

Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт

Кафедра Строительных материалов и технологий строительства

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
И.Г. Енджиевская
подпись _____ инициалы,
фамилия « _____ »
_____ 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема: Малая механизация при
индивидуальном строительстве

08.04.01 Строительство

код и наименование направления

08.04.01.00.07 Комплексная механизация и автоматизация строительства
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель _____ проф., д-р. техн. наук Р.Т. Емельянов
подпись, дата _____ должность, ученая степень _____ инициалы, фамилия

Выпускник _____ Е.С. Дремин

подпись, дата _____ инициалы, фамилия

Рецензент _____ проф., д-р техн. наук В. И. Иванчура
подпись, дата _____ должностъ, ученая степень _____ инициалы, фамилия

Нормоконтролер _____ доц., канд. техн. наук Е.С. Турышева

Красноярск 2021

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Малая механизация при индивидуальном строительстве» содержит 69 страниц текстового документа, 24 иллюстрации, 18 формул, 50 использованных источников.

ЛЬДОУБОРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ, НАЛЕДИ, МЕРЗЛЫЙ ГРУНТ, Matlab*SIMULINK

Объектом являются процесс удаления наледей и загрязнений поверхности.

Предметом исследования являются оборудование по удалению наледей и поверхностных слоев загрязнения почвы

Целью диссертационной работы является разработка льдоуборочного оборудования по удалению наледей и поверхностных слоев загрязнения почвы

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

- 1) Разработать техническое предложение льдоуборочного оборудования;
- 2) Усовершенствовать имитационную модель льдоуборочного оборудования в среде Matlab*SIMULINK;
- 3) Создать ВИМ модель льдоуборочного оборудования;
- 4) Определить трудозатраты на выполнение проекта от внедрения результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|--|
| Введение..... | 4 |
| 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.1 Анализ климатической ситуации районов Севера и Арктики | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.2 Обзор существующего оборудования, применяемого для убор удаления наледей | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.3 Анализ предшествующих исследований | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ НАЛЕДЕЙ | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.1 Описание методов удаления наледей..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.2 Разработка математической модели..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.3. Определение оптимального режима резания | Ошибка! Закладка не определена. |
| 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЬДОУБОРЩИКА | Ошибка! Закладка не определена. |
| 3.1 Методика экспериментальных исследований | Ошибка! Закладка не определена. |
| 3.2 Планирование и обработка результатов | Ошибка! Закладка не определена. |
| 3.3 Разработка измерительной | |
| системы..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 4 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ . | Ошибка! Закладка не определена. |
| 4.1 Оптимальные режимы резания | Ошибка! Закладка не определена. |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | Ошибка! Закладка не определена. |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | Ошибка! Закладка не определена. |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | Ошибка! Закладка не определена. |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Зимнее содержание тротуаров и придомовых территорий, составляющих до 80% от общей площади жилого района, остается нерешенной проблемой городов и сельских населенных мест. Если содержание автомобильных дорог обеспечивается снегоочистителями на базе автомобилей и колесных тракторов, то механизированная уборка снега с тротуаров и остановок общественного транспорта практически отсутствует. Это объясняется отсутствием парка малогабаритной снегоуборочной техники, отвечающей технологическим требованиям и организации работ предприятий жилищно- коммунального хозяйства (ЖКХ), и отсутствию исследований в этой области. Анализ параметров немногочисленных образцов малых снегоочистителей отечественного и зарубежного производства, а также - трудоемкости работ показывает, что номинальная мощность двигателя, отнесенная к единице ширины отвала, и затраты энергии на 1 м³ убираемого снега у них в 1,5 - 2 раза больше, чем у «стандартных» снегоочистителей на базе автомобилей, при значительно меньшей скорости машины. Повышенная энергоемкость связана с тем, что «патрульная» уборка тротуаров не производится, и резать приходится уплотненный снег. Кроме того, работа у бордюров и посадочных площадок требует повышенной точности движений отвала, при ограниченном сцепном весе машины. Малогабаритные плужные снегоочистители массой до 100 кг развивают тяговое усилие 200-250 Н, что соответствует предельным возможностям колесного движителя по сцеплению. Для повышения сцепного веса необходимо минимизировать вертикальную составляющую силы сопротивления резанию, которая не только снижает реализуемую силу тяги по сцеплению, но и увеличивает энергоемкость процесса, так как полезную

работу совершают лишь горизонтальная составляющая силы сопротивления, уравновешиваемая силой тяги.

Таким образом, энергосберегающая технология снегоуборки тротуаров и остановок общественного транспорта усиливает необходимость снижения сопротивления резания на рабочем органе. Это возможно лишь на основе использования особенностей механических свойств снега, заключающихся в слабом сопротивлении этого материала действию растягивающих напряжений. Тем более, что их образованию способствуют конусообразные уплотненные ядра из сжатого снега, возникающие при движении отвала.

Проектирование снегоуборочных машин уже много лет производится на основе усредненных значений удельного сопротивления резанию. Это объясняется недостатком знаний о закономерностях изменения механических свойств снега, происходящих под действием давления со стороны рабочего органа и со стороны ранее разрушенного материала. Попытки применения теории предельного состояния сыпучих сред к разрушению машинами, не получили должного продолжения, несмотря на известную фундаментальную поправку профессора А.Н. Зеленина в отношении методики построения огибающей предельных кругов Мора для целого ряда анизотропных материалов. Применительно к снегу, такие исследования не проводились.

В работе предложен новый подход к выбору угла резания плужной снегоуборочной машины, основанный на отслеживании вертикальной составляющей усилия резания и сравнении его с требуемым.

Степень разработанности. Проблемам совершенствования систем технического зрения оборудования посвящены работы авторов И. П. Норенкова, В. А. Камаева, В. А. Сойфера, Я. А. Фурмана, М. Н. Фаворской, М. В. Фурса, А. Г. Кравец и других российских ученых, а также зарубежных ученых, среди которых, Р. Вудс, У. Прэтт, Т. Павлидис, R. Azuma, D. Zhang, M. Fiala и многие другие. Их работы в значительной мере способствовали повышению эффективности уборки льдообразований.

Однако проведенный анализ существующих исследований выявил недостаточность теоретического описания алгоритмов и технологии уборки льдообразований и экспериментальных исследований роботизированного оборудования

Целью диссертационной работы является разработка льдоуборочного оборудования по удалению наледей и поверхностных слоев загрязнения почвы.

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

- 1) Разработать техническое предложение льдоуборочного оборудования;
- 2) Усовершенствовать имитационную модель льдоуборочного оборудования в среде Matlab*SIMULINK;
- 3) Создать ВИМ модель льдоуборочного оборудования;
- 4) Определить трудозатраты на выполнение проекта от внедрения результатов работы.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Анализ климатической ситуации районов Севера и Арктики

Снег – форма атмосферных осадков, состоящая из мелких кристаллов льда. Относится к обложным осадкам, выпадающим на земную поверхность.

Снег образуется, когда микроскопические капли воды в облаках притягиваются к пылевым частицам и замерзают. Появляющиеся при этом кристаллы льда, не превышающие поначалу 0,1 мм в диаметре, падают вниз и растут в результате конденсации на них влаги из воздуха. При этом образуются шестиконечные кристаллические формы. Из-за структуры молекул воды между лучами кристалла возможны углы лишь в 60° и 120°. Основной кристалл воды имеет в плоскости форму правильного шестиугольника. На вершинах такого шестиугольника затем осаждаются новые кристаллы, на них — новые, и так получаются разнообразные формы звёздочек - снежинок.

При высокой температуре кристаллы неоднократно вертикально передвигаются в атмосфере, частично тая и кристаллизуясь заново. Из-за этого нарушается регулярность кристаллов, и образуются смешанные формы. Кристаллизация всех шести лучей происходит в одно и то же время, в почти идентичных условиях, и поэтому особенности формы лучей снежинки получаются столь же идентичны.

Уборка и утилизация снега являются важными задачами в жизни любого поселения. Чем больше площадь города и количество его жителей, тем больше проблем от наледи и сугробов на улицах.

Снег с территории города необходимо утилизировать по ряду причин:

- снег и лед могут привести к человеческим травмам и дорожно-транспортным происшествиям;

- весной талая вода может подтопить подвалы и цокольные этажи зданий, вследствие чего может произойти частичное разрушение домов
- накопившийся на кровле снег может обрушиться на пешеходов или городской транспорт;
- снег хорошо впитывает в себя химические загрязнения, отходы промышленных предприятий (показатели загрязнения снега с урбанизированных территорий превышают ПДК для рыбохозяйственных водоемов по NH_4 – в 1,2 раза, Al – в 12,2 раза, Fe – в 8,2 раза, Mn – в 5 раз; наиболее значительными и опасными являются загрязнения снега на дорогах, где снег содержит значительное количество противогололедных реагентов и нефтепродуктов, именно эти загрязнения оказывают дестабилизирующее влияние на водные экосистемы; опасность загрязненного снега с дорог связана с огромными плозадями дорог в территориальном балансе города)
- при таянии снега накопленные им вредные вещества попадают в почву, отравляя её и грунтовые воды.

1.2 Обзор существующего оборудования, применяемого для убора удаления наледей

Содержание дорог, площадей, внутри дворовых территорий в зимний период времени для сибирских регионов России является трудоемким и затратным процессом. Это связано с интенсивностью снегопадов, их продолжительностью, количеством выпавшего снега, а также температурой окружающего воздуха, ветрами и их резкими изменениями. Это представляет серьезные препятствия для бесперебойного и безаварийного движения транспортных средств и пешеходов. Поэтому территории города приходится систематически очищать от снега. Для этих целей применяют снегопогрузчики, распределители, шнекороторные, плужные, плужно-щеточные снегоочистители, что связано с применением все более сложных

машин, специализированных комплексов и систем их управления.

Стоимость процесса уборки снега возрастает с каждым годом. Это связано с тем, что возрастают требования, предъявляемые к дорожному полотну автомобильных дорог, уменьшается время, отведенное на уборку, большое количество автомобилей затрудняет работу снегоочистительной техники, особенно в центральных и исторических районах городов. Как показали исследования, транспортные расходы составляют 83% общей стоимости уборки снега, а расстояния до снегосвалок и снеготаялок постоянно увеличиваются, так как предъявляемые к ним экологические требования все дальше отодвигают их от населенных пунктов. Самой дорогой и трудоемкой операцией зимнего содержания дорог является удаление снега с проезжей части дороги.

Создание и поддержание качественного состояния автомобильных дорог и тротуаров в городских условиях, в течение всего срока их эксплуатации, является одной из основных задач муниципальных служб города.

В период всего срока эксплуатации дорог необходимо реализовывать их свойства по следующим показателям: скорости и непрерывности передвижения автотранспорта, обеспечения безопасности и интенсивности участников движения, общей массы и габаритов транспортных средств, включая экологические и эстетические показатели эксплуатации дорог. Изменения указанных показателей оказывает влияние на техническое состояние транспортных средств.

Результаты анализа статистических данных Гидрометцентра России показывает, что по Красноярскому краю средняя дата образования и разрушения устойчивого снежного покрова - 12/XI - 28/III, объем снегопереноса на 1 метр дороги - 1000 м³, средняя высота снежного покрова - 42 см. Это указывает на интенсивность снегопадов и возникающие, вследствие этого, транспортные затруднения при эксплуатации машин.

Основной расход ресурсов при зимнем содержании автомобильных дорог и тротуаров приходится на снегоуборочные работы. Этот вопрос актуален для всех северных стран мира (Россия, США, Канада, Дания, Норвегия, Финляндия).

В случае применения традиционной технологии все снегоуборочные работы выполняются механизированным способом с использованием типовых технологических комплексов, в состав которых, как правило, входит не менее четырёх видов машин – автогрейдеры, роторные снегоочистители, снегопогрузчики и бульдозеры (по две единицы каждого типа), а также соответствующий обслуживающий персонал, включая снегоуборщиков.

При этом усложняется содержание городских дорог, тротуаров, «карманов», к которым прилегают бордюры. Это приводит к повышению трудоемкости работ и утомляемости машиниста – оператора снегоуборочной техники. В соответствие с изложенным поставлена цель: повышение эффективности снегоуборочных машин в городских условиях.

Для уборки снега и льда на дорогах используется механическое воздействие, использование химических реагентов, растепление (искусственное таяние) снега, а также комбинированных систем. Выбор метода воздействия при уборке снега с дорог зависит от условий проведения работ в населённом пункте и состояния снежного покрова на дорогах. Очевидно, что энергоемкость снегоуборочных работ свежевыпавшего рыхлого снега ниже, чем слежавшегося и уплотненного снега и плотного льда. При этом проблема уборки снега с дорог решается с меньшими затратами труда и времени, если соблюдать сроки снегоочистки, который в соответствии с ГОСТ 50597-93 (п. 3.1.6) составляет около 5 часов.

Качество уборки снега зависит от используемых машин и рабочих органов, основными из которых являются машины с отвалами и щетками, снегопогрузчики фронтальные и лаповые, шнекороторные и фрезернороторные машины, снеготаялки. Простота конструкции, универсальность, а также возможность установки отвалов на трактора и

автомобили различных марок и типоразмеров объясняет рост парка таких снегоуборочных машин.

К основным показателям качества уборки снега с автомобильных дорог относятся следующие:

- ширина очищенной поверхности;
- толщина снега, которая образовалась с момента начала снегопада до начала снегоочистки или в перерывах между проходами снегоуборочной техники при снегоочистке;
- толщина уплотненного слоя снега на дороге;
- сроки окончания уборки снега с дороги;
- толщина уплотненного снега на тротуарах.

Практика механизированного ухода за дорогами и прилегающими территориями показывает, что оптимальные условия эксплуатации дорог могут быть обеспечены, несмотря на принимаемые меры снегозадержания, лишь при оснащении дорожно-эксплуатационной службы соответствующими современными механизированными транспортными средствами. Однако повышение эффективности очистки снега на дорогах общего пользования все еще остается актуальной задачей.

Очистка дорожных покрытий от наката включает в себя две технологические операции: разрушение наката и транспортировка его фрагментов.

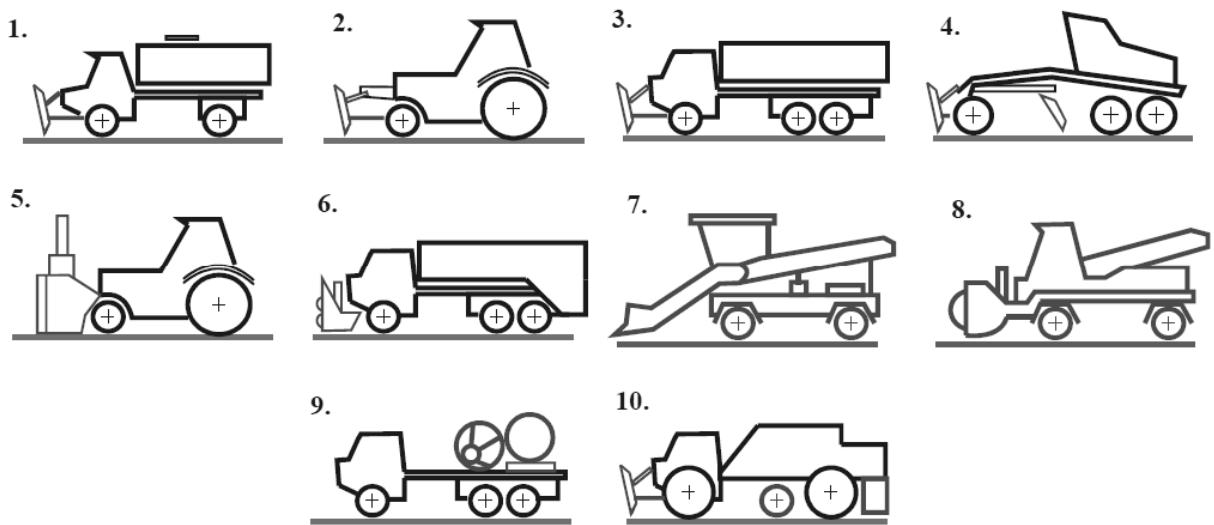
Основным процессом, определяющим производительность очистки, является процесс резания, то есть отделение от дорожного покрытия фрагментов наката режущим органом очистительных машин. Борьба с зимней скользкостью на автомобильных дорогах в зависимости от состояния покрытия и погодно-климатических условий ведется двумя способами:

- профилактическим, который проводится с целью предупреждения образования снежного наката или гололеда (гололедицы) и является наиболее

эффективным способом борьбы с зимней скользкостью при зимнем содержании дорог и улиц;

– ликвидационным, который проводится в случае уже образовавшегося наката для его ликвидации дорожно-эксплуатационной службой

С помощью снегоуборочной техники подметают, сгребают и грузят снег на грузовые автомобили для вывоза его в места сбора (на свалки снега и снеготаялки с последующим сливом в канализационную сеть). Для борьбы с накатом также применяют тепловые машины и распыление химических реагентов. С целью очистки от снега и наледи тротуаров, дорог и аэродромов используется следующая снегоуборочная техника (рисунок 1.1).



1 – плужный снегоочиститель на базе поливомоечной машины; 2 – плужный снегоочиститель на базе колесного трактора; 3 – плужный снегоочиститель на базе трехосного автомобиля; 4 – плужный снегоочиститель на базе автогрейдера; 5 – фрезерно-роторный снегоочиститель на базе колёсного трактора; 6 – шнекороторный снегоочиститель на базе трёхосного автомобиля; 7 – лаповый (скребковый) снегопогрузчик; 8 – шнековый (фрезерный) снегопогрузчик; 9 – ветровая машина; 10 – газоструйный снегоочиститель

Рисунок 1.1 – Машины для очистки дорог от снега

Снегоуборочная техника часто (но применительно к условиям России — отнюдь не всегда) основана на шасси самосвалов, с различными специальными приспособлениями, позволяющими им осуществлять уборку снега. Многие специалисты также используют автомобили меньших размеров на тротуарах, пешеходных дорожках и велосипедных дорожках. Дорожно-ремонтные агентства и подрядчики в умеренных и полярных районах часто владеют несколькими транспортными средствами зимнего сервиса, используя их, чтобы держать дороги свободными от снега и льда и безопасными для вождения в зимний период. Аэропорты используют снегоуборочную технику для очистки как поверхности самолётов, так и взлётно-посадочных полос и рулёжных дорожек от снега и льда, которые, помимо угрозы самолёту при взлёте и посадке, могут повлиять на аэродинамику судна.

Плужный (или плуговой) снегоочиститель — навесное оборудование для колёсной, гусеничной или путевой машины, предназначенное для удаления очистки от снега дороги или железнодорожного пути.

Плужный снегоочиститель — наиболее простой и дешёвый, а также наименее металлоёмкий рабочий орган для снегоочистки. Они получили значительное распространение благодаря простоте изготовления и системы навески на базовую машину [1 - 3]. Известны плужные снегоочистители с одним отвалом (они отбрасывают снег в одну сторону от очищаемого полотна) и с двумя отвалами (могут отбрасывать снег в одну или в обе стороны). В некоторых типах к переднему отвалу добавляются одно или два боковых отвала (крыла), которые отодвигают снег за пределы полотна. Передний снегоочиститель представляет собой отвал, снабжённый в нижней части ножом. Угол установки отвала может быть фиксированным, а может меняться в зависимости от условий работы.

Плужный снегоочиститель (рисунок 1.2) изготавливается в виде отвала или клиновидного плуга и имеет подъёмный механизм. Он отбрасывает снег по ходу движения в одну или в обе стороны. Угол установки отвалов плуга постоянен и составляет около 50 градусов к оси железнодорожного пути. Снегоочиститель может также снабжаться боковыми крыльями. В зависимости от конструкции и от наличия крыльев рабочая скорость машины с плужным снегоочистителем может составлять от 15 до 70 км/ч. При движении очищается полоса шириной от 3 до 5 метров, толщина сметаемого снежного слоя — от 20 сантиметров до полутора метров. Снег очищается на глубину до 5 сантиметров ниже головки рельса. Для установки снегоочистителя в рабочее положение используется дополнительный привод, который может быть механическим, гидравлическим или пневматическим.



Рисунок 1. 2 - Плужные снегоочистители

Плужные снегоочистители подразделяются на следующие виды:

- по типу шасси — пневмоколёсные (могут быть одно- и двухтвальными) и гусеничные (обычно двухтвальные);
- по типу базовой машины — автомобильные, тракторные и навесные (устанавливаются на тягач, автогрейдер, погрузчик или на собственное самоходное шасси);
- по тяговому усилию базовой машины (или по мощности её двигателя) — лёгкие (до 55 кВт, или 75 л. с.), средние (110 кВт, или 150 л. с.) и тяжёлые (более 110 кВт).

Различаются снегоочистители сдвигающего и отбрасывающего действия. Снегоочистители сдвигающего действия пригодны для работы на слежавшемся снеге высокой твёрдости и плотности, с их помощью могут прокладываться пути для транспортных колонн в снежных завалах большой высоты. Эти снегоочистители используются на малых скоростях, так как только тогда могут реализовываться необходимые высокие тяговые усилия. Снегоочистители отбрасывающего действия применяются на больших скоростях и используются при работе на небольших и неплотных отложениях снега (обычно на свежевыпавшем снегу). Применяются для регулярной очистки магистралей в патрульном режиме. При их использовании обязательно применяются защитные устройства, которые допускают смещение отвала по вертикали и горизонтали; это необходимо для предотвращения аварий при столкновении с непреодолимой преградой. Форма рабочей поверхности отвала у скоростных снегоочистителей подбирается так, чтобы снег отбрасывался в оптимальном направлении при наименьшем сопротивлении движению.

Базовые элементы плужного снегоочистителя включают в себя сам отвал или плуг, опорные устройства для него (лыжи или ролики, с их помощью регулируется высота установки отвала в рабочем положении), подвеску с толкающей рамой, амортизационную или предохранительную

систему, подъёмный механизм для приведения устройства в рабочее или транспортное положение[4][5].

Автомобильной промышленностью производятся снегоочистители для установки на различные виды транспортных средств, в том числе на пикапы, внедорожники и квадроциклы. Для обеспечения прочности соединения монтаж производится, как правило, на раму автомобиля, а все необходимые крепежные детали поставляются в комплекте с плугом. Размер отвала зависит от типа транспортного средства.

Фрезерно-роторное снегоуборочное оборудование (рисунок 1.3) устанавливаемое на тракторном, автомобильном шасси или на шасси фронтального погрузчика, используется для уборки свежевыпавшего или слежавшегося снега, а также снежных валов и насыпей с дальнейшей погрузкой убираемого снега в кузов грузового автомобиля или его отбрасыванием в сторону. Максимальная высота убираемых завалов слежавшегося снега – три метра.



Рисунок 1.3 - Фрезерно-роторное снегоуборочное оборудование

Шнекороторная снегоуборочная техника предназначена для переброски снежных валов и куч, образуемых при работе плужных снегоуборочных машин в сторону или погрузку снега в транспортные средства с помощью погружного жёлоба. Шнекороторное снегоуборочное оборудование, установленное на автомобили, тракторы или специальные шасси, используют для очистки от снега аэродромов, автомобильных дорог и т. д. при высоте снежного покрова до 1—1.4 м. При погрузке в транспортные средства снегоуборочная техника передвигается вдоль вала и выбрасывает снег через специальное погружное устройство (жёлоб) в кузов грузового автомобиля, следующего за ним. Основное назначение шнекороторных снегоуборочных машин заключается в выбросе снега. Поэтому при его погрузке их производительность снижается.

Шнекороторные снегоуборочные машины (рисунок 1.4) создаются на базе автомобильного и тракторного шасси. В наше время чаще других используют платформу полноприводных грузовых автомобилей «КАМАЗ» и «Урал», реже – «ЗИЛ». При этом собственный двигатель автомобиля демонтируют. Спереди устанавливают рабочее оборудование, а за кабиной – силовой агрегат. Он приводит в движение как ходовую часть, так и снегоуборочные механизмы. Чтобы компенсировать скорость вращения коленчатого вала двигателя, шнекороторное оборудование присоединяется через редуктор.



Рисунок 1.4 - Шнекороторный снегоуборочный агрегат

Для муниципальных служб наиболее предпочтительным вариантом представляется наличие коммунальной техники, оснащённой сменным шнекороторным снегоуборочным механизмом. Рабочий агрегат, установленный на колёсном или гусеничном шасси, можно заменить и использовать машину на других работах. Например, для погрузки сыпучих материалов, таких как песок или зерно. Высота снежного покрова, при которой возможно использование такой техники - 140 см.

Зачастую отбрасывание снега с городских дорог невозможно осуществить ввиду наличия тротуаров. Поэтому чтобы убрать снег, собранный вдоль дороги, необходимы специальные снегопогрузчики, которые могли бы транспортировать снежную массу в кузов сопровождающего грузовика (рисунок 1.6).

Разработки этих машин начались ещё в 20-х годах, а к 50-ым они стали применяться массово. Но если раньше их собирали на шасси серийных грузовых автомобилей, то сейчас разработаны специализированные снегопогрузчики лапового типа на собственной платформе.



Рисунок 1.5 - Специальные снегопогрузчики

Принцип работы таков, что широкая скребковая лопата захватывает снег и подаёт его на транспортёр цепного или ленточного типа. На нём расположены специальные зацепы для удержания снега. С ленты транспортёра снежная масса подаётся в кузов грузовика, едущего следом за погрузчиком. Высокая производительность машины позволяет за одну смену убирать до 1500 тонн снега.

На рисунке 1.5 представлено льдоуборочное оборудование на базе погрузчика "Боб-Кат".

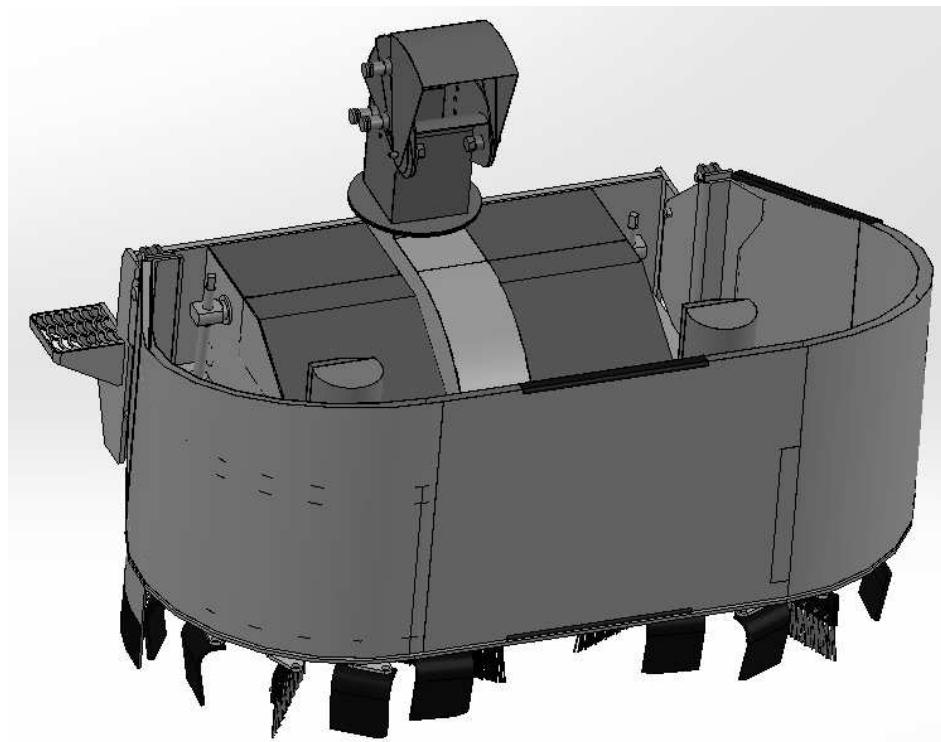


Рисунок 1.5 - Льдоуборочное оборудование на базе погрузчика "Боб-Кат"

1.3 Анализ предшествующих исследований

Методы совершенствования существующих и создание новых элементов гидромеханических трансмиссий гусеничных бульдозеров с учетом закономерностей процессов их взаимодействия с грунтом, снегом на основе экспериментальных исследований и компьютерного моделирования на этапе проектирования, испытаний и технической эксплуатации приведены в работе [1]. Приоритетными тенденциями развития землеройно-транспортных машин (ЗТМ), сформировавшимися к настоящему времени в мировой практике строительного и дорожного машиностроения, согласно проведенным исследованиям, являются повышение энергонасыщенности, гидрофицирование силовых трансмиссий, автоматизация машин и технологических процессов, повышение универсальности машин, повышение надежности и безопасности конструкций. Одним из наиболее прогрессивных направлений в развитии конструкций трансмиссий базовых тракторов ЗТМ является разработка и совершенствование гидромеханических трансмиссий

(ГМТ), которые позволяют совершенствовать управление машиной и снизить динамические нагрузки, так как, гидромеханическая передача позволяет автоматически бесступенчато, изменять скорость и вращающий момент в достаточно широком диапазоне при изменении сопротивления движению и нагрузки на рабочем органе. Гидротрансформатор значительно снижает крутильные колебания в трансмиссии, вызванные периодическими изменениями момента двигателя, а также защищает двигатель от перегрузок при резком повышении момента сопротивления, что позволяет повысить надежность двигателя и силовой передачи. Работа, посвящена совершенствованию методов оценки нагруженности элементов трансмиссионных систем бульдозеров на стадии проектирования, применительно к использованию гидротрансформаторов в трансмиссиях гусеничных строительных и дорожных машин легкого и среднего тягового класса, широко применяемых в строительстве. [1]

Вопросы использования GPS навигации в дорожном строительстве рассмотрены в статье [2]. Использование систем автоматизированного управления на базе GPS навигаторов завоевывает все большую популярность среди строителей. Из-за постоянно возрастающих требований к качеству строительной продукции появляется необходимость в повышении общего технического уровня работ, выполняемых строительными организациями. Точность выполнения снегоуборочных работ имеет большое значение. Особенно это актуально во время строительства путепроводов, дорог и аэродромов. В последнее время, выпуская GPS приемники для строительной отрасли и для проведения геодезических измерений, компании-производители интегрируют в них большое количество дополнительных приборов, чем превращают обычный приемник в целый мобильный комплекс, способный решать огромное количество поставленных перед ним задач. Так, интеграция в приемник тахеометра позволяет этим же прибором определить размер вертикального или горизонтального угла, построить горизонт или отвес и так далее. [2]

В статье [3] рассмотрен вопрос повышения качества содержания городских территорий от снега. На основании проведенного анализа используемых конструкций снегоуборочных машин, в том числе их рабочих органов, а также анализа патентов определено, что одной из основных машин являются фронтальные погрузчики. Этим объясняется разнообразие их конструкций, рабочих органов, создание и совершенствование таких машин многими известными мировыми производителями. Рабочий процесс содержит операции по сгребанию снега с поверхности дороги в насыпь и погрузку с насыпи в кузов самосвала или в места снеговалки. С целью повышения эффективности работы таких машин одним из экономически целесообразных подходов является модернизация ковша. Исследуется конструкция ковша с возможностью увеличения его ширины при сгребании снега с поверхности покрытия при уборке снега. На примере фронтального погрузчика «Амкодор 333» увеличение ширины сгребания снега с дорожной поверхности составит более 40 %. Увеличение ширины убираемого снега с поверхности позволяет уменьшить количество проходов погрузчика и, следовательно, снизить затраты и время на проведение работ. [3]

В статье [4] приведен анализ схем очистки дорог от снега и используемых при этом машин. В зависимости от условий возможны различные средства и способы уборки снега. При этом в большинстве способов используются машины с отвалами. Проведен анализ отвалов снегоуборочных машин и определены тенденции развития рабочих органов. Перспективно осуществлять модернизацию отвалов под необходимые условия уборки снега с дорог, и тротуаров, остановочных карманов, которые находящихся по высоте выше уровня автомобильных дорог. Решение в этом случае учитывает общие тенденции развития конструкций отвалов, основными из которых являются повышение подвижности отвала и разделение его на элементы. При этом использование гидравлического привода позволяет упростить конструкцию рабочего органа снегоуборочной машины. Эффект от внедрения результатов НИР определяется за счет

снижения количества проходов снегоуборочных машин и количества используемой техники. [4]

В данной статье [5] разрабатывается вариант плужного снегоочистительного отвала создается для того чтобы повысить производительность одной единицы техники при расчистке снега на широких улицах и сохранить при этом беспрепятственное перемещение в плотном потоке машин, а так же применение техники на узких улицах.

В данной статье [6] проанализированы особенности бульдозерного отвала с устройством стабилизации глубины резания грунта и снега. Представлены конструктивные схемы устройства стабилизации процессов резания и методы вычислений заглубляющих и выглубляющих сил, которые поддерживают параметры разработки грунта в оптимальном диапазоне. Бульдозеры с системой стабилизации глубины резания можно эффективно использовать на небольших участках при разработке снега стружкой большой толщины, при этом будет обеспечиваться быстрое наполнение призмы волочения, а также бульдозер не будет останавливаться. Такие устройства обеспечивают разработку ровной поверхности, что повышает эффективность и качество работ.

В данной статье [7] проанализированы особенности долговечности механизмов. Одним из недостатков существующих механизмов является недостаточная долговечность. Это объясняется тем, что в процессе взаимодействия отвала с снегом действует резко и быстро меняющаяся нагрузка, обусловленная неравномерностью прочностных свойств грунта и явлениями скола грунта. Отмеченное переменное силовое воздействие от отвала передаётся через толкающие брусья на базовую машину, а это снижает долговечность рабочего оборудования и базовой машины.

В результате проведенного диссертационного исследования, выполненного на актуальную тему, была решена научно техническая задача по повышению производительности транспортной техники, в частности бульдозеров, путем применения бульдозерного оборудования с переменным

углом резания [8]. Обоснована конструктивно-кинематическая схема подвески бульдозерного оборудования с шарнирным раскосом, которая обеспечивает при внедрении отвала в фунт максимальное значение угла резания с последующим его уменьшением по мере заглубления и выходом на установившийся режим резания.

Проведен анализ работы снегоуборочных машин в городских условиях [9]. Определено, что на эффективность уборки снега с дорог, тротуаров площадей влияют искусственные неровности (лежачие полицейские), бордюры и т.п. В соответствие с этим проведен анализ конструкций рабочих органов (отвалов), используемых в России и за рубежом, а также анализ патентов. В соответствие с изложенным все решения по управлению отвалом можно разделить: установка дополнительных рычажных систем; модернизация гидропривода; использование микропроцессоров; комбинирование указанных подходов. Очевидно, что использование процессорной техники оправдано для высокотехнологичных машин, как следствие имеет недостатки в цене, квалификации операторов, и ремонтного персонала. Для модернизации существующей техники, на данный момент, целесообразно использовать комбинированные системы с использованием рычажных систем и гидропривода. При этом необходимо учитывать энергосберегающие технологии.

В данной статье проанализированы параметры полусферического отвала бульдозера с дисковыми секциями [10]. Одним из перспективных направлений повышения эффективности бульдозеров является совершенствования конструкций отвалов путем улучшения их фанспортирующих (удерживающих и накопительных) свойств. Разработана математическая модель процесса копания грунта ПСОД и предложена зависимость для расчета сопротивления копанию, которая учитывает влияние двух свободно вращающихся дисковых ножей на процессы резания и перемещения грунта в объеме призмы волочения, что согласуется с

основными положениями гипотезы дробления горных пород применительно к разработке фунтов.

В данной статье проанализированы параметры уравновешивания рабочего оборудования гидравлического экскаватора [11]. Способ уравновешивания сил тяжести рабочего оборудования стреловой машины является средством повышения эффективности рабочих процессов машин за счет увеличения скорости подъема стрелы в два раза. Основными параметрами системы уравновешивания являются соотношение объемов газовых баллонов и уравновешивающего гидроцилиндра, давление газа в системе уравновешивания диаметр и длина уравновешивающего гидроцилиндра, способ подключения уравновешивающего гидроцилиндра к стреле. Разработана математическая модель процесса разгона и торможения рабочего оборудования, позволяющая исследовать быстропротекающие динамические процессы в сложной механической системе двигатель - гидронасос - рабочее оборудование.

В статье предлагается разработка прицепа для уборки снега [12]. С целью создания нового образца был проведен обзор существующего оборудования для уборки снега. Для оценки экономического эффекта были проведены расчеты целесообразности оборудования и его эффективности в практическом применении. Предлагается снегоуборочный прицеп с гидроприводом для патрульного обслуживания дорог и текущей очистки взлетно-посадочных полос и рулежных дорожек аэродромов в зимнее время. Данный прицеп является инновационным решение в области очистки дорог от снега. Также была рассчитана конструкция отвала, рамы, нагрузки на колеса.

В данной статье решена актуальная задача по повышению эффективности разработки валунистых россыпей путем направленной сегрегации песков с окатанными валунами и первичной классификацией их в призабойном пространстве, имеющая важное значение для развития горнодобывающей отрасли России. [13]

В данной статье проанализирована актуальная и важная задача повышения эффективности управления системами производственной и технической эксплуатации парка машин. Разработана экономико-математическая модель расчёта эффективного по структуре и составу парка машин с точки зрения комплексного рассмотрения систем производственной и технической эксплуатации. Разработанная математическая модель позволяет учесть. [14]

В данной статье выполнен анализ работ по моделированию динамики рабочих процессов ЗТМ, по управлению рабочими процессами ЗТМ, обзор методов адаптивного и интеллектуального управления [15]. Сделан вывод о целесообразности разработки адаптивных систем автоматического управления рабочими процессами ЗТМ, функционирующих на основе нейросетевых технологий. Разработана методика аналитико-имитационного моделирования рабочих процессов ЗТМ, согласно которой аналитические и имитационные модели подсистем рабочего процесса включаются в общую имитационную модель. Предложены математические модели случайных возмущений, действующих на ЗТМ со стороны неровностей микропрофиля грунтовой поверхности, а также вызванные неоднородностью свойств грунта. Для формирования случайных сигналов возмущений получены выражения передаточных функций формирующего фильтра, позволяющие учесть переменную скорость движения машины.

Представлен анализ современного состояния и развития конструкций ножей отвалов снегоуборочных машин. Выявлены преимущества и недостатки рассмотренных конструкций. Представлены основы нового принципа воздействия на разрабатываемую среду с помощью высокоимпульсных вибраций, применение которого позволит повысить эффективность рабочих органов дорожных машин [16].

Выводы

Подводя итоги можно сделать вывод, технологии уборки льдообразований и очистки мерзлого грунта от нефтяных образований представлены большим числом устройств и приложений. Однако эффективность и экономическая значимость требует дополнительных знаний по теории работы льдоуборочных машин в части совершенствования конструкций и разработки методов и алгоритмов контроля качества выполнения работ и мониторинга в реальном времени.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ НАЛЕДЕЙ

Рабочая гипотеза

При деформации снега существенно изменяются его механические свойства [29], поэтому условие постоянства угла внутреннего трения

противоречит физике процесса. Логично предположить, что угол ρ в формуле Кулона является функцией времени, также, как C_o и τ :

$$\tau = C_0 + \sigma \cdot \operatorname{tg} \rho. \quad (2.1)$$

Совокупность сведений о механических свойствах снега, в сочетании с возможностями и опытом математического моделирования процесса резания снега, позволяет принять следующую рабочую гипотезу о протекании процесса резания снега данной исходной плотности плужным рабочим органом машины.

- 1) Процесс резания состоит из двух последовательных фаз:
 - фазы достижения предельного состояния в точке с образованием тела скольжения;
 - фазы вытеснения тела скольжения с дальнейшим его измельчением под действием давления ранее разрушенного снега в призме волочения;
- 2) Внутреннее и внешнее трение снега непрерывно меняется в процессе движения рабочего органа, вследствие влияния температуры и нарушения состояния снега, поэтому значения составляющих силы сопротивления резанию, радиусы кругов и углы наклона касательных к кругам Мора, в каждый момент времени и для разных типов напряженных состояний различны.
- 3) Касательная, проведенная на плоскости $\sigma - \tau$ через точку с координатами $(0, C_0)$, полностью определяет положение текущего предельного круга Мора, имеющего радиус r , на плоскости $\sigma - \tau$.
- 4) Тип напряженного состояния в точке деформируемого объема определяется, для снега данной плотности, в основном, углом резания и толщиной стружки.
- 5) Значения составляющих силы сопротивления резанию в каждый момент времени однозначно связаны с внутренними усилиями через углы внешнего, внутреннего трения и давление призмы волочения.

6) Доля вертикальной составляющей в суммарной силе сопротивления резанию, совместно с радиусом предельного круга, касательным напряжением и углом наклона касательной, могут служить критериями оптимальности режима резания.

7) Управляемыми параметрами при оптимизации процесса резания снега конкретной плотности и температуры, являются угол резания и толщина стружки.

8) Применение при расчетах усредненного значения удельного сопротивления резанию не отражает действительных затрат энергии, так как не учитывается непрерывное изменение механических свойств снега под действием нагрузки.

2.1 Описание методов удаления наледей

Адаптация существующих и разрабатываемых рабочих органов дорожных машин к различным условиям эксплуатации может быть осуществлена путем их оснащения одиночным режущим инструментом, при его групповом размещении по схемам, обеспечивающим механическое разрушение разрабатываемых сред с малой энергоемкостью процесса и высокой производительностью оборудования.

Номенклатура одиночного режущего инструмента, которым преимущественно оснащаются рабочие органы машин, взаимодействующих с различными средами при их механическом разрушении, представлена в таблице 2.1

Таблица 2.1. – Одиночный режущий инструмент и область его применения

| Режущий инструмент | Область применения |
|--------------------|--|
| Зубья | Землеройные машины (ковшовые и роторные экскаваторы), бульдозерные рыхлители, грейдерные кирковщики, баровые и дискофрезерные машины |
| Резцы | Бурильные и землеройные машины, бесковшевые |

| | |
|---|---|
| | траншнейные экскаваторы |
| Дисковый режущий инструмент (дисковые ножи, дисковые резцы, дисковые шарошки) | Сельскохозяйственные орудия: лущильники, бороны, плуги, культиваторы, рыхлители; Рабочие органы горных машин, например, проходческих комбайнов; Бурильные и землеройные машины для разработки мерзлых грунтов |

Основными критериями выбора режущего инструмента, предназначенного для разработки твердых сред, являются минимальная энергоемкость процесса, максимальная производительность рабочего оборудования, оснащенного таким инструментом, и достаточная его долговечность. Зубья и резцы рабочих органов работают в условиях трения скольжения. Каждая точка режущей кромки такого инструмента контактирует с разрушаемой средой на протяжении всего периода их взаимодействия – от момента заглубления инструмента в разрушаемый массив, до момента его выглубления из него при завершении производственной операции. Следовательно, и величина пути трения каждой из этих точек, будет равна пути, пройденному режущей кромкой инструмента за указанный период времени.

Такой режим работы сопровождается повышенными динамическими нагрузками на режущий инструмент и рабочий орган в целом, способствует быстрому изнашиванию и поломкам инструмента.

Кроме того, существенным недостатком зубьев и резцов является малая ширина режущей кромки, что влечет за собой необходимость значительного уменьшения шага расстановки и увеличение количества единиц инструмента на рабочих органах. Снижению эффективности таких рабочих органов также способствует их низкая способность к выносу продуктов разрушения из забоя.

Дисковый режущий инструмент работает в условиях трения качения. Каждая точка его режущей кромки при перекатывании диска по забою

погружается в массив разрушающего материала по циклоиде только на величину глубины резания. При этом путь трения каждой из этих точек снижается в десятки раз по сравнению, например с путем трения точек, составляющих режущую кромку зуба. Точки тела диска, расположенные ближе к оси его вращения, погружаются в разрушающий массив по укороченным циклоидам, и их путь трения также уменьшается. В результате этого уменьшаются динамические нагрузки на навесное оборудование и на всю базовую машину в целом, снижается энергоемкость процесса, повышается долговечность инструмента, создается возможность увеличения скорости резания и значительного повышения производительности рабочего оборудования, оснащенного дисковым режущим инструментом.

Очевидными преимуществами дискового режущего инструмента по сравнению с зубьями и резцами и обусловлен его выбор для использования в данной диссертационной работе.

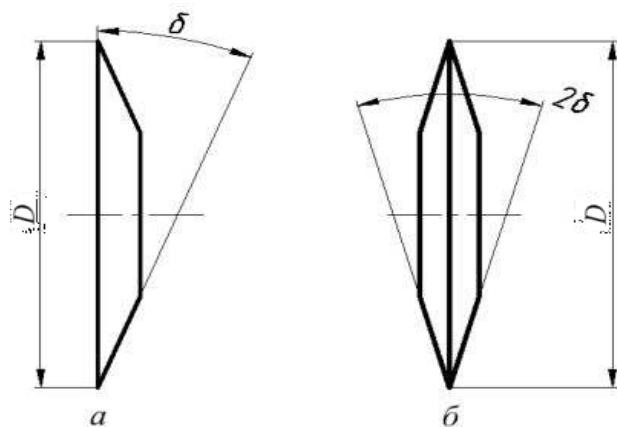
Известно о широком применении такого инструмента в конструкциях сельскохозяйственных орудий: лущильниках, боронах, плугах, культиваторах, рыхлителях [57–59], в проходческих комбайнах при разработке горных пород [60–64], а также в рабочих органах буровых [65], землеройных машин [66-67] и на бульдозерных рыхлителях [71-74] при разработке мерзлых грунтов.

Наибольшим многообразием геометрических параметров отличаются дисковые инструменты сельхозорудий. Это диски с гладким лезвием (плоские и сферические), сферические диски с V – образными вырезами, диски с пятью выпуклыми лопастями (в форме цветка), сферические вырезные диски с зубьями, режущие кромки которых выполнены по логарифмической спирали, заданной определенной формулой, сферические вырезные диски с шестью вырезами (в форме звезды с шестью вершинами), плоские шестиугольные диски с прямыми режущими кромками, прорезные диски лущильников и т.д.

Однако основной целью использования сельхозорудий, оснащаемых различным дисковым инструментом, является не разрушение разрабатываемой среды как таковое, а обеспечение агротехнических требований к обрабатываемой поверхности поля: соблюдению заданной глубины обработки, максимальному очищению полей от сорняков, созданию мелкокомковатой, хорошо выровненной поверхности и т.д.

Научное обоснование геометрических параметров инструмента дается учеными и специалистами отрасли при изучении процессов взаимодействия такого инструмента с почвой и растительными остатками. Выбор формы инструмента, его угла атаки, глубины обработки и скоростных режимов сельхозорудий зависит от принятых в соответствии с конкретными почвенно-климатическими условиями местности, способов основной обработки почв.

Высокоэффективным является оснащенное дисковым инструментом рабочее оборудование машин, предназначенных для механического разрушения горных пород и мерзлых грунтов. Здесь наиболее широкое применение получили дисковые инструменты (резцы, шарошки), форма которых изображена на рисунке 2.1.



а – тип А; б – тип Б

Рисунок 2.1 – Типы дискового инструмента

Конструкции зубчатых и штыревых шарошек в рамках данной работы не рассматриваются, поскольку они предназначены для разрушения прочных горных пород и сложны в изготовлении.

Дисковый резец типа А представляет собой вращающийся на оси диск с непрерывным односторонним клиновым ободом, перекатывающийся при работе по поверхности забоя и внедряющийся в нее под воздействием усилия подачи.

Дисковый резец типа Б имеет симметричный непрерывный двухсторонний клиновой обод и разрушает массив забоя, будучи ориентированным под прямым углом к его поверхности.

Широкомасштабные исследования процессов взаимодействия дискового режущего инструмента с горными породами при их разработке проходческими комбайнами проводились в Институте горного дела им. А. А. Скочинского (ИГД) Л. И. Бароном, Л. Б. Глатманом, С. Л. Загорским и др. [89–92].

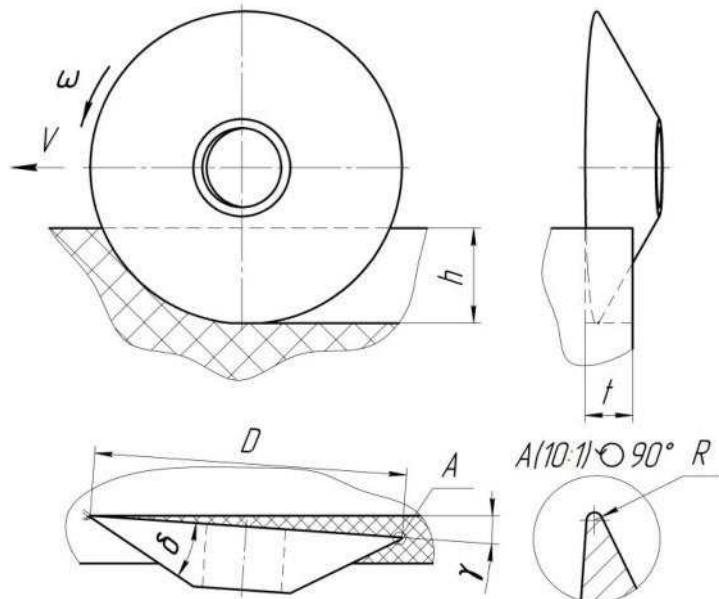
В работах лаборатории разрушения горных пород ИГД им. А. А. Скочинского применительно к дисковым резцам использовался термин «дисковая шарошка». Типы дисковых резцов А и Б, изображенные на рисунке 2.7, именовались соответственно тангенциальной и лобовой дисковыми шарошками. Особенность лобовой дисковой шарошки состоит в том, что она может быть размещена только под прямым углом к поверхности разрабатываемого забоя и перемещается вдоль и вглубь него с образованием в последнем борозды.

В отличие от лобовой, дисковая тангенциальная шарошка располагается под острым углом к поверхности забоя, работает в уступе и производит скол породы крупными фракциями в сторону обнаженных поверхностей (рисунок 2.2).

Диск шарошки выполнен в виде одностороннего усеченного конуса и углом заострения δ . Для уменьшения площади трения большего основания конуса об массив диск наклонен к уступу под углом γ , который называют «задним углом» или «углом атаки».

Перечисленными особенностями дисковой тангенциальной шарошки, возможностью размещения такого инструмента в различных

пространственных положениях, относительно поверхностей разрушаемого массива могут быть обеспечены рациональные углы резания и достаточное многообразие схем размещения этого инструмента на разрабатываемых рабочих органах.



h – глубина резания; t – шаг резания; γ – задний угол; δ – угол заострения; D – диаметр шарошки; R – радиус закругления рабочей (режущей) кромки

Рисунок 2.2. – Схема работы дисковой тангенциальной шарошки

Кроме того, известно, что энергоемкость процесса разрушения твердых сред дисковыми тангенциальными шарошками, на 20 – 30 % ниже, чем лобовыми.

По указанным причинам, именно дисковая тангенциальная шарошка, характеризуемая термином «Дисковый режущий инструмент» принята к использованию в данной диссертационной работе в качестве инструмента, предназначенного для оснащения им высокоэффективного снегоочистительного оборудования.

2.2 Разработка математической модели

В соответствии с поставленной целью, математическая модель процесса должна отражать энергетические затраты при работе снегоуборщика. Для этого необходимо установить количественную связь между сопротивлением среды, приведенным к рабочему органу, и внутренними усилиями, действующими в момент отрыва тела скольжения от массива.

Раннее была принята рабочая гипотеза о двухступенчатом механизме разрушения снежного массива. Установлена взаимосвязь НДС в точке объема призмы волочения с параметрами процесса резания и составляющими вектора сопротивления среды. Разработана методика идентификации предельного напряженного состояния среды по огибающей предельных кругов Мора. Выдвинутая гипотеза находится в полном соответствии с аналитическим подходом к определению угла сдвига при резании грунта, изложенным в работе Е.И. Берестова [33].

Принципиальное различие предлагаемой математической модели резания снега от модели резания грунта, предложенной профессором Е.И. Берестовым, заключается в непостоянстве величин внешнего и внутреннего трения в процессе резания снега и льда, из-за температурных изменений механических свойств снега в точке.

Так как количественное влияние температуры на сопротивление снега действию нормальных и касательных напряжений нам не известно, а также учитывая невозможность реализации чистого растяжения и сдвига, приходится ориентироваться на «почти оптимальные» режимы резания. Такие режимы были определены экспериментально, могут быть реализованы на практике, и по своим энергетическим показателям блики к оптимальным.

Главным критерием адекватности любой математической модели является соответствие получаемых с ее помощью результатов, опытным данным. Применительно к рассматриваемой проблеме, значение силы тяжести снега и объема призмы волочения, должна быть таким, которое после подстановки в уравнения математической модели, тождественно или с

допустимой погрешностью удовлетворяет экспериментальным значениям составляющих силы на рабочем органе.

Расчетная схема сил при резании (рисунок 2.3) включает силу R , направленную к нормали ножа под углом φ , и силу G давления снега призмы.

Сила R – суммарная сила, приложенная к отвалу: $R = \sqrt{P_B^2 - P_\Gamma^2}$ состоит из составляющих P_B и P_Γ , связанных через угол, a резания и угол φ внешнего трения.

$$\frac{P_B}{P_\Gamma} = \operatorname{ctg}(a + \varphi). \quad (2.2.1)$$

Нож наклонен к горизонтальной оси x под углом резания a , и снимает стружку толщиной h и шириной b . Стружка отделяется от массива в результате сдвига по площадке AB , наклоненной к оси x под углом сдвига ψ . На площадку сдвига действует реакция E , которая отклонена от нормали к площадке сдвига на угол p внутреннего трения. В плоскости сдвига сила E дает нормальную и касательную составляющие. Проектируя силы на оси x, z , получим два уравнения с неизвестными E, p .

$$\begin{cases} E \cdot \sin(\psi + p) - R \cdot \sin(a + \varphi) + C \cdot \cos \psi = 0 \\ E \cdot \cos(\psi + p) + R \cdot \cos(a + \varphi) + C \cdot \sin \psi - G = 0 \end{cases} \quad (2.2.2)$$

Согласно закону Кулона для сыпучей среды со сцеплением, касательная составляющая силы E включает силу сцепления, равную силе, которую надо приложить к неподвижному телу скольжения, перед началом его сжатия, в момент, когда $\sigma = 0$. В настоящее время не существует метода раздельной оценки величин сцепления и трения [31]. Если рассматривать трение как микросдвиги под действием σ , то силы сцепления физически схожи с силами трения, и всякое изменение давления сказывается на трении

и на сцеплении микрочастиц. Поэтому сила C , действующая вдоль площадки сдвига, состоит из мгновенной силы сцепления C_{MTH} и касательной составляющей силы E .

Схема сил резания снега и льда представлена на рисунке 2.3.

$$C = C_{MTH} + E \cdot \sin \rho \quad (2.3.3)$$

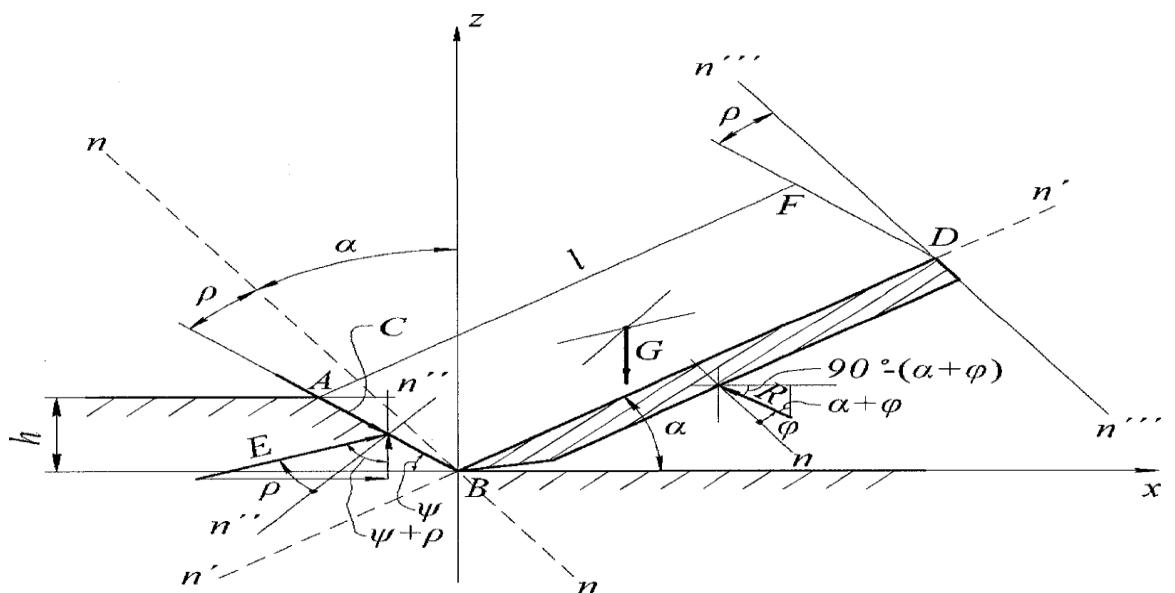


Рисунок 2.3 – Схема сил резания снега и льда

Подставив (2.2.3) в (2.2.2) и имея в виду тригонометрические зависимости [36], следующие из рисунка 2.3:

$$\begin{cases} \sin(\psi + p) = \cos a, \\ \cos(\psi + p) = \sin a \\ \sin \psi = \cos(a + \rho) \\ \cos \psi = \sin(a + \rho) \end{cases} \quad (2.2.4)$$

получим уравнения связи горизонтальной и вертикальной составляющих активных сил R , G с реакцией E и ее угловой координатой ρ .

$$\begin{cases} E \cdot (\cos a + \sin \rho \cdot \sin(a + \rho)) + C_{MTH} \cdot \sin(a + p) = P_\Gamma \\ E \cdot (\sin a - \sin \rho \cdot \cos(a + \rho)) - C_{MTH} \cdot \cos(a + p) = -P_B + G \end{cases} \quad (2.2.5)$$

где C_{MTH} - мгновенная сила сцепления, распределенная по поверхности сдвига

$$C_{MTH} = C_0 \cdot F_{CDB}$$

c_o - удельное значение мгновенной силы сцепления, отнесенное к единице площади сдвига, зависящее от состояния снега и принимаемое согласно [27].

Составляющие силы R (рисунок 2.4) находятся по формулам:

$$\begin{cases} P_B = R \cdot \cos(a + \varphi), \\ P_\Gamma = R \cdot \sin(a + \varphi) \end{cases} \quad (2.2.6)$$

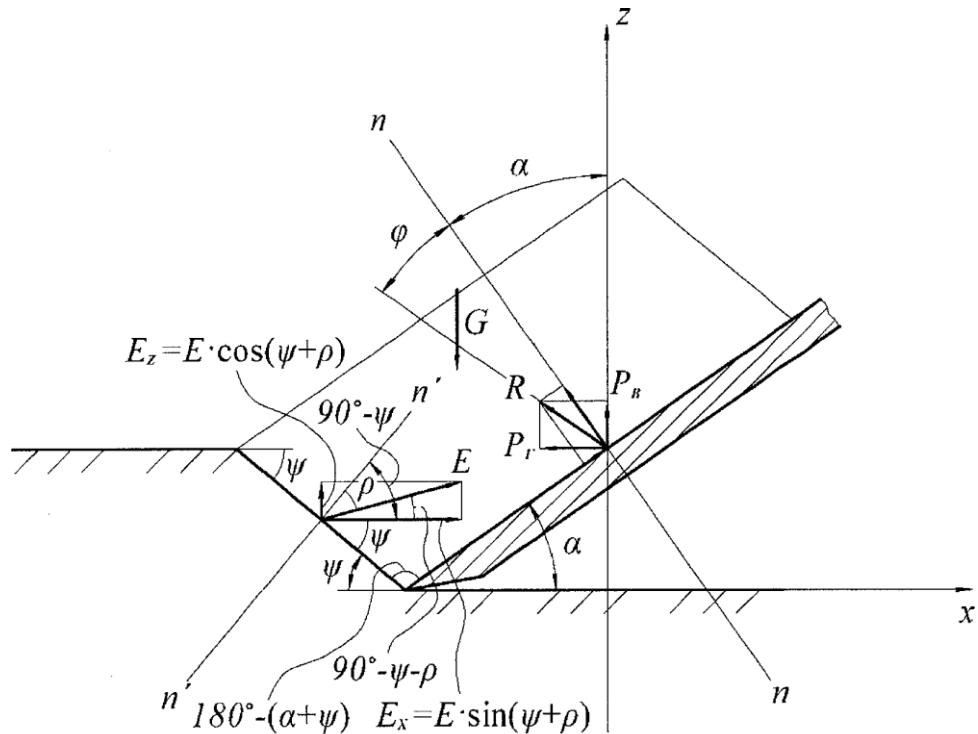


Рисунок 2.4 – Составляющие активных сил при резании снега

Напряжения на площадке сдвига:

$$\begin{cases} \sigma_\psi = \frac{E \cdot \cos p}{F_{CDB}} \\ \tau_\psi = c_0 \cdot \frac{E + \sin p}{F_{CDB}} \end{cases} \quad (2.2.7)$$

где $F_{cдв}$ – площадь сдвига, $F_{CDB} = \frac{h \cdot b}{\sin \psi}$.

Радиус круга Мора вычисляется по формуле:

$$\begin{cases} r = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \\ \operatorname{tg} 2\psi = \frac{\tau_\psi}{\sigma_\psi} \end{cases} \quad (2.2.8)$$

где p - значение угла внутреннего трения.

Сила G давления снега призмы волочения принимается равной:

$$G = 0,5 \cdot b \cdot h \cdot l \quad (2.2.9)$$

где l – путь резания;

γ – плотность снега

Уравнения (2.2.1), совместно с выражениями (2.2.2-2.2.9), являются математической моделью процесса резания. Они позволяют определить внутренние усилия и углы внешнего и внутреннего трения по значениям давления призмы и составляющих силы на рабочем органе.

2.3 Определение оптимального режима резания

Ранее были установлены показатели, характеризующие степень оптимальности режима резания:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{P_B}{R} \right) = \left(\frac{P_B}{R} \right)_{\min} \\ \left(\frac{R}{h} \right) = \left(\frac{R}{h} \right)_{\min} \\ r = r_{\min} \\ \sigma_1 > 0 \\ \tau = \tau_{\max} \\ \rho = \rho_{\min} \end{array} \right. \quad (2.3.1)$$

Эти показатели связаны с энергоемкостью рабочего процесса через необратимые внутренние процессы в материале, вызываемые внешней силой R .

Энергоемкость рабочего процесса снегоуборщика можно определить непосредственно через работу силы R на пути резания l .

$$\mathcal{E} = \frac{R \cdot l}{h \cdot b \cdot l} \quad (2.3.2)$$

откуда следует, что энергоемкость пропорциональна отношению $\frac{R}{h}$.

Эта величина может служить обобщающим показателем эффективности режима резания, однако, она не пригодна для целей управления процессом. Необходимо иметь базу для сравнения и выработки управляющего воздействия на угол резания при заданной толщине стружки.

Такой сравнительной базой может служить зависимость $\frac{R}{h} = f(a, \varphi)$.

Таким образом, оптимизационная задача состоит в определении минимального $\frac{R}{h} = f(a, \varphi)$. в области:

Таким образом, оптимизационная задача состоит в определении минимального значения $\left(\frac{R}{h}\right)_{\min} = \min(f(a, \varphi))$ в области:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{P_B}{R} \right) = \left(\frac{P_B}{R} \right)_{\min} \\ \left(\frac{R}{h} \right) = \left(\frac{R}{h} \right)_{\min} \\ r = r_{\min} \\ \sigma_1 > 0 \\ \tau = \tau_{\max} \\ \rho = \rho_{\min} \end{array} \right. \quad (2.3.3)$$

Обеспечить оптимальность можно за счет соответствующего изменения угла резания и толщины стружки. Поскольку прочность снега существенно повышается с увеличением плотности, энергетически выгодно и технологически целесообразно снимать стружку за один проход. Тогда единственным управляемым параметром является угол резания.

Для каждого большого сдвига, построен предельный круг Мора, фактический радиус и угол внутреннего трения, после чего определяются все текущие характеристики режима резания (таблицы 2.2 – 2.4; рисунки 2.5 - 2.7).

Вычисления и построения были произведены в среде Mathcad 14 [26] с использованием графического редактора AutoCAD.

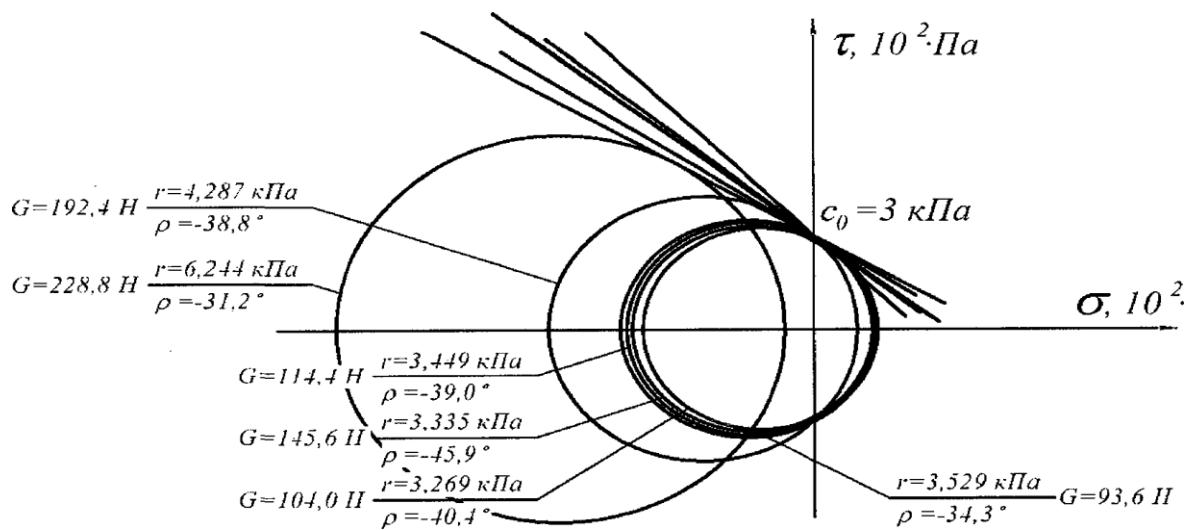
В качестве примера определения оптимального режима, приведены результаты для одного из исследованных режимов резания (таблица 2.2).

Рассматривая результаты, представленные в таблице, приходим к следующим выводам. По мере набора призмы волочения и монотонного увеличения силы давления G и суммарной силы R , значение $\frac{R}{h}$

увеличивается с 2,0 до 2,95 кН/м, причем при $\frac{R}{h} = 2,0$ кН/м все показатели оптимальности принимают экстремальные значения, кроме $\rho = -34^\circ > \rho_{\min} = -30^\circ$. Рассматривая значения аналогичных параметров, полученные при $a = 35^\circ$ и $a = 45^\circ$ (таблицы 2.3, 2.4), замечаем, что при $a = 35^\circ$ $\frac{R}{h} = 2,81 \div 4,21$ кН/м; при $a = 45^\circ$ $\frac{R}{h} = 2,26 \div 3,38$ кН/м. При том и другом a , минимальное значение $\left(\frac{R}{h}\right)_{\min}$ достигается при $r = r_{\min}$.

Таблица 2.2 – Результаты расчета параметров резания снега (плотность 400 кг/м³; температура -6...-2°; $a=35^\circ$; $h= 50$ мм)

| Параметр | G, Н | | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 93,6 | 104,0 | 114,4 | 145,6 | 192,4 | 228,8 |
| P_B , Н | 22,6 | 14,5 | 20,8 | 17,7 | 49,1 | 31,9 |
| P_e , Н | 138,0 | 140,0 | 145,0 | 162,0 | 181,0 | 236,0 |
| φ , град | 45,7 | 49,1 | 46,8 | 48,8 | 39,8 | 47,3 |
| E , Н | 168,1 | 171,9 | 177,7 | 193,8 | 219,5 | 290,5 |
| p , град | -34,3 | -40,4 | -39,0 | -45,9 | -38,8 | -31,2 |
| σ , Па | 3472,4 | 3261,3 | 3442,8 | 3309,5 | 4265,2 | 6198,5 |
| τ , Па | 634,9 | 228,2 | 208,6 | -418,1 | -434,4 | -756,2 |
| ψ , град | 5,2 | 2,0 | 1,7 | -3,6 | -2,9 | -3,5 |
| r , Па | 3529,9 | 3269,3 | 3449,1 | 3335,8 | 4287,3 | 6244,5 |
| σ_1 , Па | 1664,0 | 1751,0 | 1673,0 | 1597,0 | 1177,0 | -854,0 |
| R , Н | 139,8 | 140,7 | 146,5 | 162,9 | 187,5 | 238,2 |
| P_B/R | 0,16 | 0,10 | 0,14 | 0,11 | 0,26 | 0,13 |
| R/h , Н/м | 2796,8 | 2814,9 | 2929,7 | 3259,3 | 3750,8 | 4762,9 |

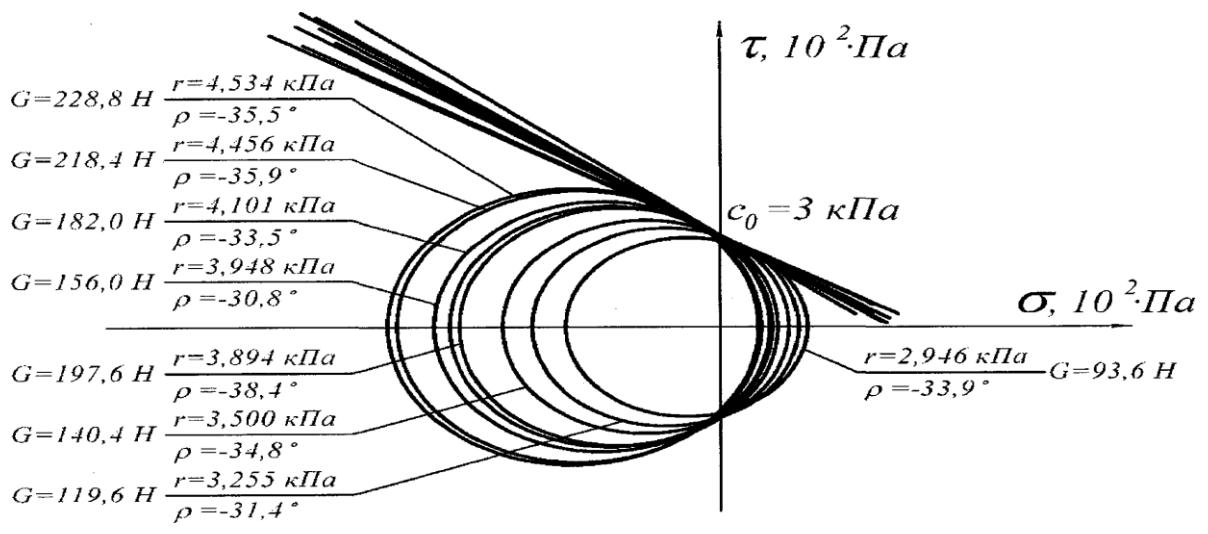


снег плотностью 400 кг/м температура -6...-2°C; $a = 35^\circ$; $h = 30$ мм

Рисунок 2.5 – Круги Мора

Таблица 2.3. – Результаты расчета параметров резания снега (плотность 400 кг/м³; температура -6...-2°; $a=45^\circ$; $h= 50$ мм)

| Параметр | G, H | | | | | |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 93,6 | 104,0 | 114,4 | 145,6 | 192,4 | 228,8 |
| P_B , Н | 47,0 | 61,0 | 44,0 | 51,0 | 52,0 | 53,0 |
| P_c , Н | 103,0 | 115,0 | 125,0 | 139,0 | 144,0 | 141,0 |
| φ , град | 20,5 | 17,1 | 25,6 | 24,8 | 25,1 | 24,4 |
| E , Н | 132,7 | 147,1 | 170,6 | 186,9 | 200,3 | 199,9 |
| p , град | -33,9 | -31,4 | -34,8 | -30,8 | -33,5 | -38,3 |
| σ , Па | 2699,5 | 3050,9 | 3447,4 | 3889,8 | 4091,6 | 3893,5 |
| τ , Па | 1180,2 | 1135,8 | 605,8 | 678,6 | 290,9 | -80,6 |
| ψ , град | 11,8 | 10,2 | 4,9 | 4,9 | 2,0 | -0,6 |
| r , Па | 2946,2 | 3255,4 | 3500,3 | 3948,6 | 4101,9 | 3894,3 |
| σ_1 , Па | 2126,0 | 1922,0 | 1684,0 | 1270,0 | 1203,0 | 1410,0 |
| R , Н | 113,2 | 130,2 | 132,5 | 148,1 | 153,1 | 150,6 |
| P_B/R | 0,42 | 0,47 | 0,33 | 0,34 | 0,34 | 0,35 |
| $R/h, \text{Н/м}$ | 2264,3 | 2603,5 | 2650,4 | 2961,2 | 3062,0 | 3012,6 |

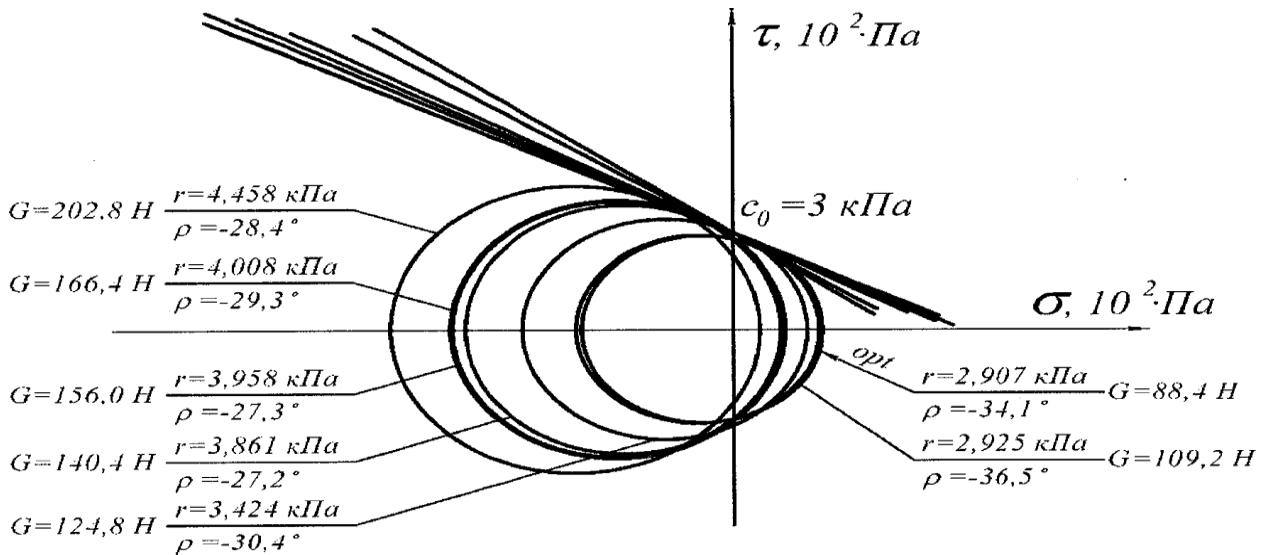


снег плотностью 400 кг/м³ температура -6...-2°C; $a = 45^\circ$; $h = 30$ мм

Рисунок 2.6 - Круги Мора

Таблица 2.4. – Результаты расчета параметров резания снега (плотность 400 кг/м³; температура -6...-2°; $a=55^\circ$; $h= 50$ мм)

| Параметр | G, H | | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 93,6 | 104,0 | 114,4 | 145,6 | 192,4 | 228,8 |
| P_B, H | 24,9 | 28,2 | 33,1 | 29,9 | 37,7 | 34,4 |
| P_e, H | 96,9 | 96,0 | 115,0 | 131,0 | 133,0 | 130,0 |
| $\varphi, \text{град}$ | 20,6 | 18,6 | 18,9 | 22,1 | 19,2 | 20,2 |
| E, H | 136,7 | 145,2 | 165,5 | 188,3 | 194,4 | 199,9 |
| $p, \text{град}$ | -34,1 | -36,5 | -30,4 | -27,2 | -27,3 | -29,3 |
| $\sigma, \text{Па}$ | 2643,2 | 2767,6 | 3244,5 | 3703,2 | 3824,2 | 3928,4 |
| $\tau, \text{Па}$ | 1211,2 | 949,6 | 1096,5 | 1093,2 | 1024,1 | 795,1 |
| $\psi, \text{град}$ | 12,3 | 9,5 | 9,3 | 8,2 | 7,5 | 5,7 |
| $r, \text{Па}$ | 2907,5 | 2925,9 | 3424,8 | 3861,2 | 3958,9 | 4008,0 |
| $\sigma_1, \text{Па}$ | 2153,0 | 2060,0 | 1770,0 | 1253,0 | 1141,0 | 1190,0 |
| R, H | 100,1 | 100,1 | 119,7 | 134,4 | 138,2 | 134,5 |
| P_B/R | 0,25 | 0,28 | 0,28 | 0,22 | 0,27 | 0,26 |
| $R/h, \text{H/m}$ | 2000,9 | 2001,1 | 2393,4 | 2687,4 | 2764,8 | 2689,5 |



снег плотностью 400 кг/м температура -6...-2°C; $a = 55^\circ$; $h = 30$ мм

Рисунок 2.7 – Круги Мора

Таким образом, при толщине стружки $H = 50$ мм оптимальным для данного снега, является угол резания $a = 55^\circ$, обеспечивающий минимальную энергоемкость процесса резания по (2.3.3)

$$\varTheta = \frac{\left(\frac{R}{h}\right)}{b} = \frac{2}{0,8} = 2,5 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м}^3 \quad (2.3.4)$$

Коэффициент резания равен:

$$k_{pes} = \frac{R}{h \cdot b} = \frac{100,05}{0,05 \cdot 0,8} = 2500 \text{ Па} \quad (2.3.5)$$

Согласно [27] расчетное значение $k_{pes} = 8000$ Па, что соответствует снижению энергоемкости в $\frac{8000}{2500} = 3,2$ раза.

Анализ результатов расчетов и графические построения (рисунки 2.5-2.7) позволяют не только установить оптимальные режимы резания, но и

проследить некоторые закономерности изменения свойств снега при взаимодействии с отвалом.

Важнейшей закономерностью является наличие растягивающих напряжений практически при всех типах напряженных состояний ($\sigma_1 > 0$) и близость к минимуму угла внутреннего трения и радиуса круга Мора.

Выводы

- 1) Разработана математическая модель процесса разрушения снега, устанавливающая связь внешнего воздействия с параметрами предельного напряженного состояния;
- 2) Установлены признаки оптимальности режима резания;
- 3) Определены численные значения параметров резания, близкие к оптимальным, для представительных видов снега, при различных значениях угла резания и толщины стружки;
- 4) Созданы необходимые условия для проведения вычислительного эксперимента, обобщения результатов, формирования базы данных и разработки методики инженерного расчета.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЬДОУБОРЩИКА

Целью экспериментального исследования является проверка выдвинутой рабочей гипотезы о механизме разрушения снега плужным рабочим органом и определение реализуемых режимов резания, близких к оптимальному, для снега различной плотности.

3.1 Методика экспериментальных исследований

Основная цель экспериментальных исследований - проверка адекватности выдвинутой рабочей гипотезы и получение необходимых данных для разработки математических моделей процесса разрушения снега при взаимодействии с плужным рабочим органом малого снегоочистителя.

Экспериментальное исследование процесса резания льда рабочим органом проводилось в зимний период 2021 года. Испытания проводились на модели рабочего органа в натурных условиях.

На основе обзора научных исследований, приведенных в первой и второй главах, можно сформулировать следующие задачи экспериментальных исследований:

- 1) Проверить скачкообразность изменения силы сопротивления рабочем органе при его взаимодействии со снегом и льдом, из-за непрерывно образующихся поверхностей скольжения.
- 2) Получить численные значения горизонтальной и вертикальной составляющих сопротивления резанию снега плужным рабочим органом, применительно к представительным видам снега и различным режимам процесса резания.
- 3) Построить предельные круги Мора для представительных видов снега и льда.

3.2 Планирование и обработка результатов

Эксперимент проводился по центральному композиционному ротатабельному плану второго порядка с одновременным изменением нескольких факторов согласно методике многофакторного планирования [24–26]. Этот метод позволяет уменьшить число опытов в несколько раз, получить количественную оценку влияния факторов, отыскать подходящую математическую модель.

Принятые в исследовании уровни и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры лабораторного стенда «грунтовый канал»

| Факторы | Кодовое обозначение | Интервалы варьирования | Натуральные уровни факторов, соответствующие кодированным | | |
|-------------------------|---------------------|------------------------|---|----|----|
| | | | +1 | 0 | -1 |
| a - угол резания, град | X1 | 10 | 55 | 45 | 35 |
| h – толщина стружки, мм | X2 | 25 | 70 | 50 | 25 |

При выборе варьируемых факторов учитывались: доступность и точность их измерений и фиксирования; возможности лабораторного стенда; результаты исследований, проведенных ранее.

Опыты проводились, согласно матрице планирования эксперимента таблице 3.2 с трехкратным повторением в различных точках факторного пространства.

Обработка, полученных в исследованиях данных, проводилась с использованием методов математической статистики.

Таблица 3.2 – Матрица планирования

| № опыта | x_0 | x_1 | x_2 | $x_1 \cdot x_2$ | x_1^2 | x_2^2 |
|---------|-------|-------|-------|-----------------|---------|---------|
| 1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 |
| 2 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 3 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 |
| 4 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 5 | +1 | +1 | 0 | 0 | +1 | 0 |
| 6 | +1 | -1 | 0 | 0 | +1 | 0 |
| 7 | +1 | 0 | +1 | 0 | 0 | +1 |
| 8 | +1 | 0 | -1 | 0 | 0 | +1 |
| 9 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Компьютерные осциллографмы обрабатывались по средним значениям, полученным при помощи программного обеспечения «PowerGraph» (рисунок 3.1).

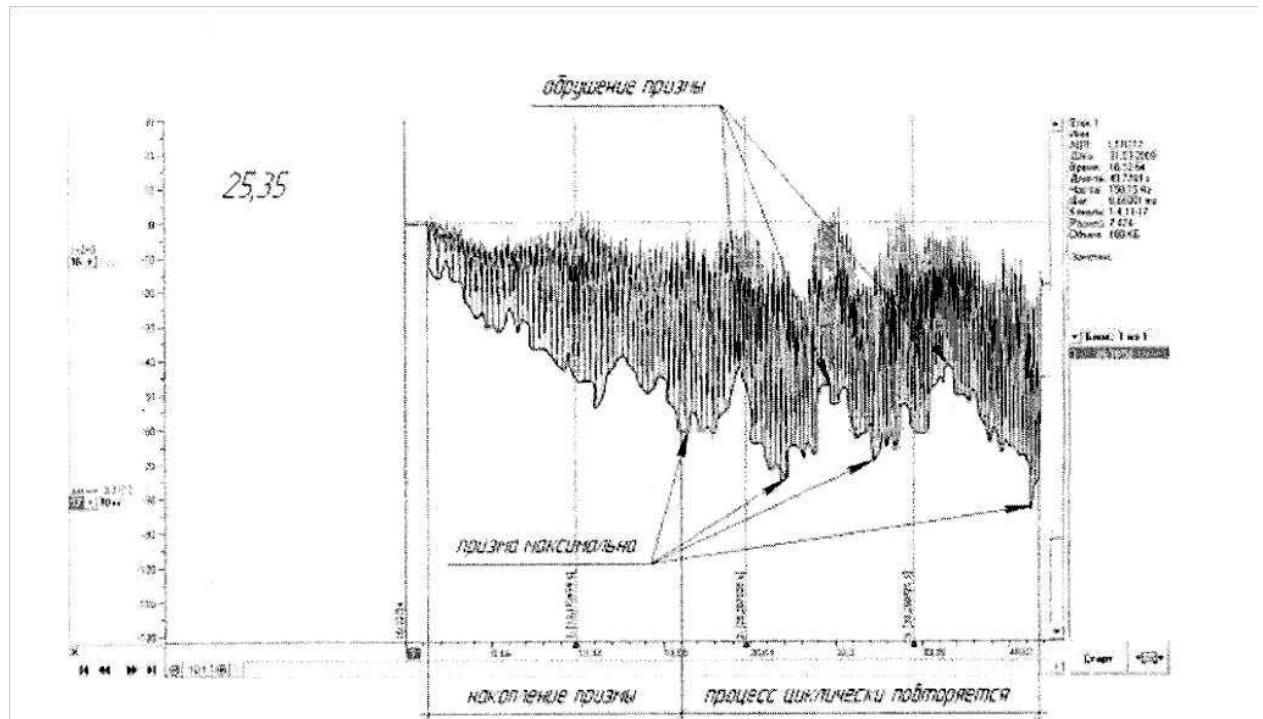


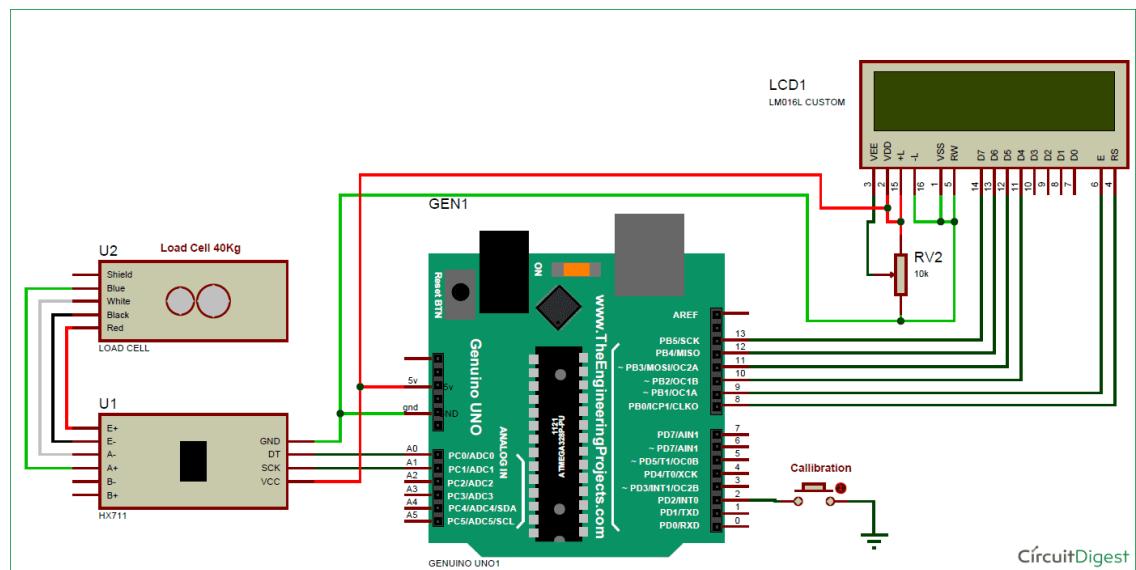
Рисунок 3.1 – Осциллографма после обработки

Зная парные значения горизонтальной и вертикальной составляющих усилия резания снега на определенный момент времени (момент скола), т.е. при определенном объеме призмы волочения, можно после расчетов, выполненных в Microsoft Office Excel 2007 и Mathcad 14, построить круг Мора для данного напряженного состояния. Все графические построения выполнялись при помощи графического редактора AutoCAD.

Центр окружности принадлежит оси абсцисс (ось а), поэтому выбираем функцию «Окружность с центром на объекте», где объектом будет являться ось абсцисс, а радиус откладывается через рассчитанную ранее точку.

3.3 Разработка измерительной системы

Для оценки параметров разрушения снега плужным рабочим органом применен косвенный метод измерения - тензометрический (рисунок 3.2).



GND – GND; VCC - 5V; DT – 2; SCK - 3

Рисунок 3.2 – Схема измерения параметров разрушения снега плужным рабочим органом тензометрическим методом

Рабочий элемент модуля – тензорезистор (проводка на гибкой подложке), которую приклеивают к измеряемому предмету. При деформации меняется сопротивление резистора, а соответственно меняется сигнал. Для

усилению сигнала от тензорезистора и передачи данных в микроконтроллер применена микросхема HX711. После калибровки модуля, можно вычислить степень деформации тензорезистивного датчика по изменению его сопротивления, и рассчитать силу, приложенную к конструкции.

Устройство тензодатчика приведено на рисунке 3.3.

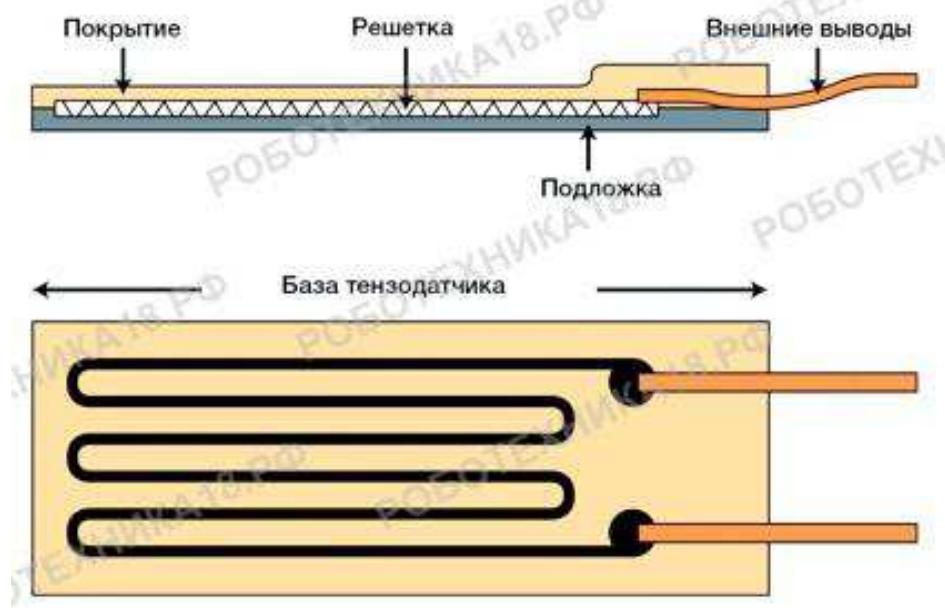


Рисунок 3.3 - Устройство тензодатчика

Скетч для калибровки тензодатчика HX711:

```
#include <HX711.h>

HX711 scale(2, 3); // порты DT, CLK

float calibration_factor = -3.7; // калибровка датчика
float units;
float ounces;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("HX711 calibration sketch");
    Serial.println("Remove all weight from scale");
```

```
Serial.println("Press + or a to increase calibration factor");
Serial.println("Press - or z to decrease calibration factor");

scale.set_scale();
scale.tare();      // сбрасываем датчик на 0

long zero_factor = scale.read_average();
Serial.print("Zero factor: ");
Serial.println(zero_factor);
}

void loop() {
    scale.set_scale(calibration_factor); // применяем калибровку

    Serial.print("Reading: ");
    units = scale.get_units(), 10; // выполняем замеры 10 раз
    if (units < 0)
    {
        units = 0.00;
    }
    ounces = units * 0.035274; // переводим усредненные значения в граммы

    Serial.print(ounces);
    Serial.print(" grams");
    Serial.print(" calibration_factor: ");
    Serial.print(calibration_factor);
    Serial.println();

    if (Serial.available())
```

```

{
    char temp = Serial.read();
    if (temp == '+' || temp == 'a')
        calibration_factor += 1;
    else if (temp == '-' || temp == 'z')
        calibration_factor -= 1;
}
}

```

Изменение относительного сопротивления тензорезистора в эксперименте, как правило, зависит от двух факторов: уровня измеряемой деформации и величины изменения температуры в месте установки датчика. Изменение температуры тензорезистора в месте его установки зависит как от колебаний температуры окружающей среды в процессе измерений, так и от саморазогрева датчика, вызываемого проходящим через него электрическим током. При изменении температуры датчика и рабочего органа изменяется коэффициент тензочувствительности S материала тензорешетки. Для сплавов константан и карма эта зависимость представляет собой линейную функцию, показанную на рисунке 3.4.

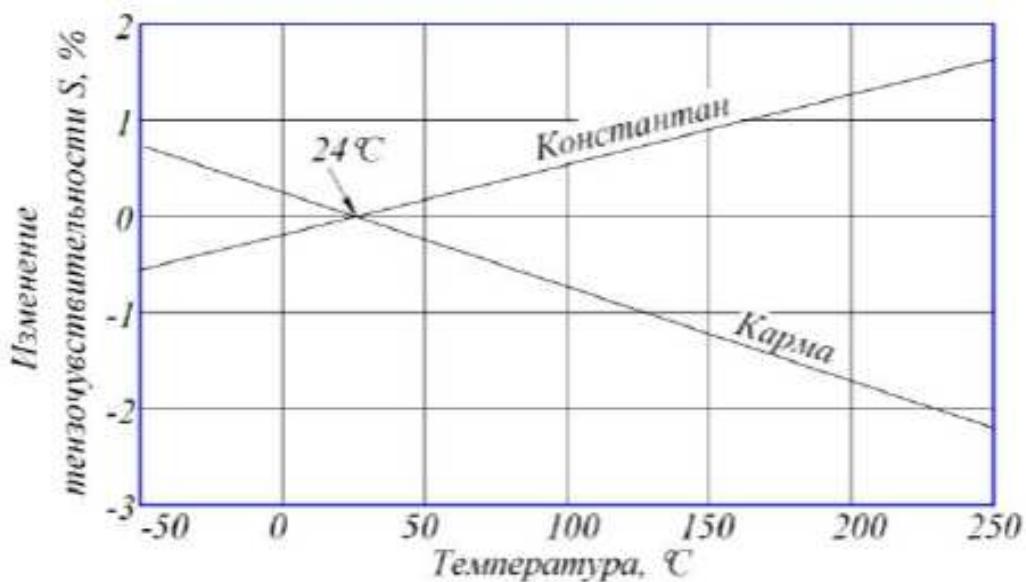


Рисунок 3.4 - Зависимость тензочувствительности сплавов константан

и карма от температуры

Выводы

- 1) Получено экспериментальное подтверждение основных положений рабочей гипотезы о механизме резания снега плужным рабочим органом.
- 2) Для решения задачи снижения энергоемкости необходимо найти оптимальные сочетания углов резания и толщины стружки - оптимальные режимы, при разных значениях плотности снега.
- 3) Оптимальные режимы, при разных значениях плотности снега необходимо получить из осцилограмм усилий на отвале, путем определения углов трения и радиусов предельных кругов Мора, на основе использования уравнений связи внешних и внутренних усилий - математической модели процесса сдвига тела скольжения.
- 4) Степень оптимальности конкретного режима резания необходимо оценивать по значениям признаков оптимальности:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_B}{R} \rightarrow \min; \\ \frac{R}{h} \rightarrow \min \\ r \rightarrow \min \\ \sigma_1 > 0 \\ \tau \rightarrow \tau_{\max} \\ \rho \rightarrow \min \end{array} \right.$$

где R - общая сила, приложенная к отвалу: $R = \sqrt{P_B^2 + P_\Gamma^2}$.

- 5) Безусловный признак оптимального режима - одновременное достижение экстремальных значений всеми показателями оптимальности.
- 6) В остальных случаях показателем приближения к оптимуму является стремление показателей к экстремальным значениям.

7) Анализ осцилограмм, с целью определения показателей оптимальности, должен быть выполнен с шагом, меньшим периода больших сдвигов.

4 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

4.1 Оптимальные режимы резания

Энергоемкость рабочего процесса в кВт·час/м³ равна:

$$\mathcal{E} = \frac{R \cdot l}{3600 \cdot h \cdot b \cdot l}. \quad (4.1)$$

При постоянной ширине отвала энергоемкость Э процесса прямо пропорциональна отношению $\frac{R}{h}$. Поэтому величину $\frac{R}{h}$ следует считать единственным критерием оптимальности режима резания [28]. Остальные показатели процесса $\rho, \sigma_1, \tau, \psi, \frac{P_B}{R}$ – являются косвенными, указывающими лишь близость к оптимуму. Каждому значению $\frac{R}{h}$ отвечает определенное сочетание косвенных показателей оптимальности. Среди косвенных показателей единственным внешним идентификатором режима является величина $\frac{P_B}{R}$.

Давление G также влияет на $\frac{R}{h}$. С целью оценки диапазона устойчивости оптимального режима, были вычислены величины $\frac{R}{h}$ соответствующие им значения $\frac{P_B}{R}$, при минимальном и при максимальном давлении G . Затем были определены пределы оптимальных значений $\left(\frac{P_B}{R}\right)_{opt}$ оптимального угла резания a_{opt} (таблица 4.2).

Рассматривая результаты, можно заметить, что минимум $\frac{P_B}{R}$ не всегда

соответствует минимуму $\frac{R}{h}$. Это объясняется тем, что среди влияющих на

процесс параметров есть такие, влияние которых взаимно противоположно.

Таблица 4.2 – Определение оптимальных режимов и диапазонов

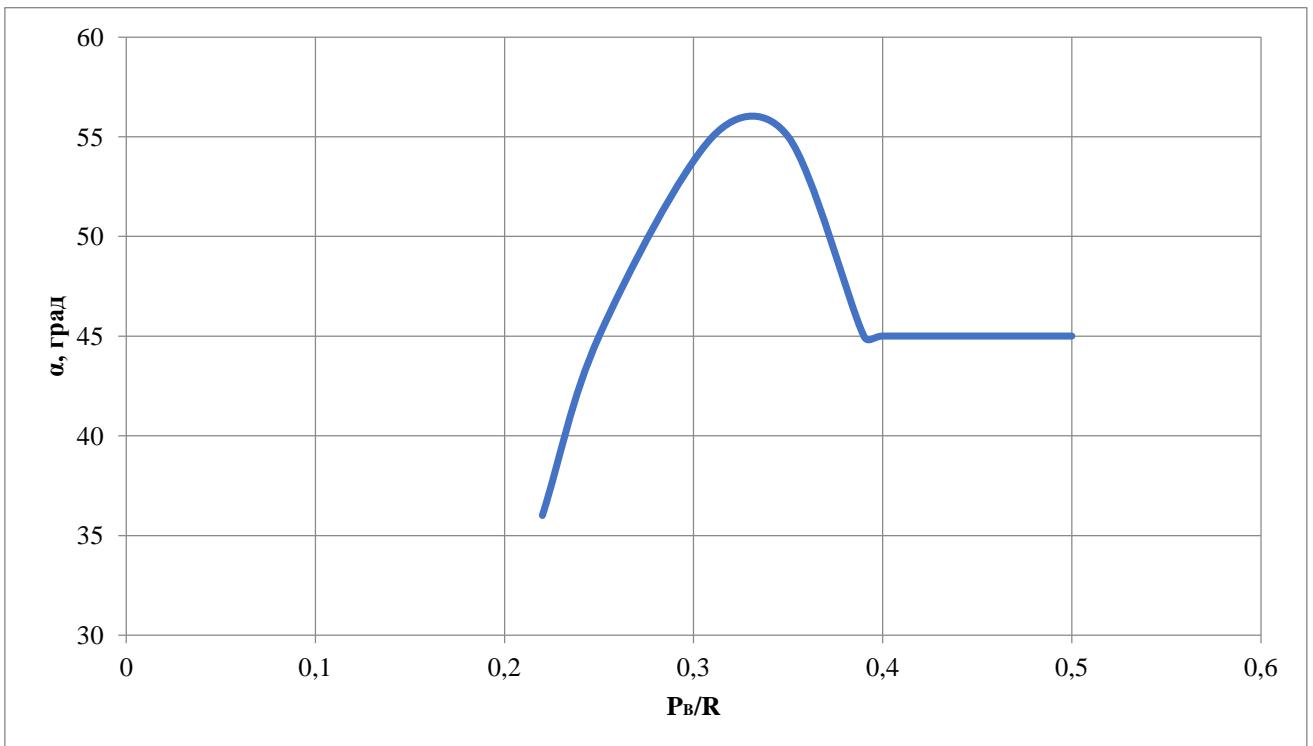
| h , мм | α , град | Снег $\gamma = 400$ кг/м ³ | | Снег $\gamma = 550$ кг/м ³ | | Оптимальные режимы и диапазоны | | | |
|----------|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|---------------------------------------|-----------|--|-----------|
| | | $\frac{R}{h}$, кН/м | $\frac{P_B}{R}$ | $\frac{R}{h}$, кН/м | $\frac{P_B}{R}$ | Снег $\gamma = 400$ кг/м ³ | | Снег $\gamma = 550$ кг/м ³ | |
| | | | | | | $\left(\frac{P_B}{R}\right)_{opt}$ | a_{opt} | $\left(\frac{P_B}{R}\right)_{opt}$ | a_{opt} |
| 25 | 35 | 8,50 | 0,43 | 15,26 | 0,37 | | | | |
| | 45 | 3,48 | 0,53 | 8,95 | 0,40 | 0,53-0,25 | 45-55 | | |
| | 55 | 4,17 | 0,25 | 7,47 | 0,39 | | | 0,39- 0,25 | 55- 55 |
| 50 | 35 | 4,76 | 0,13 | 13,15 | 0,43 | | | | |
| | 45 | 3,38 | 0,36 | 9,75 | 0,27 | | | | |
| | 55 | 2,95 | 0,29 | 4,44 | 0,39 | 0,29-0,20 | 55-45 | 0,39- 0,43 | 55- 55 |
| 70 | 35 | 35 | 4,31 | 0,40 | 6,33 | 0,41 | | | |
| | 45 | 3,27 | 0,34 | 5,40 | 0,34 | | | 0,34- 0,23 | 45- 35 |
| | 55 | 3,21 | 0,25 | 8,67 | 0,30 | 0,25-0,30 | 55-55 | | |

Оптимальные режимы соответствуют $\left(\frac{R}{h}\right)_{min}$, а идентифицируются по

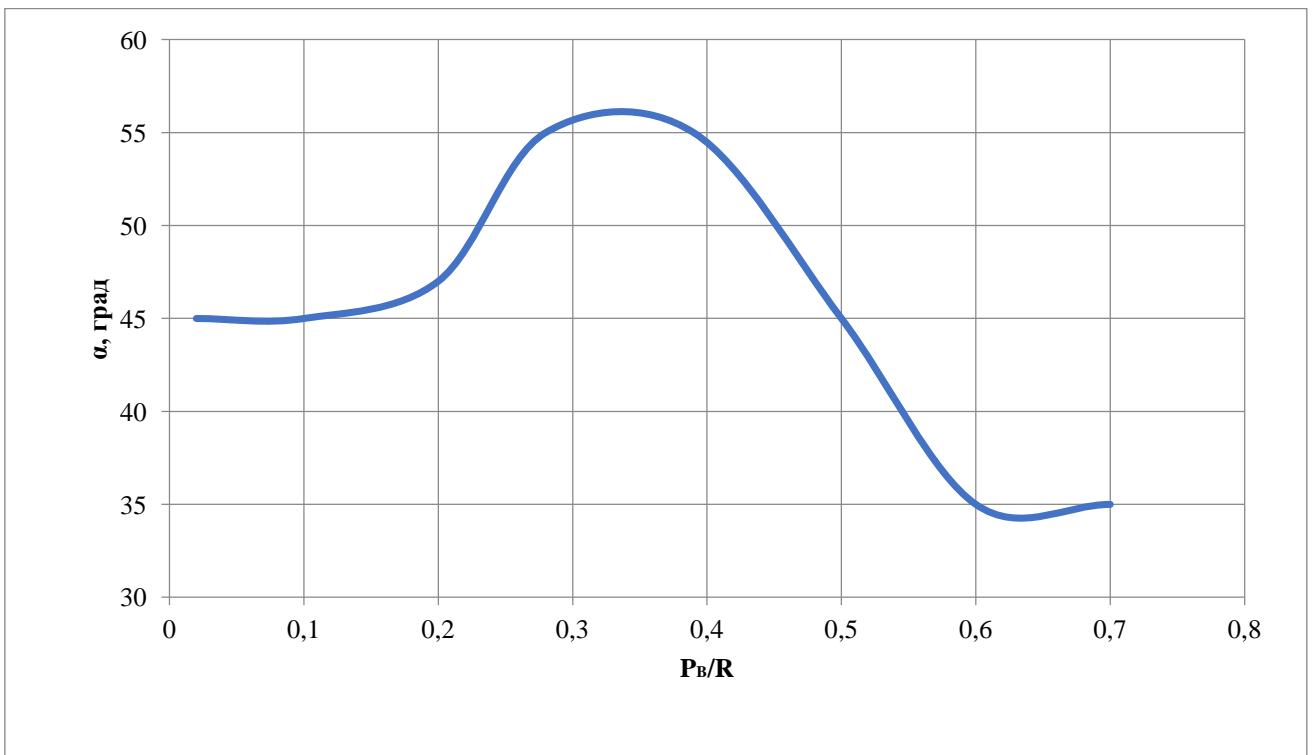
$\frac{P_B}{R}$. Оптимальные режимы резания и режимы, близкие к оптимальным,

приведены на рисунках 4.3-4.5.

Численные значения соответствующих им параметров ПНС приведены в приложении А.

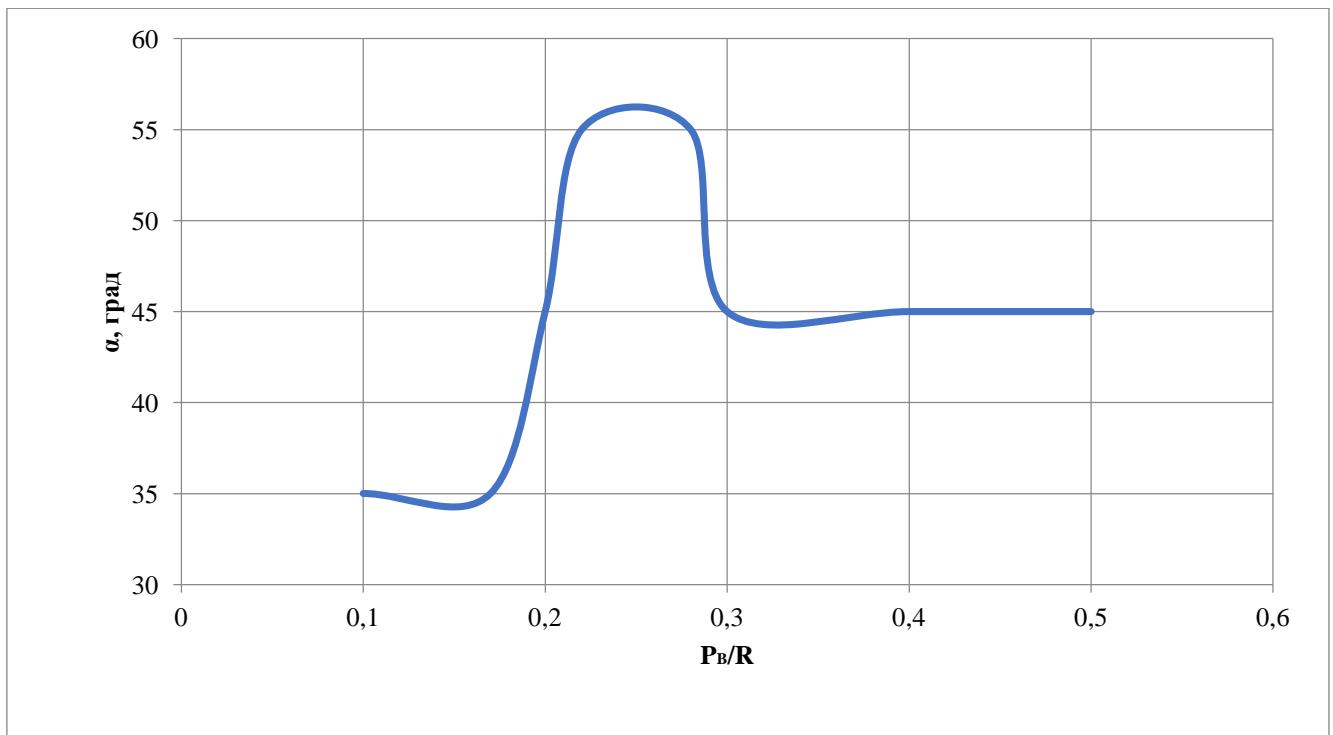


$$\Theta = 12.08 \times 10^{-4} \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$$

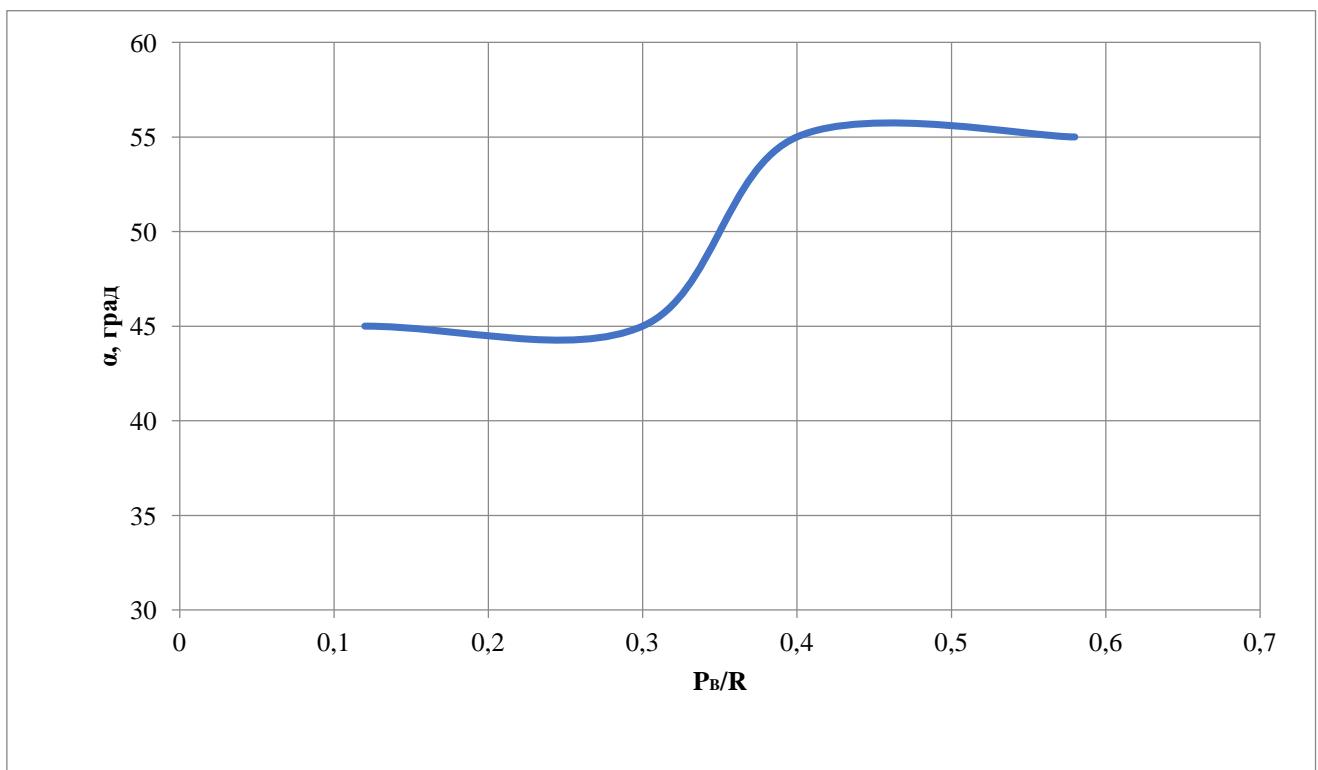


$$\Theta = 25.94 \times 10^{-4} \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$$

Рисунок 4.3 – Оптимальные углы резания снега при стружке $h=25$ мм (а – снег $\gamma = 400$ кг/м³; б - снег $\gamma = 550$ кг/м³)

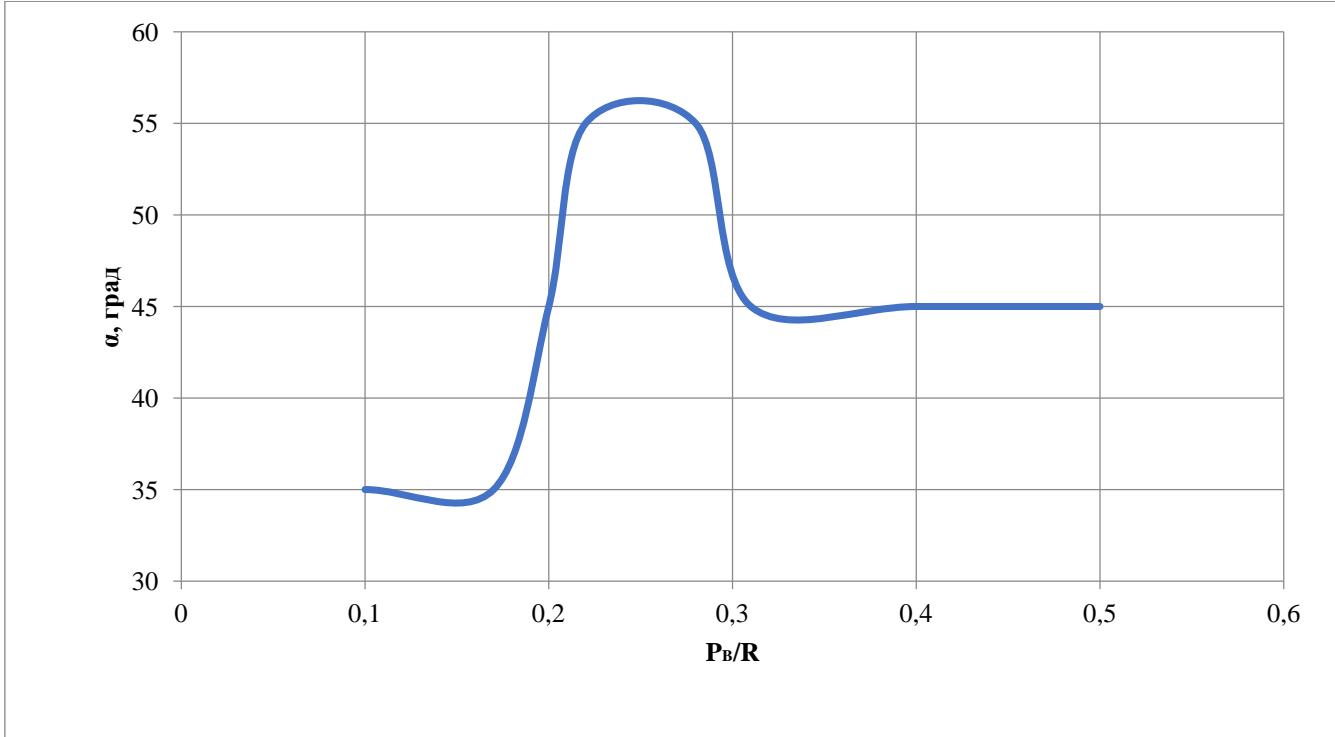


$$\Theta = 10.24 * 10^{-4} \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$$

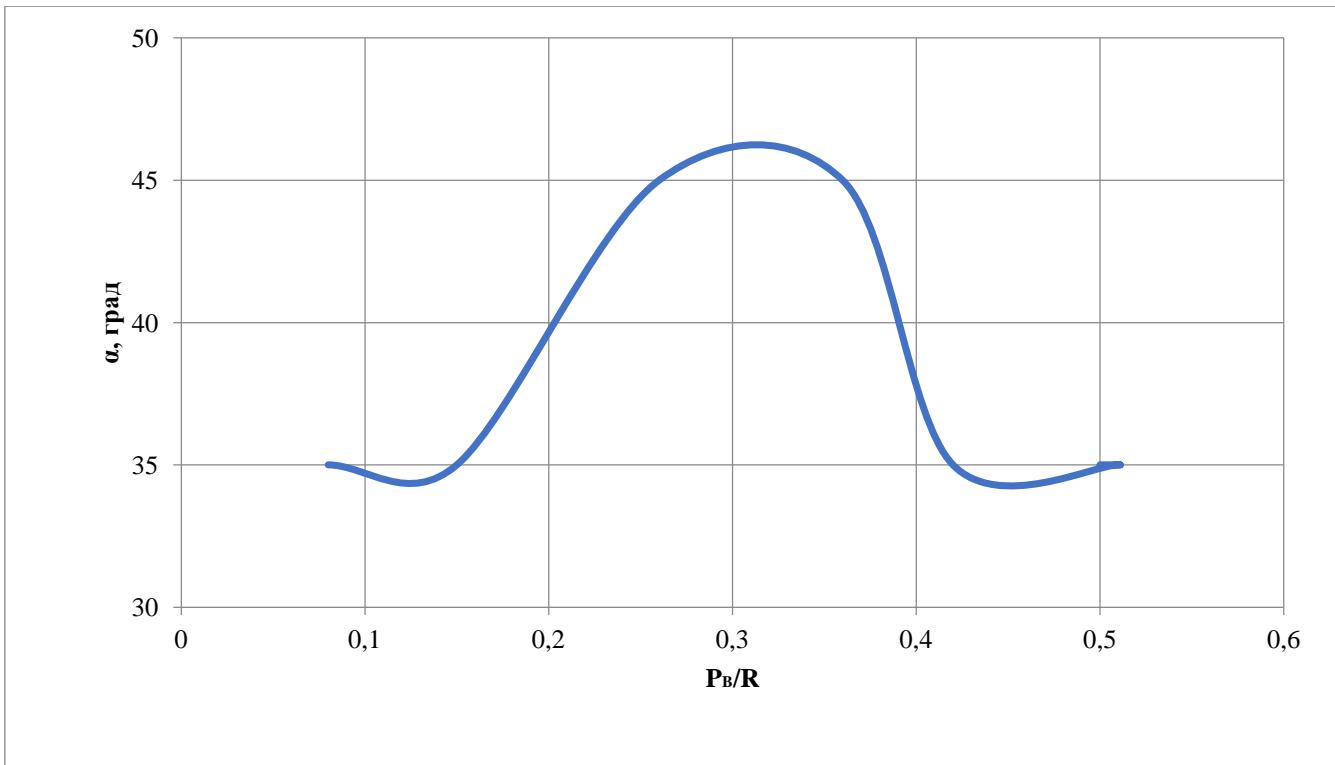


$$\Theta = 15.42 * 10^{-4} \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$$

Рисунок 4.4 – Оптимальные углы резания снега при стружке $h=50$ мм (а – снег $\gamma = 400$ кг/м³; б - снег $\gamma = 550$ кг/м³)



$$\Theta = 11.14 \times 10^{-4} \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$$



$$\Theta = 18.75 \times 10^{-4} \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$$

Рисунок 4.5 – Оптимальные углы резания снега при стружке $h=70$ мм (а – снег $\gamma = 400$ кг/м³; б - снег $\gamma = 550$ кг/м³)

Для сравнения вычислены энергоемкость и коэффициент сопротивления резанию при оптимальных режимах и приведены номинальные значения k_{pes} , принимаемые в настоящее время при проектировании (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Энергоемкость и коэффициент сопротивления резанию снега при оптимальных режимах

| h , мм | R , Н | $\left(\frac{R}{h}\right)_{\min}$, кН/м | $\left(\frac{P_B}{R}\right)_{opt}$ | $\mathcal{E} \cdot 10^{-4}$, кВт | k_{pes}^{opt} , кПа | k_{pes}^{opt} , кПа |
|---------------------------------------|------------|---|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Снег $\gamma = 400$ кг/м ³ | | | | | | |
| 25 | 87,13 | 3,48 | 0,53 | 12,08 | 4,36 | 8 |
| 50 | 147,44 | 2,95 | 0,29 | 10,24 | 3,69 | |
| 70 | 224,93 | 3,21 | 0,25 | 11,14 | 4,02 | |
| Снег $\gamma = 550$ кг/м ³ | | | | | | |
| 25 | 186,85 | 7,47 | 0,39 | 25,94 | 9,34 | 25 |
| 50 | 222,31 | 4,45 | 0,39 | 15,44 | 5,56 | |
| 70 | 378,05 | 5,40 | 0,34 | 18,75 | 6,75 | |

Видим, что снижение k_{pes} и энергоемкости на оптимальных режимах составляет для снега $\gamma = 400$ кг/м³ $1,83 \div 2,17$ раз, а для снега $\gamma = 550$ кг/м³ $2,68 \div 4,50$ раз. Такое ПНС реализуется при соответствующем, известном из опыта оптимальном угле резания, и идентифицируется по значению $\left(\frac{P_B}{R}\right)_{opt}$.

При работе снегоочистителя значения $\frac{P_B}{R}$ непрерывно меняются.

Необходимо так изменять угол резания по времени, чтобы текущее значение $\frac{P_B}{R}$ было максимально близко к $\left(\frac{P_B}{R}\right)_{opt}$. Исследование результатов

экспериментов показало, что при одном и том же угле резания возможны ПНС, близкие к оптимальным (рис. 4.3-4.5) [133].

На графики нанесены точки, соответствующие минимуму энергоемкости. При отклонении текущего значения $\frac{P_B}{R}$ от $\left(\frac{P_B}{R}\right)_{opt}$ угол резания должен быть изменен в ту или иную сторону, чтобы приблизиться к $\left(\frac{P_B}{R}\right)_{opt}$ соответственно графику, т.е. ломаные линии на рисунках 4.3-4.5 являются законом оптимального управления углом резания по возмущению $\frac{P_B}{R}$.

Выводы

- 1) Давление призмы снижает наибольшее главное напряжение, поэтому расчетное значение параметров надо принимать по наибольшему объему призмы волочения;
- 2) Единственным критерием оптимальности режима резания является сопротивление на отвале, отнесенное к единице толщины стружки. Остальные показатели указывают лишь область существования оптимума и режимы, близкие к оптимальному;
- 3) Определены оптимальные значения углов резания для различных состояний снега и толщины стружки;
- 4) Идентификационным показателем оптимального режима является доля вертикальной составляющей в общем сопротивлении резанию;
- 5) Определена база данных оптимальных углов резания по идентификационному показателю режима резания;
- 6) Внедрение результатов исследования позволяет снизить энергоемкость процесса резания снега в $1,83 \div 4,5$ раз, по сравнению с существующими нормами проектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый подход к выбору режима резания снега плужным рабочим органом малогабаритного снегоочистителя, позволяющий существенно снизить энергоемкость процесса резания, за счет использования особенностей механических свойств снега и основанный на использовании текущей информации о сопротивлении на рабочем органе.

Из проведенного исследования следуют общие выводы;

1) Особенность технологии зимнего содержания тротуаров и остановок общественного транспорта диктует необходимость применения малогабаритных плужных снегоочистителей массой до 100 кг и тяговым усилием порядка 200 Н.

2) Представительными видами и состояниями снега, определяющими максимальное сопротивление на рабочем органе, можно считать сухой мелкозернистый слежавшийся снег плотностью 400 кг/м при температуре -6 ...-10 °C и влажный снег плотностью 550 кг/м при температуре -2 ... 0 °C.

3) В процессе резания снега плужным рабочим органом внешнее и внутреннее трение изменяется в десятки раз, поэтому существующие методики, основанные на постоянстве сопротивления резанию, не отражают действительных затрат энергии.

4) Реализуемые плужным рабочим органом ПНС, представленные в виде предельных кругов Мора, позволяют определить оптимальное, при данном угле внутреннего трения, положение площадки сдвига.

5) Положение предельного круга Мора относительно оси касательных напряжений, определяется касательной, проведенной через точку сцепления снега под углом внутреннего трения.

6) Минимум энергоемкости процесса резания снега плужным рабочим органом соответствует наименьшему из предельных кругов Мора, расположенному под их огибающей.

7) Математическая модель процесса разрушения снега рабочим органом позволяет, при данном угле резания, идентифицировать оптимальное ПНС по составляющим усилия на отвале.

8) Предельные круги Мора, построенные по экспериментальным точкам, содержат растягивающие напряжения, чем подтверждаются принятая гипотеза разрушения снега плужным рабочим органом и адекватность математической модели.

9) Минимальные значения относительных вертикальных усилий по углу резания, полученные экспериментально, являются базой данных об оптимальных ПНС и реализующих их углах резания, для данного вида и состояния снега.

10) Использование методики проектирования и базы данных об оптимальных углах резания снега позволяют снизить энергоемкость процесса резания в $1,83 \div 4,5$ раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Стручков Алексей Валентинович. Исследование и совершенствование элементов гидромеханической трансмиссии гусеничного бульдозера: Сибирский Федеральный Университет, 2009.
- 2 Рудкова, И. А. Рудкова, И. А.. Использование GPS навигации в строительстве: Сибирский Федеральный Университет, 2012.
- 3 Конев В.В., Мерданов Ш.М., Шевелев А.С. Модернизация ковша фронтального погрузчика для уборки снега. Тюменский государственный нефтегазовый университет.2016.
- 4 Мерданов Ш.М., Конев В.В., Балин А.В.. Исследование конструкций отвалов снегоуборочных машин. Тюменский государственный нефтегазовый университет.2015.
- 5 Русмиленко А.К., Мадьяров Т.М., Егоров А.Л., Костырченко В.А. . Модернизация плужного отвала снегоуборочной машины Инженерный вестник Дона №1. 2019
- 6 Богданова Е.О. Повышение эффективности рабочего оборудования бульдозера // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 10 [Электронный ресурс].
- 7 Глебов, В. Д. Повышение долговечности и снижение затрат энергии бульдозеров – Вестник ПсковГУ , 2014. – 751 с.
- 8 Паничкин, А.В. Влияние угла резания на возникающие сопротивления при разработке грунта / А.В. Паничкин/ / Известия ОрелГТУ. Естественные науки, 2004 г. №3 4
- 9 Мерданов Ш.М., Конев В.В., Балин А.В. Ресурсосбережение при уборке снега в городских условиях. Инженерный вестник Дона №1. 2015.
- 10 Трошин Д. И. Выбор и обоснование параметров полусферического отвала бульдозера с дисковыми секциями. СПбГАСУ.

- 11 Тарасов В.Н. Уравновешивание рабочего оборудования гидравлического экскаватора. Строительные и дорожные машины. - 2003. - №7. - С.38-43.
- 12 Бурдин А.А., Габдуллин Т.Р. Разработка прицепа для уборки снега // Техника и технология транспорта. 2017. № 4 (5). С. 3.
- 13 Тарасенко Е. А. Разработка эффективных технологий освоения валунистых россыпей Е.А. Тарасенко, В.Е. Кисляков. — Красноярск : Сиб. федер.ун-т, 2014. — 102 с.
- 14 Салихов Р.Ф. Повышение эффективности производственной и технической эксплуатации парка дорожно-строительных машин. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия
- 15 Мещеряков В.А. Адаптивное управление рабочими процессами землеройно-транспортных машин. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия
- 16 Лысянников А.В., Желукевич Р.Б., Малянов В.В., Кайзер Ю.Ф., Лысянникова Н.Н., Серебренникова Ю.Г.. Анализ современного состояния и развития конструкций ножей отвалов дорожных машин. Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа
- 17 Баранчик В.П., Васильев В.А., Закиров М.Ф. Экспериментальное исследование процесса резания снега отвальным рабочим органом // Интерстроймех - 2009: материалы Междунар. науч.-техн. конф. - Бишкек: КГУСТА, 2009. - С. 110-112.
- 18 Баранчик В.П., Закиров М.Ф. Исследования сопротивления резанию снега малогабаритным плужным снегоочистителем // Механизация строительства. -2009.-№11.-С. 16-18.
- 19 Баранчик В.П., Закиров М.Ф. Напряженно-деформированное состояние снега при взаимодействии с отвальным рабочим органом // Интерстроймех - 2009: материалы Междунар. науч.-техн. конф. - Бишкек: КГУСТА, 2009. - С. 105-106.

- 20 ГОСТ 24026 - 86. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1986.
- 21 Закиров М.Ф., Субботина А. С, Баранчик В.П. Экспериментальная установка для исследования сопротивлений на рабочих органах малых коммунальных машин // Проблемы и достижения строительного комплекса: тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Стройкомплекс - 2008». - Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2008.-С. 134-137.
- 22 Гарманов А.В. Крейтовая система ЪТК. Руководство пользователя. - М.: Ъ- Сагё, 2008.-218 с.
- 23 Закиров М.Ф., Васильев В.А., Баранчик В.П., Плеханов Ф.И. Методика проведения эксперимента по определению сопротивления резанию снега на стенде «грунтовый канал» // Проблемы и достижения строительного комплекса: тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Стройкомплекс - 2010». - Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. - С. 174-177.
- 24 Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М.: Наука, 1976. - 249 с.
- 25 Спиридовон А.А., Васильев КГ. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов. - Свердловск: изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1975. - 140 с.
- 26 Красовский ГК, Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. - Минск: БГУ, 1982. – 302
- 27 Закиров М.Ф., Баранчик В.П. Новый подход к выбору режимов разрушения снега рабочими органами машин // Интеллектуальные системы в производстве. - 2011.-№2(18). - С. 107-110.
- 28 Закиров М.Ф., Баранчик В.П. Оптимальные параметры процесса резания снега плужным снегоочистителем // Интерстроймех - 2011: материалы Медунар. науч.-техн. конф. - Могилев: Белорус. - Рос. ун-т, 2011. - С. 86-89.

- 29 Войтковский К.Ф. Механические свойства снега. - М.: Наука, 1977. - 126 с.
- 30 Закиров М.Ф. Исследование предельного напряженного состояния снега // Проблемы эксплуатации систем транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. - С. 99-101.
- 31 Зеленин А.Н. и др. Лабораторный практикум по резанию грунтов. Учебное пособие / А.Н. Зеленин, Г.Н. Каравеев, Л.В. Красильников. - М.: Высшая школа, 1969. - 310 с.
- 32 Баранчик В.П., Закиров М.Ф. Определение сопротивления резанию снега плужным рабочим органом малогабаритного снегоочистителя // Вестник ИжГТУ. - 2009. - №4(44). - С. 33-34
- 33 Берестов Е.И. и др. Сопротивление грунтов резанию: монография / Е.И. Берестов, А.П. Смолляр. - Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2008. - 179 с.
- 34 Зеленин А.Н. и др. Лабораторный практикум по резанию грунтов. Учебное пособие / А.Н. Зеленин, Г.Н. Каравеев, Л.В. Красильников. - М.: Высшая школа, 1969. - 310 с.
- 35 Закиров М.Ф. Особенности зимнего содержания придомовых территорий // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. — С. 121-122.
- 36 Берестов Е.И. и др. Сопротивление грунтов резанию: монография / Е.И. Берестов, А.П. Смолляр. - Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2008. - 179 с.
- 37 Измерение напряжений и усилий в деталях машин. Сборник работ / Под ред. Н.И. Пригородовского. - М.: Машгиз, 1955. - 224 с.
- 38 Инструкция по организации и технологии механизированной уборки населенных мест / Министерство ЖКХ РСФСР, академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова. -М.: Стройиздат, 1980.
- 39 Исаков В.С. и др. Особенности конструкций и повышение эффективности использования машин и роботов для укладки и

- содержания дорожных покрытий: Учеб., пособие / В.С. Исаков, И.Г. Булгакова, Н.П. Чухряев. - Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. - 260 с.
- 40 Карабан Г.Л. и др. Машины для содержания и ремонта автомобильных дорог и аэродромов / Г.Л. Карабан, В.И. Баловнев, И.А. Засов. - М.: Машиностроение, 1975. — 368 с.
- 41 Карабан Г.Л. Снегоуборочные машины. - М.: МКХ РСФСР, 1962. - 124 с.
- 42 Карасев Г.Н. Определение силы резания грунта с учетом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. - 2008. - №4. - С. 36-42.
- 43 Карнаухов Н.Н., Мерданов Ш.М., Оржаховский В.Г., Петровец В.С. Методика определения влажности снега для обоснования параметров конструкций снегоуплотняющих машин // Интерстроймех - 2007: материалы Меж- дунар. науч.-техн. конф. - Самара: Самарск. гос. арх.-строит. ун-т, 2007. - С. 32-37.
- 44 Кирьянов Д.В. Малсаб 14: Наиболее полное руководство. - СПб.: БХВ-Петербург, 2007. - 704 с.
- 45 Коммунальные машины и оборудование: Лабораторный практикум / П.И. Никулин, В.А. Нилов, М.И. Щербинин, Д.А. Удодов. - Воронеж: ВТАСУ, ВГТУ, 2004. - 130 с.
- 46 Красовский ГК, Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. - Минск: БГУ, 1982. - 302 с.
- 47 Кудрявцев Е.М. КОМПАС-3О VIO. Максимально полное руководство. В 2-х томах. - М.: ДМК Пресс, 2008.
- 48 Куляшов А.П. и др. Современные методы разрушения льда / А.П. Куляшов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин, А.В. Щепетов. - М.: Компания Спутник, 2005. - 135 с.
- 49 Куляшов А.П., Маликов О.Ю., Молев Ю.И., Соколов А.М. Пути повышения степени очистки снежных накатов на поверхности дорог // Строительные и дорожные машины. - 2007. - №3. - С. 44-46.

50 Куляшов А.П., Молев Ю.И. Влияние параметров слоистости среды на процесс ее разрушения на примере снежного покрова, лежащего на поверхности дорог // Известия ВУЗов. Сер. «Машиностроение». — 2006. - №6. - С. 31-35.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
Кафедра строительных материалов и технологий строительства

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Ендиевская И.Г. Ендиевская
«25» 06 2021 г.

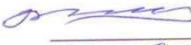
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Малая механизация при индивидуальном строительстве

Направление 08.04.01 Строительство
Магистерская программа 08.04.01.07 Комплексная механизация и
автоматизация строительства

Научный руководитель  проф., д - р.техн. наук Р.Т. Емельянов

Выпускник  Е. С. Дремин

Рецензент  проф., д-р техн. наук В.И. Иванчура

Нормоконтролер  доц., канд. техн. наук Е.С. Турышева

Красноярск 2021