решение вопроса содержания автомобильных дорог в зимний период внесли известные ученые: В. Д. Абезгауз, К. А. Артемьев, И. Я. Айзеншток, В. И. Баллов, Г. Б. Бялобжеский, Ю. А. Ветров, Г. Г. Воскресенский, А. Л. Горбунов, В. М. Гусев, Н. Г. Домбровский, А. Д. Заморский, А. М. Завьялов, А. Н. Зеленин, Г. Л. Карабан, Н. Н. Карнаухова, Г. Кюн, В. Ф. Кулепов, А. П. Куляшов, Ю. И. Молев, Ш. М. Мерданов, И. А. Недорезов, И. Ратье, Д. А. Шалман, Р. Т. Шилд и др., определившие основные направления повышения эффективности зимнего содержания дорожных покрытий.

При содержании покрытий дорог и аэродромов в зимнее время широко применяются химико-механический, тепловой, и (на автомобильных дорогах) фрикционный способы борьбы со снежными и гололедными образованиями. Недостатками данных методов являются высокая стоимость их реализации и негативное воздействие на окружающую среду. Механический способ с использованием рабочего органа отвального типа является наиболее экономичным, технологически простым в применении, экологически более чистым и высоко производительным. Критерием рационального использования рабочего органа отвального типа, является повышение эффективности резания уплотненных снежных образований, без увеличения мощности базовой машины, с одновременным снижением энергоемкости процесса и увеличением производительности либо с сохранением ее величины. Достижение данного критерия может быть осуществлено путем использования оптимальных параметров углов резания и установки рабочих органов отвального типа обеспечивающих резание уплотненных снежных образований с минимальной энергоемкостью.

В настоящее время на основе теоретических и экспериментальных исследований широко применяются математические модели взаимодействия рабочих органов с разрушаемым массивом. Недостатками математических моделей являются: описание процессов с точки зрения квазистатических зависимостей, а не дифференциальных уравнений движения; применение значительного количества эмпирических коэффициентов, связь которых с реальными процессами, протекающими при взаимодействии рабочего органа с разрушаемым массивом, очень условна; отсутствие методики выбора параметров, обеспечивающих повышение эффективности снегоочистки. Указанные недостатки моделей требуют устранения для определения оптимальных параметров углов резания и установки рабочих органов отвального типа.

Анализ литературных источников показал, что работ, направленных на изучение процесса резания уплотненных снежных образований недостаточно. Не существует единой оценки влияния физико-механических свойств уплотненных снежных образований, параметров углов резания и установки рабочего органа отвального типа на энергоемкость процесса. Отсутствует методика расчета нагрузочных параметров возникающих при взаимодействии рабочих органов отвального типа с разрабатываемым массивом, что делает затруднительным проведение расчетов при разработке новых и рациональном использовании существующих конструкций рабочих органов. Используемые средства контроля нагрузочных параметров имеют ряд недостатков наиболее значимым, из которых является взаимное влияние составляющих усилия резания друг на друга, в результате чего снижается точность измерений. Отсутствуют рекомендации для дорожно-эксплуатационных организаций по выбору оптимальных параметров установки рабочего органа. Перечисленные факты доказывают актуальность исследований в этой области. В связи с этим сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлено средство и методика контроля нагрузочных параметров возникающих при взаимодействии модели рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями и алгоритм методики выбора оптимальных параметров углов резания и установки рабочего органа. Схема методики контроля нагрузочных параметров возникающих при взаимодействии модели рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями представлена на рисунке 1. Исследования процесса резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа проводились на специальном лабораторном стенде рисунок 2. В качестве режущего инструмента при проведении экспериментальных исследований использовалась модель отвала автогрейдера ГС 10.06, шириной 25 см, изготовленная в масштабе 1:10 рисунок 3, т. к. автогрейдер является наиболее распространенным видом техники в РФ, применяемым для уборки уплотненных снежных образований (плотность до 800 кг/м^3) с дорожных покрытий. Системы автоматического управления основным отвалом применяемые на автогрейдерах позволяют обеспечивать расположение отвала в пространстве под различными углами, по отношению к поверхности разрабатываемого массива.

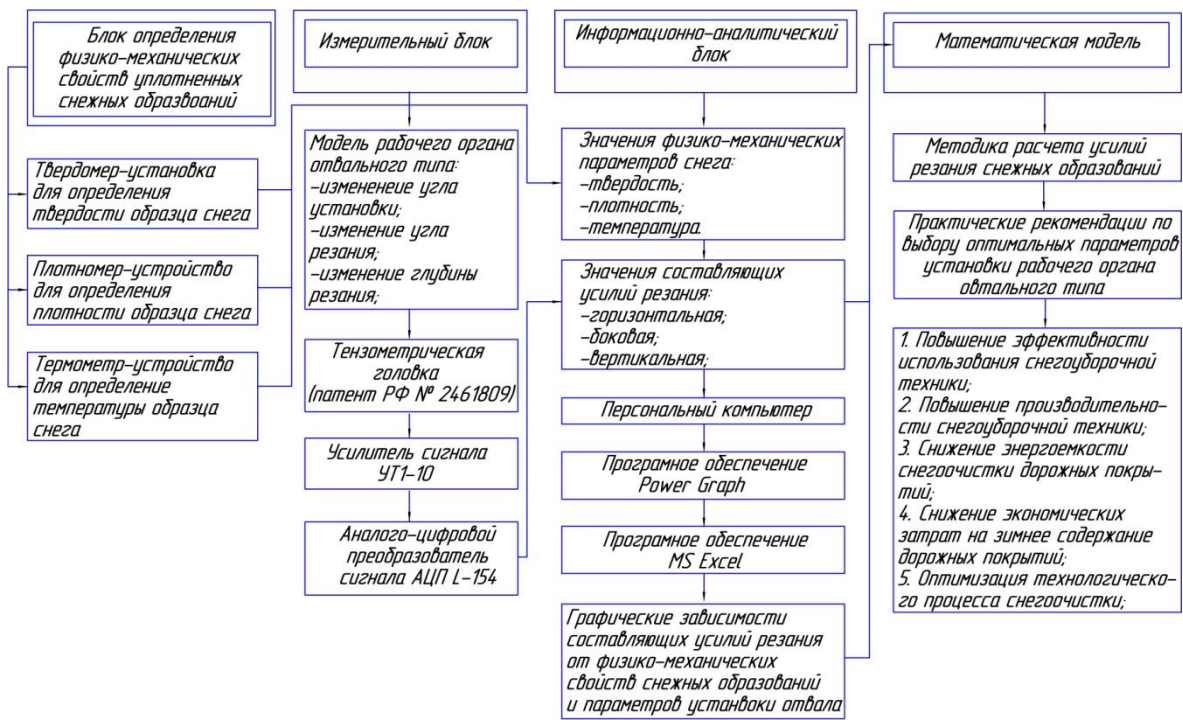


Рисунок 1 – Схема методики контроля нагрузочных параметров возникающих при взаимодействии модели рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями

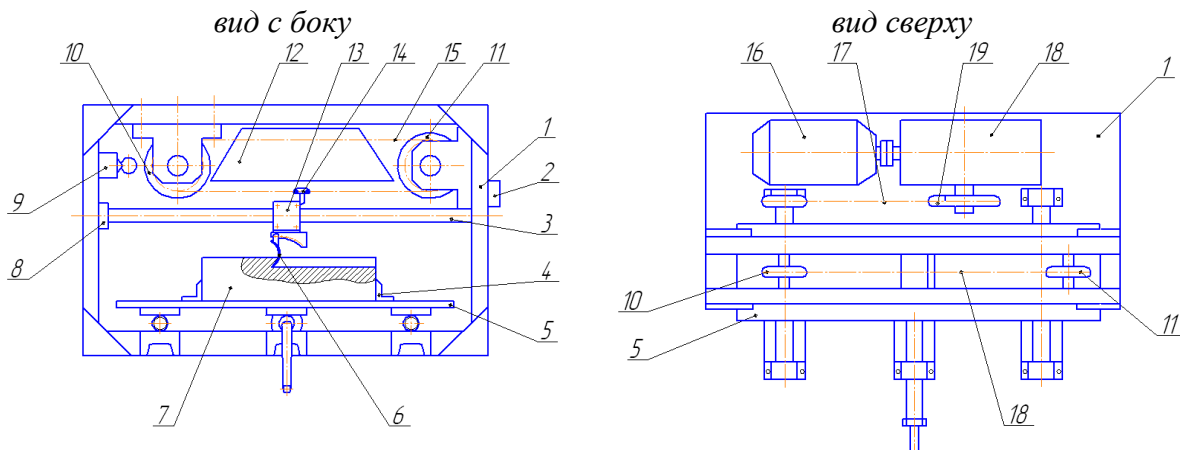


Рисунок 2 – Схема лабораторного стенда для исследования процесса резания уплотненных снежных образований: 1 – рама; 2 – кнопочная станция; 3 – направляющие; 4 – упоры; 5 – несущая плита; 6 – модель рабочего органа; 7 – образец из снега; 8 – демпферы; 9 – конечный выключатель; 10, 11 – звездочки тяговой цепи; 12 – шина; 13 – тензометрическая головка; 14 – захват; 15 – тяговая цепь привода; 16 – электрический двигатель; 17 – цепь; 18 – редуктор; 19 – приводная звездочка

Для определения нагрузочных параметров возникающих при взаимодействии модели рабочего органа отвального типа с разрабатываемым массивом, на



Рисунок 3 – Модель отвала автогрейдера ГС 10.06

основе проведенных исследований в предметной области разработана специальная тензометрическая головка рисунок 4 (патент РФ № 2461809), в конструкции которой предусмотрены три горизонтальные тяги с наклеенными тензодатчиками сопротивления ФКПА 20 – 200. Каждая тяга регистрирует только одну составляющую усилия резания (горизонтальную, вертикальную, боковую).

вую), данная конструкция тензометрической головки исключает взаимное влияние составляющих друг на друга, в результате чего повышается точность измерений.

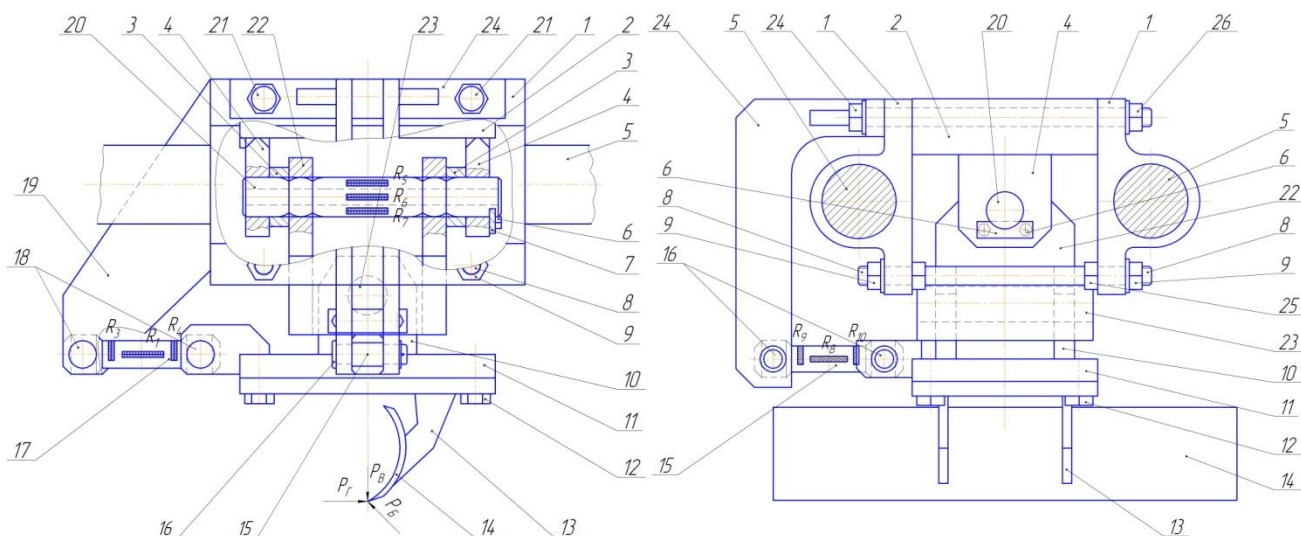


Рисунок 4 – Схематичное изображение тензометрической головки: 1 – ползун; 2 – рама; 3 – втулка; 4, 10 – проушины; 5 – направляющие; 6, 12, 21 – болт; 9, 25, 26 – гайка; 7 – пластина; 8 – шпилька; 11 – основание; 13 – держатель; 14 – модель рабочего органа отвального типа; 15 – тяга регистрирующая боковую составляющую; 16, 18 – палец; 17 – тяга регистрирующая горизонтальную составляющую; 19, 24 – кронштейны; 20 – тяга регистрирующая вертикальную составляющую; 22 – П-образный консольный элемент; 23 – палец

Для автоматической записи, хранения и обработки значений, составляющих усилия резания уплотненных снежных образований использовался специально разработанный информационно-измерительный комплекс (ИИК), структурная схема которого представлена на рисунке 5. Компонентами ИИК являются: блок тензометрических датчиков, размещенных на тягах тензометрической головки, тензометрический усилитель

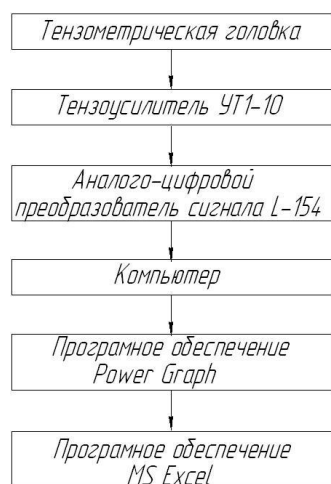


Рисунок 5 – Структурная схема информационно-измерительного комплекса

УТ1-10, плата аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-154, ПК Pentium 3 с частотой процессора 550 МГц, программное обеспечение Power Graph и MS Excel. Максимальная относительная погрешность измерений составила не более 2 %. Для соблюдения температурных условий эксперимента, лабораторный стенд для исследования процесса резания уплотненных снежных образований располагался в помещении, с отрицательной температурой воздуха. Вся измерительная аппаратура находилась в помещении с температурой воздуха около 20 °С.

Для проведения исследований на лабораторном стенде использовались образцы снега плотностью 400–450 кг/м³ и 450–500 кг/м³, вырезанные из снежного наката, находившегося на поверхности автомобильной дороги. Эксперименты проводились при изменении угла установки δ (угол меж-

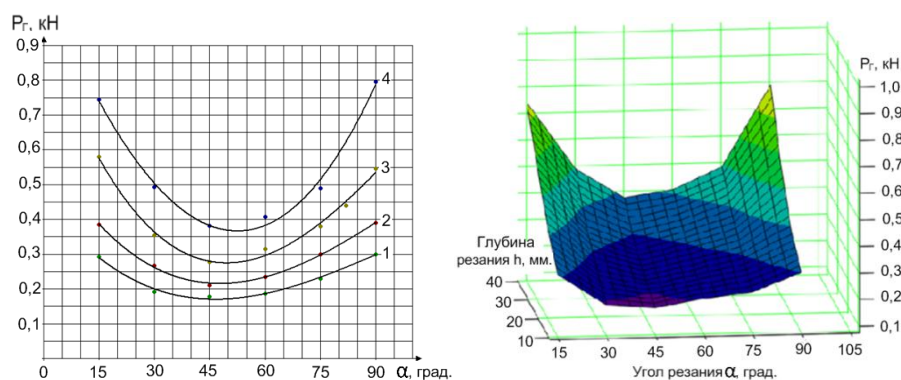
ду режущей кромкой ножа отвала и направлением движения) модели рабочего органа отвального типа ($90, 60, 45, 30^\circ$), угла резания α (угол между касательной к поверхности ножа отвала, проведенной через режущую кромку, и плоскостью срезания разрабатываемого массива) ($15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$) и глубины резания h ($10, 20, 30, 40$ мм), при температуре окружающего воздуха от минус 5 до минус 10°C , так как при данной температуре наиболее вероятно образование снежного наката на дорожных покрытиях. Измерение температуры окружающего воздуха проводилось ртутным термометром ТЛ–4 с ценой деления $0,1^\circ\text{C}$ и пределами измерения от минус 30 до плюс 20°C .

Скорость резания (скорость движения отвала) при испытаниях составила $0,51$ м/с ($1,84$ км/ч). В данной работе это условие можно считать достаточным, так как Л. К. Соколов в своих исследованиях установил, что изменение скорости резания мерзлых грунтов зубьями землеройных машин от $0,5$ до $1,5$ м/с ($1,8$ – $5,4$ км/ч) не влечет существенного увеличения значений составляющих усилия резания. В реальных условиях такие скорости резания обеспечиваются автогрейдером при движении на первой и второй передачах.

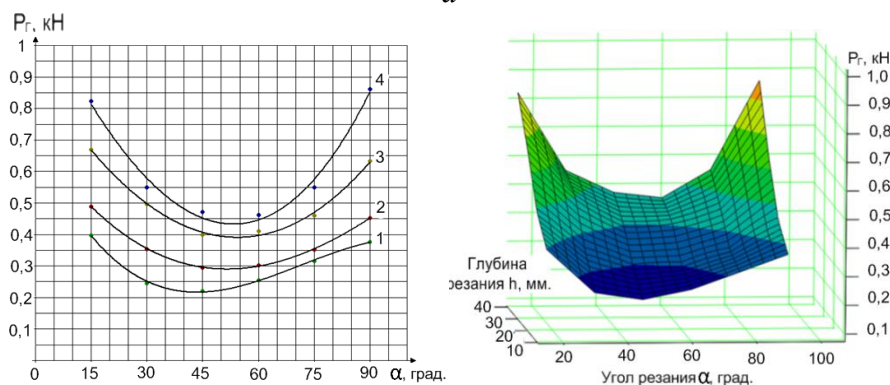
Приведен анализ точности измерений, методики определения необходимого числа опытов и проведения полного факторного эксперимента, представлена обработка результатов, установлено, что процесс разрушения снежных образований определяется: глубиной h и углом резания α и углом установки δ рабочего органа отвального типа. С целью получения надежности экспериментальных результатов в соответствии с приведенной методикой определено количество экспериментов равное 4. Обработка данных проводилась с применением программного обеспечения Power Graph и Microsoft Excel. Ординаты записи, соответствующие величинам горизонтальной $P_{\text{Г}}$, боковой $P_{\text{Б}}$ и вертикальной $P_{\text{В}}$ составляющих усилий резания, копировались из диаграмм программы Power Graph в табличный процессор Microsoft Excel, где умножались на соответствующие тарировочные коэффициенты для получения значений составляющих усилия резания в килоньютонах (кН). В результате статистической обработки найдены средние значения составляющих усилий резания, средняя квадратическая ошибка результатов каждого измерения, средняя относительная погрешность, доверительный интервал, среднее квадратическое отклонение, коэффициент корреляции и получено уравнение регрессии.

Разработанная методика и средство контроля нагрузочных параметров, позволяют определить оптимальные значения углов резания и установки рабочего органа, обеспечивающие повышение эффективности использования снегоуборочной техники.

В третьей главе представлены графические зависимости горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих усилия резания от углов установки рабочего органа, углов и глубины резания и физико-механических свойств уплотненных снежных образований построенные на основе статистически обработанных результатов исследований, предусмотренных программой эксперимента. На рисунках 6 – 9 приведены зависимости горизонтальной составляющей усилия резания уплотненных снежных образований от угла резания α и глубины резания h при углах установки рабочего органа отвального типа $\delta = 90$ – 30° .

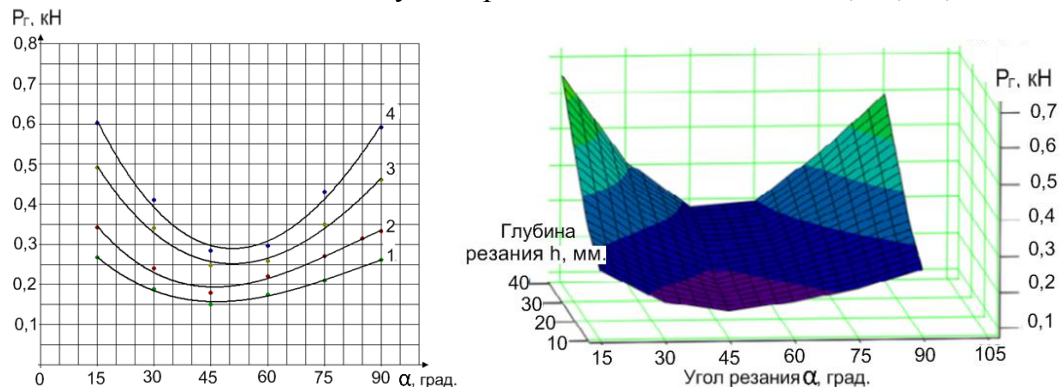


а

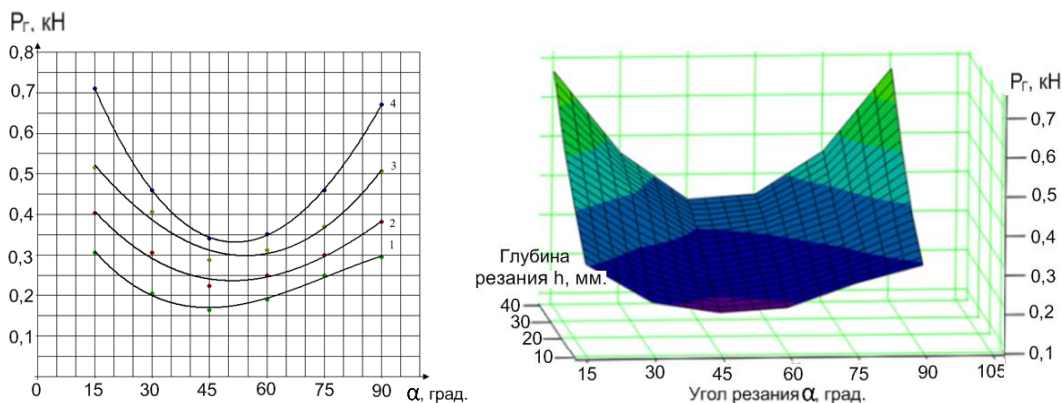


б

Рисунок 6 – Зависимость горизонтальной составляющей усилия резания от угла (α) и глубины (h) резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа при угле установки 90° : а – снег плотностью $400\text{--}450\text{ кг/м}^3$; б – снег плотностью $450\text{--}500\text{ кг/м}^3$; 1, 2, 3, 4 – глубина резания соответственно 10, 20, 30, 40 мм.

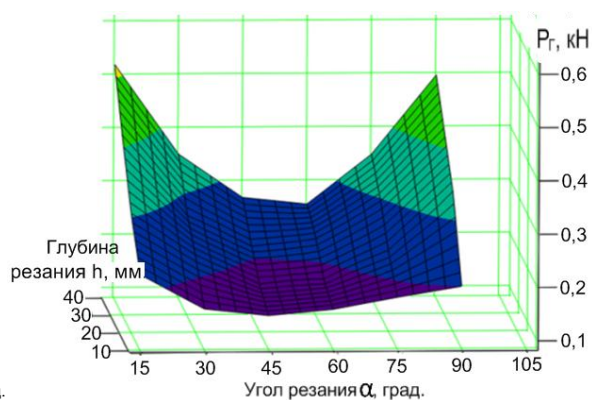
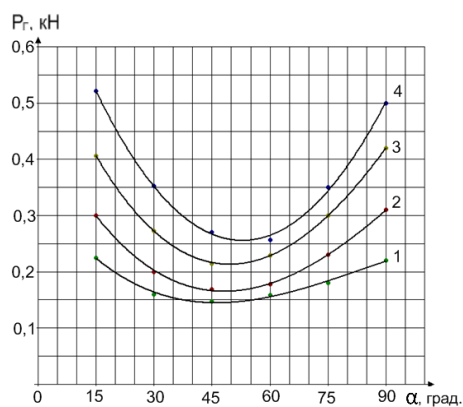


а

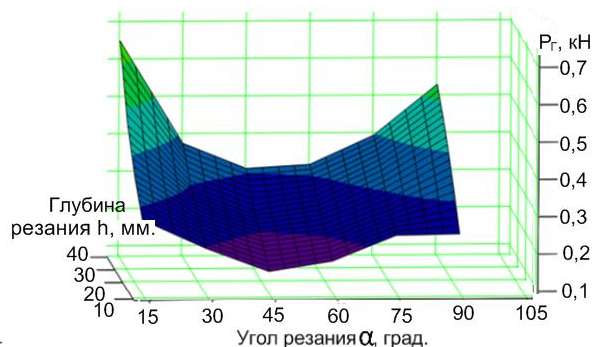
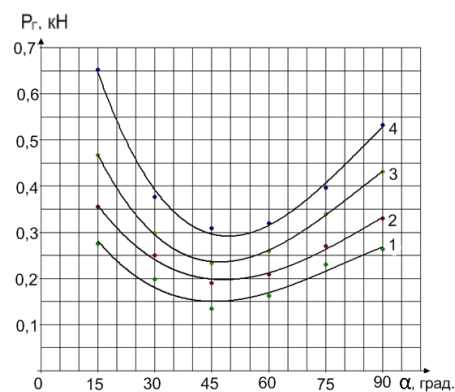


б

Рисунок 7 – Зависимость горизонтальной составляющей усилия резания от угла (α) и глубины (h) резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа при угле установки 60° ; (усл. обозн. см. рисунок 6)

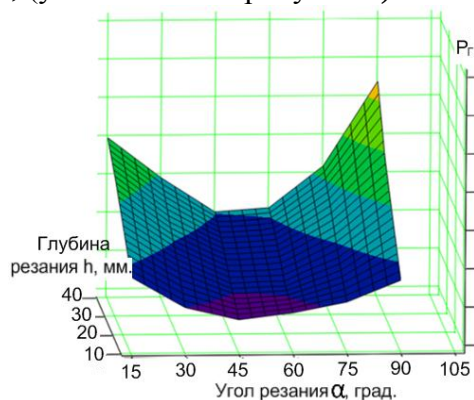
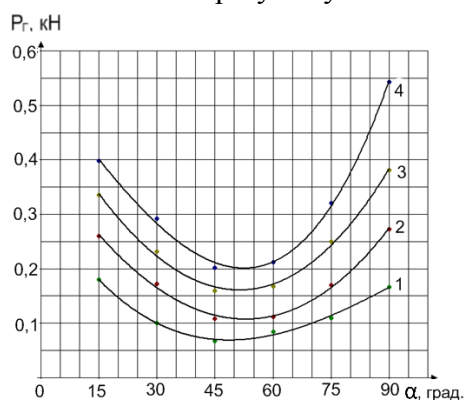


а

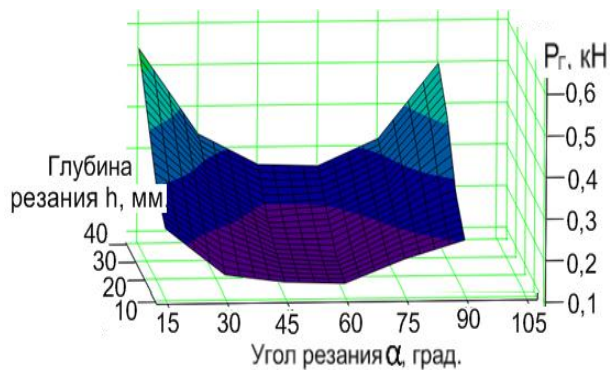
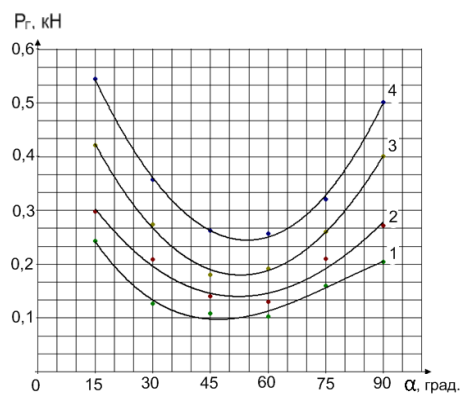


б

Рисунок 8 – Зависимость горизонтальной составляющей усилия резания от угла (α) и глубины (h) резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа при угле установки 45° ; (усл. обозн. см. рисунок 6)



а



б

Рисунок 9 – Зависимость горизонтальной составляющей усилия резания от угла (α) и глубины (h) резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа при угле установки 30° ; (усл. обозн. см. рисунок 6)

Анализ полученных зависимостей показал, что наименьшие значения горизонтальной составляющей усилия резания обеспечиваются при угле установки рабочего органа отвального типа $\delta = 45\text{--}30^\circ$ и угле резания $\alpha = 45\text{--}55^\circ$. При угле установки $\delta = 45^\circ$ уплотненные снежные образования легче срезаются, быстрее скользят по отвалу, а при угле установки меньше 40° происходит уменьшение ширины захвата, возникает опасность бокового заноса и увода снегоуборочной машины в сторону. Таким образом, установку рабочих органов отвального типа под углом $\delta = 45^\circ$ и углом резания $\alpha = 45\text{--}55^\circ$ можно рекомендовать к применению дорожно-эксплуатационным организациям. При данном угле установки обеспечивается перекрытие ширины базовой машины на 0,2–0,3 м. Зависимости боковой и вертикальной составляющих усилия резания от угла и глубины резания при угле установки рабочего органа отвального типа $\delta = 45^\circ$ приведены на рисунках 10–11. Выполнен расчет энергоемкости ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$) резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа по формуле:

$$E = 0,000272 \frac{P_{\Gamma}}{S}, \quad (1)$$

где P_{Γ} – значение горизонтальной составляющей усилия резания, кН; S – площадь среза, м^2 .

На основе проведенного расчета построены графические зависимости энергоемкости процесса резания от угла и глубины резания при угле установки $\delta = 45^\circ$ (рисунок 12).

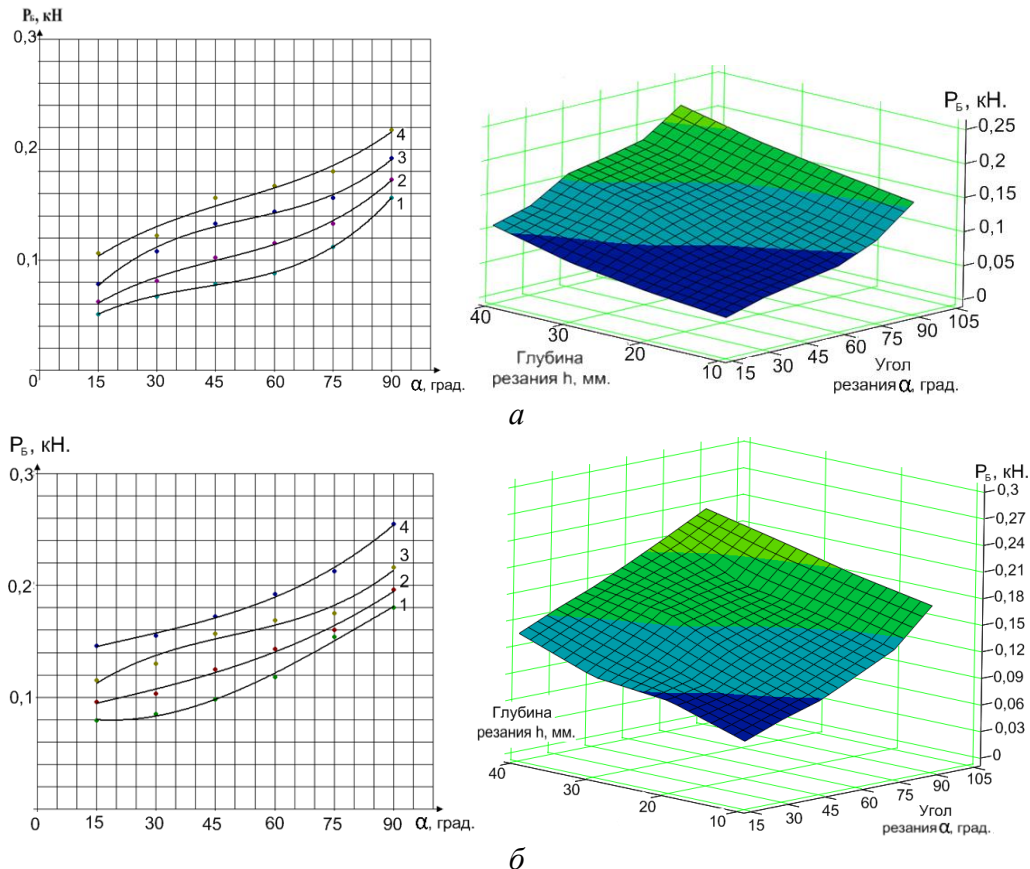


Рисунок 10 – Зависимость боковой составляющей усилия резания от угла (α) и глубины (h) резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа при угле установки 45° ; (усл. обозн. см. рисунок 6)

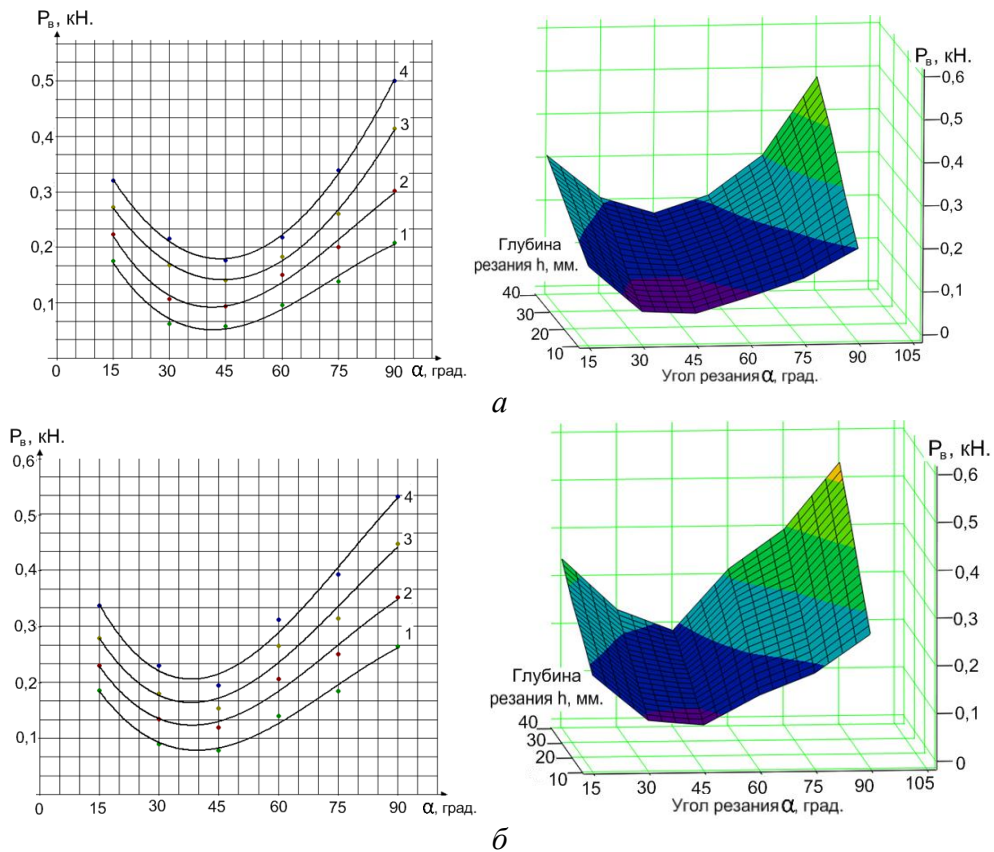


Рисунок 11 – Зависимость вертикальной составляющей усилия резания от угла (α) и глубины (h) резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа при угле установки 45° ; (усл. обозн. см. рисунок 6)

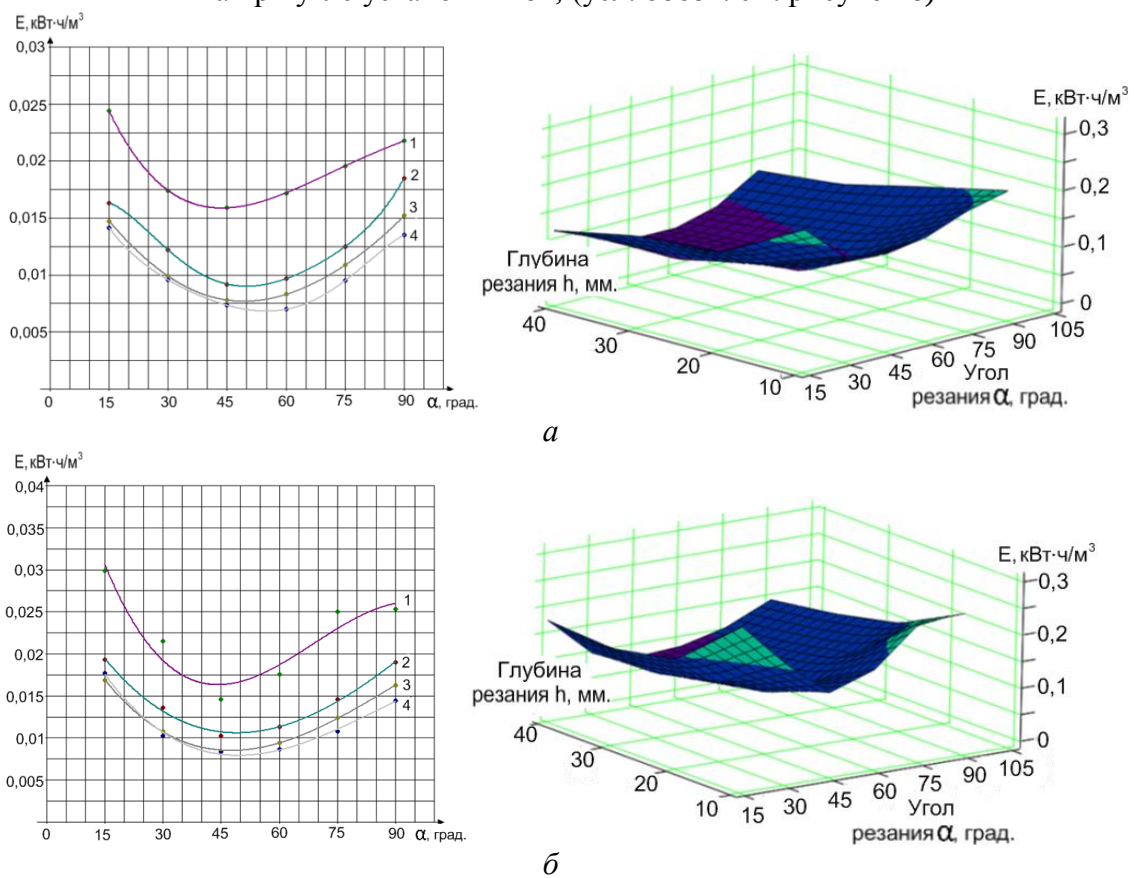


Рисунок 12 – Зависимость энергоемкости процесса резания от угла (α) и глубины (h) резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа при угле установки 45° ; (усл. обозн. см. рисунок 6)

Анализ полученных зависимостей показал, что наименьшая удельная энергоемкость резания уплотненных снежных образований рабочим органом отвального типа обеспечивается при угле резания $\alpha = 45\text{--}55^\circ$ во всем диапазоне значений глубины резания h (10, 20, 30 и 40 мм), т. е. при тех же условиях, при которых были получены минимальные значения горизонтальной составляющей усилия резания.

В четвертой главе на основе использования метода математического планирования многоуровневого полного факторного эксперимента ПФЭ 3^3 с тремя факторами в трех уровнях варьирования, получены регрессионные зависимости, связывающие параметры среза (угол установки δ , угол резания α , глубина резания h) и составляющие усилия резания, наглядно показывающие количественный вклад каждого из рассматриваемых факторов.

Регрессионные уравнения зависимости составляющих усилий резания от параметров среза при резании уплотненных снежных образований плотностью $450\text{--}500 \text{ кг/м}^3$ имеют следующий вид:

$$P_{\Gamma} = 0,2367 - 0,00237\delta + 0,00163\alpha + 0,00668h; \quad (2)$$

$$P_{\text{Б}} = -0,008 + 0,0021\delta + 0,001\alpha + 0,001215h; \quad (3)$$

$$P_{\text{В}} = -0,0258 + 0,0013\delta + 0,00263\alpha + 0,004h; \quad (4)$$

Проведена оценка адекватности (пригодности) полученных выражений по критерию Фишера и проверка на воспроизводимость результатов по критерию Кохрена. Расхождение данных, полученных экспериментальным путем, от данных, полученных по регрессионным уравнениям, составила от 15 до 20 %.

Уравнения регрессии, полученные на основе матрицы плана эксперимента, позволяют эффективно исследовать и определять силовые характеристики процесса резания уплотненных снежных образований

Разработана аналитическая математическая модель взаимодействия рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями, позволяющая рассчитывать значения горизонтальной составляющей усилий резания с учетом ширины, глубины, углов резания и установки рабочего органа, а также физико-механических свойств разрабатываемого массива.

Рабочий орган в каждый определенный момент времени при взаимодействии с уплотненными снежными образованиями рассматривался как обыкновенный клин. В условиях плоской деформации при вдавливании клина в полубесконечный массив, величину давления на грани клина P получим из уравнения Р. Т. Шилда.

$$P = C_0 \operatorname{ctg} \varphi_2 \left[\exp^{(2\theta \operatorname{tg} \varphi_2)} t g^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2} \right) - 1 \right], \quad (5)$$

где C_0 – сцепление снега, кН/м^2 ; φ_2 – угол внутреннего трения, град; θ – угол зоны радиального сдвига, рад.

При этом приняты следующие граничные условия: клин – абсолютно жесткий, среда однородная, пластические деформации сопровождаются появлением напряжений, которые подчиняются теории предельного состояния, по линиям скольжения касательные напряжения имеют одинаковые значения, завися-

щие от нормальных. Расчетная схема сил, действующих на рабочий орган отвального типа в процессе резания, показана на рисунке 13.

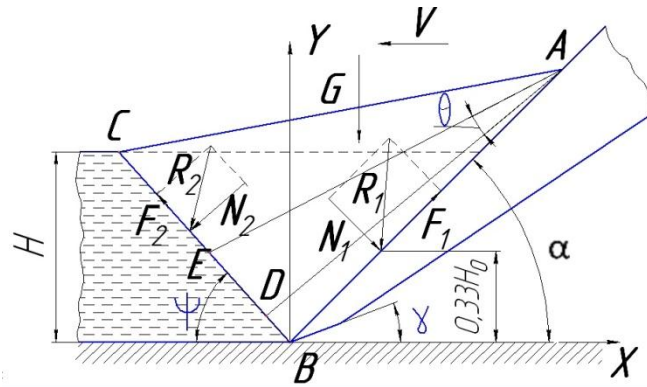


Рисунок 13 – Расчетная схема сил, действующих на рабочий орган отвального типа в процессе резания уплотненных снежных образований

На подвижную часть объема призмы волочения действуют результирующие силы: R_1 со стороны рабочего органа отвального типа от сил нормального давления $N_1 = P$ и трения F_1 ; со стороны разрабатываемого массива R_2 от сил N_2 и F_2 , которые уравниваются ее весом G . Силы трения описываются следующими выражениями:

$$F_1 = N_1 \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (6)$$

$$F_2 = N_2 \operatorname{tg} \varphi_2, \quad (7)$$

где φ_1, φ_2 – углы внешнего и внутреннего трения, град; N_2 – сила нормального давления со стороны разрабатываемого массива;

$$N_2 = G / \cos \psi; \quad (8)$$

где G – вес призмы волочения, кг; ψ – угол скола, град;

$$G = \frac{b^2 \cdot \cos \varphi_1 \cdot h \cdot \rho}{2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + \varphi_1)}; \quad (9)$$

где b – ширина отвала, м; φ_1 – внешнего трения, град; h – глубина резания, м; ρ – плотность снежных образований, кг/м³; α – угол резания, град;

Результирующие силы R_1, R_2 (рисунок 13) определяются следующими выражениями:

$$R_1 = \sqrt{N_1^2 + F_1^2}, \quad (10)$$

$$R_2 = \sqrt{N_2^2 + F_2^2}. \quad (11)$$

Значение горизонтальной составляющей усилия резания определяется через проецирование результирующих сил R_1 и R_2 на ось X и нахождением суммы полученных проекций, умноженной на $\sin$ угла установки δ рабочего органа:

$$R_{X1} = P_{\Gamma 1} = R_1 \sin \alpha; \quad (12)$$

$$R_{X2} = P_{\Gamma 2} = R_2 \sin \psi; \quad (13)$$

$$P_{\Gamma} = P_{\Gamma 1} + P_{\Gamma 2} = (R_1 \sin \alpha + R_2 \sin \psi) \sin \delta. \quad (14)$$

Уравнение (14) позволяет определить значение горизонтальной составляющей усилия резания уплотненных снежных образований рабочим органом отвального типа с учетом углов резания и установки рабочего органа, глубины и ширины резания, а также физико-механических свойств уплотненных снежных образований.

С целью получения наибольшей сходимости результатов экспериментов и результатов полученных с помощью математической модели, была разработана непараметрическая математическая модель в среде MATLAB. При разработке модели использовался непараметрический метод статистической обработки данных, в основе которого лежат оценки, предложенные Розенблаттом и обобщенные Парзенем. Проведена оценка достоверности математической модели путем сравнения значений составляющих усилия резания, полученных при математическом моделировании и экспериментальных исследованиях. Расхождение расчетных и экспериментальных значений горизонтальной составляющей усилия резания составило не более 9 %, боковой составляющей не более 4 %, вертикальной не более 10 %.

Разработана методика расчета усилий резания уплотненных снежных образований рабочим органом отвального типа, включающая следующие основные этапы: определение плотности снежных образований с помощью пружинного плотномера; определение прочности снежных образований с помощью твердомера либо с помощью приведенных в литературе графиков зависимости прочности от плотности; определение значений углов внешнего φ_1 и внутреннего φ_2 трения снежных образований графическим методом в соответствии с теорией Мора. Значения углов внешнего φ_1 и внутреннего φ_2 трения отражают влияние физико-механических свойств снежных образований на величину усилия резания.

По разработанной методике на основе математической аналитической модели произведен расчет горизонтальной составляющей усилия резания уплотненных снежных образований плотностью 400–450 кг/м³ моделью рабочего органа отвального типа шириной 0,25 м при угле установки $\delta = 90^\circ$, угле резания $\alpha = 45^\circ$ и глубине резания h (0,01 – 0,04 м.). Определены отклонения ΔP (%) расчетных значений горизонтальной составляющей усилия резания от экспериментальных. Сходимость расчетных и экспериментальных значений горизонтальной составляющей усилия резания достаточно высока (таблица 1), погрешность не превышает 14 %.

Таблица 1 – Сходимость расчетных и экспериментальных значений горизонтальной составляющей усилия резания

Глубина резания h , м.	$P_{Г \text{ расч.}}$, кН.	$P_{Г \text{ эксп.}}$, кН	ΔP %
0,01	0,164	0,18	8,8
0,02	0,3	0,26	13,3
0,03	0,35	0,31	11,4
0,04	0,49	0,44	10,2

По разработанной методике на основе математической непараметрической

модели рассчитаны значения горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих усилия резания уплотненных снежных образований плотностью 400–450 кг/м³ моделью рабочего органа отвального типа шириной 0,25 м при угле установки $\delta = 45^\circ$, углах резания $\alpha = 15\text{--}90^\circ$ и глубине резания h (0,03; 0,04 м.). Произведен расчет отклонений ΔP (%) расчетных значений составляющих усилия резания от экспериментальных. Построены графические зависимости расчетных и экспериментальных значений горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих усилия резания от угла и глубины резания (рисунок 14).

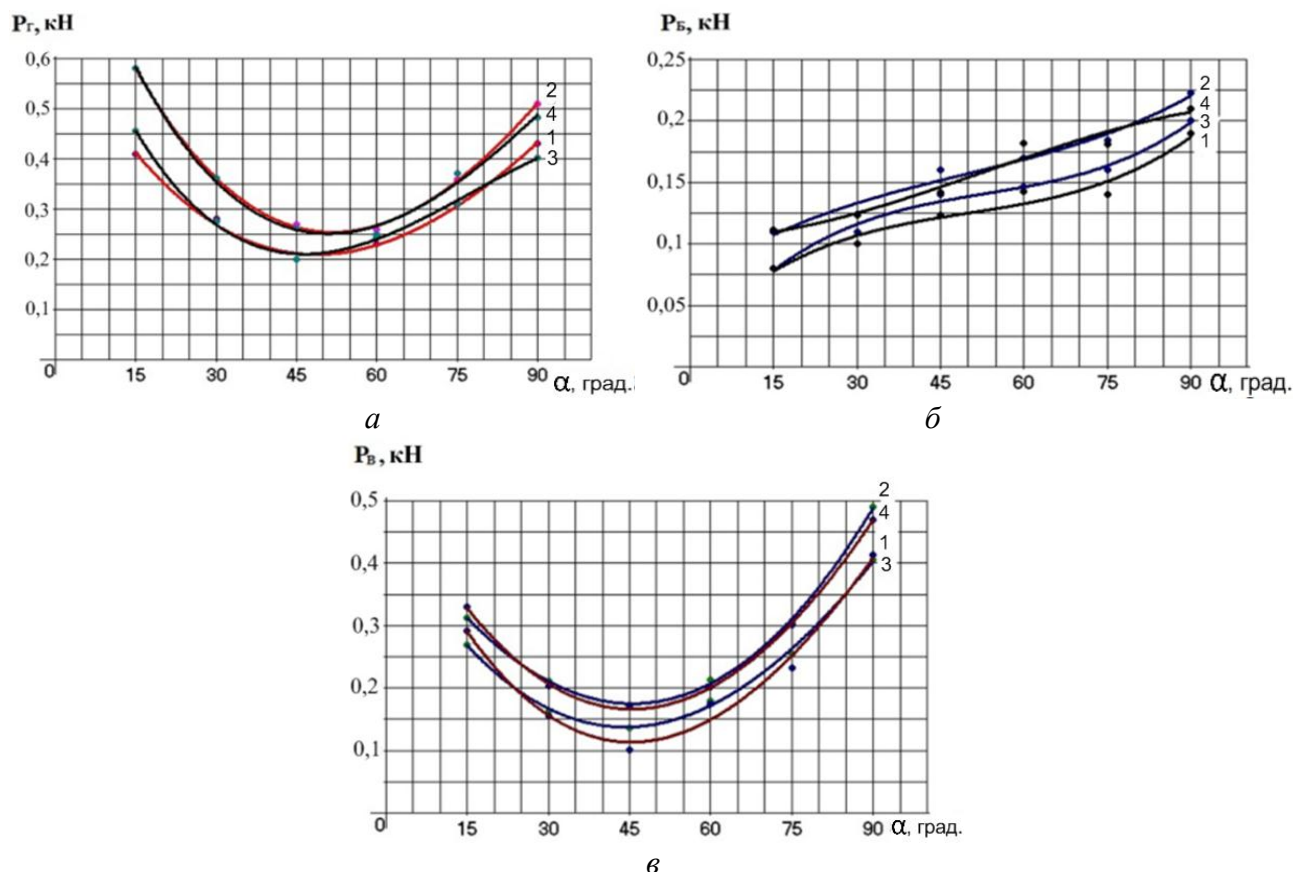


Рисунок 14 – Зависимости составляющих усилий резания от угла (α) и глубины (h) резания уплотненных снежных образований моделью рабочего органа отвального типа при угле установки 45° : *a* – горизонтальная составляющая; *б* – боковая составляющая; *в* – вертикальная составляющая: 1, 2 – кривые значений полученных экспериментально для глубины резания 30 и 40 мм; 3, 4 – кривые расчетных значений для глубины резания 30 и 40 мм.

Как следует из приведенных зависимостей, расчетные и экспериментальные значения горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих усилия резания имеют удовлетворительную сходимость, погрешность не превышает 10%.

Разработаны регрессионная, аналитическая и непараметрическая математические модели взаимодействия рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями, позволяющие осуществить прогноз изменения нагрузочных параметров, производительности и скорости снегоочистки дорожных покрытий. Разработана методика расчета усилий, возникающих при взаимодействии рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями, позволяющая повысить эффективность использования снегоуборочной техники оснащенной рабочими органами отвального типа.

Заключение

Основные результаты, выводы, рекомендации

1. Разработана методика контроля нагрузочных параметров возникающих при взаимодействии рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями и алгоритм выбора оптимальных параметров, позволяющие определить оптимальные параметры углов резания и установки рабочего органа.

2. Разработано средство контроля, позволяющее совместно с информационно-измерительным комплексом с высокой точностью (повторяемость результатов испытаний 88%) определять нагрузочные параметры, возникающие на моделях рабочих органов отвального типа при взаимодействии с разрабатываемым массивом.

3. Установлена зависимость составляющих усилие резания и энергоемкости процесса резания уплотнённых снежных образований от параметров углов установки рабочего органа, углов и глубины резания и плотности снега.

4. Разработаны регрессионная, аналитическая и непараметрическая математические модели взаимодействия рабочего органа отвального типа с уплотненными снежными образованиями учитывающие физико-механические свойства снега, параметры углов установки рабочего органа, углов, глубины и ширины резания. Расхождение расчетных значений составляющих усилие резания и полученных экспериментально не превышает 20 %.

5. Разработана методика расчета нагрузочных параметров возникающих на рабочем органе отвального типа при взаимодействии с уплотненными снежными образованиями позволяющая с учетом физико-механических свойств разрабатываемого массива, определять оптимальные параметры углов резания и установки, обеспечивающие повышение эффективности использования снегоуборочной техники. Расхождение значений составляющих усилие резания, рассчитанных в соответствии с методикой от значений, полученных экспериментально не превышает 14 %.

6. Для обеспечения повышения эффективности использования снегоуборочной техники и качественной очистки покрытий автомобильных дорог определены оптимальные параметры установки рабочего органа отвального типа: установлено, что при угле установки 45° и углах резания $45-55^\circ$, обеспечивается наименьшая энергоёмкость $0,01-0,022 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, также при углах резания $45-55^\circ$ наблюдаются наименьшие значения энергоемкости при всех рассматриваемых вариантах углов установки, на всем диапазоне величин глубины резания (10, 20, 30, 40 мм). При угле установки рабочего органа 45° обеспечивается оптимальное сочетание составляющих усилие резания и ширины перекрытия колеи автогрейдера на 0,2–0,3 м., а также снижение усилий резания на 45–50% по сравнению с углами установки $60-90^\circ$.

7. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Аэропорт Емельяново» (г. Красноярск) и в учебный процесс Института нефти и газа Сибирского федерального университета.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

а) статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. **Лысянников, А. В.** Исследование процесса резания уплотненного снега / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 6 – С. 98–101.
2. **Лысянников, А. В.** Тензометрическая головка для регистрации сопротивлений уплотненного снега резанию / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, И. В. Надежкин // Вестник Казанского технологического университета: Т. 15. № 12. – Казань: Изд-во Казан. национ. исслед. технол. ун-та, 2012. С. 146–148.
3. **Лысянников, А. В.** Влияние угла резания отвала на усилия и энергоемкость резания снежного наката / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер, Н. Н. Малышева, И. В. Надежкин // Вестник Казанского технологического университета: Т. 15. № 12. – Казань: Изд-во Казан. национ. исслед. технол. ун-та, 2012. С. 152–156.
4. **Лысянников, А. В.** Определение оптимальных параметров угла резания уплотненного снега рабочим органом отвального типа / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, И. В. Надежкин // Научный журнал «Известия Самарского научного центра Российской академии наук» – 2012. – № 2 – С. 384–387.
5. **Лысянников, А. В.** Определение усилий при резании снега рабочим органом отвального типа / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 2 – С. 95–98.
6. Желукевич Р. Б. Стенд для исследования прочности уплотненного снежного покрова аэродромов и дорожных покрытий / Р. Б. Желукевич, **А. В. Лысянников**, Ю. Ф. Кайзер // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 2 – С. 98–100.
7. **Лысянников, А. В.** Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с дорожных покрытий / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер, Н. Н. Малышева, И. В. Надежкин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 4 – С. 81–83.
8. **Лысянников, А. В.** Исследование процесса резания уплотненных снежных образований рабочим органом отвального типа / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер, Н. Н. Малышева, И. В. Надежкин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 4 – С. 84–87.
9. **Лысянников, А. В.** Результаты исследования процесса удаления уплотненного снега с дорожных покрытий / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, В. Г. Шрам // Вестник Таджикского технического университета. – 2012. – № 3 (19) – С. 93–97
10. **Лысянников, А. В.** Измерительное устройство для исследования рабочих органов дорожных машин / Р. Б. Желукевич, **А. В. Лысянников**, Ю. Ф. Кайзер, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева // Вестник Красноярского Государственного Аграрного Университета. – 2013. – № 1 – С. 107–109.

11. **Лысянников, А. В.** Влияние параметров отвального рабочего органа на энергоемкость процесса резания уплотненных снежных образований / А. В. Лысянников // Вестник Красноярского Государственного Аграрного Университета. – 2013. – № 1 – С. 114–117.

12. **Лысянников, А. В.** Прибор для измерения усилий в процессе резания / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич, Ю. Ф. Кайзер // Вестник Брянского государственного университета. – 2013. – № 1 (37) – С. 91–94.

б) патенты

13. **Пат. № 111149** Российская Федерация, МПК E01H 5/12 Рабочий орган для удаления снежно-ледяного наката с поверхности дорог и аэродромов / Р. Б. Желукевич, **А. В. Лысянников**, Ю. Ф. Кайзер, Ю. Н. Безбородов, Е. К. Фомичев; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011124434/13; заявл. 16.06.2011; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34.

14. **Пат. № 2461809** Российская Федерация, МПК G01N3/58 Стенд для измерения сопротивления грунтов и снежно-ледяных образований резанию / Р. Б. Желукевич, **А. В. Лысянников**, Ю. Ф. Кайзер, В. А. Ганжа; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011119793/28; заявл. 17.05.2011; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.

15. **Пат. № 2463407** Российская Федерация, МПК E01H5/12 / Устройство для разрушения снежно-ледяных образований на дорожных покрытиях / Р. Б. Желукевич, В. А. Ганжа, **А. В. Лысянников**, Ю. Ф. Кайзер, Ю. Н. Безбородов; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2011114706/13; заявл. 14.04.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.

в) материалы конференций

16. **Лысянников, А. В.** Определение оптимальных параметров установки отвала снегоуборочной машины с использованием тензометрической головки / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич // Материалы Всероссийского конкурса научно исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2012. С. 166–168

17. **Лысянников, А. В.** Повышение эффективности снегоочистки дорожных покрытий за счет использования комплекта навесного оборудования / А. В. Лысянников, Р. Б. Желукевич // Материалы работ победителей и лауреатов Всероссийского конкурса «Наукоемкие инновационные проекты молодых ученых». – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2012. – С. 166–168

Подписано в печать «__» _____ 2013 Формат 60x84/16
Усл. печ. л. ____ Тираж 100 экз. Заказ № ____

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел/факс (391) 206-26-58, 206-26-49
E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>