

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет транспорта»  
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



**Кузнецов Андрей Владимирович**

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СПОСОБОВ РАЗРУШЕНИЯ  
ЛЬДА В БОРЬБЕ С ЗИМНЕЙ СКОЛЬЗКОСТЬЮ НА ПОКРЫТИЯХ  
ПРОЕЗЖИХ ЧАСТЕЙ И ПЕШЕХОДНЫХ ПРОСТРАНСТВ**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов  
и детали машин

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Сладкова Любовь Александровна

Москва – 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ В ОБЛАСТИ БОРЬБЫ С ЗИМНЕЙ СКОЛЬЗКОСТЬЮ И ЛЕДЯНЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ.....	11
1.1 Методы борьбы со льдом и снегом .....	11
1.2 Механический метод борьбы.....	12
1.3 Комбинированный метод борьбы.....	27
1.4 Термический метод борьбы.....	28
1.5 Химический метод борьбы.....	31
1.6 Фрикционный метод борьбы.....	32
1.7 Резонансное разрушение ледяного покрова.....	33
1.8 Выводы по первому разделу.....	33
2 ЛЕД, КАК ОБЪЕКТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ УБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ.....	35
2.1 Виды зимней скользкости, ее влияние на движение автомобилей и пешеходов, действующие требования к состоянию покрытий в зимний период после окончания работ по их очистке.....	35
2.2 Основные характеристики льда.....	40
2.3 Общие сведения о моделировании процесса разрушения льда.....	46
2.3.1 Континуальные модели.....	47
2.3.2 Дискретные модели.....	52
2.3.3 Модели, в которых лед представлен упругопластическим материалом или средой.....	56
2.3.4 Модели, в которых лед представлен вязкопластическим материалом или средой.....	57
2.3.5 Реологические модели.....	58
2.3.6 Модели разрушения участков зимней скользкости.....	59

2.4 Построение модели разрушения льда на дорожном покрытии воздействием ударного типа и имитационной модели напряженно-деформированного состояния льда.....	59
2.5 Исследование регрессионной зависимости прогиба в трехмерном пространстве.....	69
2.6 Выводы по второму разделу.....	71
3 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	73
3.1 Цели и задачи двухэтапных исследований по определению условий для повышения сцепных качеств покрытий в зимний период.....	73
3.2 Методика для определения и проверки значений энергоемкости разрушения льда ударниками различных конфигураций.....	74
3.3 Влияние конфигураций ударников на энергоемкость разрушения льда.....	75
3.4 Влияние температуры воздуха на изменение энергоемкости разрушения льда ударниками рациональных конфигураций.....	79
3.5 Влияние угла наклона насечек на сцепные качества выровненного участка зимней скользкости.....	81
3.6 Выбор уборочного оборудования.....	85
3.7 Расчет параметров привода.....	86
3.8 Описание конструкции дополнительного уборочного устройства.....	90
3.9 Определение расположения и размеров насечек, наносимых разработанным устройством.....	96
3.10 Корректировка расчета тягового усилия модернизированной уборочной машины .....	100
3.11 Выводы по третьему разделу.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	105
Словарь терминов.....	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	134

ПРИЛОЖЕНИЕ В.....136  
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....146

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Передвижение автомобилей и людей в значительной степени зависит от сцепных качеств покрытий проезжих частей дорог и пешеходных пространств. Одной из основных причин снижения сцепных качеств этих покрытий является образование на них зимней скользкости.

Вместе с тем, весьма трудно спрогнозировать точно момент и место образования зимней скользкости, поэтому, как правило, устраняется не проблема её появления, а её следствие.

Одним из наиболее распространённых способов борьбы с зимней скользкостью считается механический способ, но его реализация несколько ограничена, так как эффективность современных рабочих органов уборочных машин и устройств невысока при разрушении слоёв льда и уплотнённого снега значительной толщины.

В настоящее время известно лишь о небольшом количестве научных исследований, посвящённых проблеме ведения борьбы с зимней скользкостью оборудованием ударного действия по причине сложности определения взаимосвязанных параметров, таких как скорость перемещения машины, частота и интенсивность (сила) воздействия ударных рабочих органов по льду и уплотнённому снегу, зависящих от работы привода уборочной техники.

Расширение области использования машин, предназначенных для устранения зимней скользкости, при расположении на них дополнительных или сменных рабочих органов ударного действия, не влечёт за собой существенного увеличения мощности их приводов. Хотя, введение дополнительного рабочего оборудования приводит к частичному изменению привода машин, в частности к разработке передаточного механизма, способного осуществлять отбор мощности от имеющейся силовой установки или от уже существующего привода, но при минимальных затратах на его изменение.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью интенсификации механических способов разрушения льда для

повышения безопасности передвижения автомобилей и пешеходов в зимний период, с одновременным снижением в этот период затрат на содержание покрытий проезжих частей и пешеходных пространств.

**Степень разработанности темы исследования.** Существенный вклад в изучение сложного процесса разрушения льда различными видами воздействия внесли исследования В.В. Богородского, К.Ф. Войтковского, В.П. Гаврило, В.А. Ганжи, Р.В. Гольдштейна, В.П. Епифанова, А.Ю. Ишлинского, В.М. Козина, К.Н. Коржавина, А.П. Куляшова, В.А. Курдюмова, В.А. Лихоманова, Ю.И. Молева, В.А. Лобанова, О.А. Недошивина, А.Ф. Николаева, Л.А. Сладковой, Д.Е. Хейсина, В.А. Шапкина.

Тем не менее, вопросы борьбы с зимней скользкостью не являлись основным направлением деятельности большинства из перечисленных учёных.

**Цель диссертации** заключается в разработке эффективных способов и устройств для устранения участков зимней скользкости нагрузками ударного характера, с минимальной энергоёмкостью и сохранением целостности очищаемых покрытий.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- 1) проведён анализ современной техники для содержания покрытий дорог и пешеходных пространств в зимнее время года, а также методов и вариантов моделирования разрушения льда и плотных снежных образований;
- 2) разработаны модели разрушения льда на дорожных покрытиях ударным воздействием;
- 3) проведены исследования по определению и оценки энергоёмкости процесса разрушения льда ударниками различных конфигураций;
- 4) предложен вариант повышения сцепных качеств покрытий проезжих частей и пешеходных пространств в зимний период;
- 5) разработано устройство для борьбы с зимней скользкостью и обоснована целесообразность его использования на существующих машинах;
- 6) разработаны варианты изменения привода машин для содержания дорог с обоснованием наиболее эффективного варианта.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1) разработана модель разрушения льда на дорожном покрытии ударным воздействием, учитывающая изменение физико-механических свойств и размеров образца, а также величины воздействия на него;

2) предложена имитационная модель напряжённо-деформированного состояния (НДС) льда для оценки событий такого состояния при воздействии нагрузки ударного типа;

3) для частей уборочного оборудования ударного типа, контактирующих непосредственно с участками зимней скользкости, определены наиболее рациональные формы, преимущество которых состоит в обеспечении с наименьшей энергоёмкостью или разрушения этих участков, или нанесения на их поверхности насечек;

4) установлены наиболее выгодные условия нанесения насечек устройствами ударного действия на поверхности участков зимней скользкости, при которых сцепные качества этих участков следует считать допустимыми для эксплуатации с позиции действующих российских нормативных документов, регламентирующих содержание дорожных покрытий в зимний период;

5) выявлена последовательность применения базового и разработанного уборочного оборудования плужно-щёточной машины для значительного повышения сцепных качеств покрытий вне зависимости от прочности и толщины участков зимней скользкости;

б) определён эффективный вариант привода с отбором мощности от общей силовой установки.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертации заключается в следующих положениях:

1) реализован способ получения уравнения регрессионной зависимости прогиба участка обледенения на дорожном покрытии при действии усилия ударного типа для установления значимых факторов, оказывающих влияние на НДС этого участка;

2) проведено исследование уравнения регрессионной зависимости прогиба в трёхмерном пространстве, на основании которого можно определить величину деформации, приводящей к разрушению выровненного участка обледенения;

3) предложена методика определения и проверки энергоёмкости разрушения льда ударными рабочими органами различных конфигураций для выбора наиболее эффективного оборудования борьбы с зимней скользкостью на основании сравнения объёмов зон разрушения;

4) получены эмпирические уравнения характера изменения энергоёмкости процесса разрушения льда в зависимости от температуры воздуха для ударников, выполненных в форме шара и клина;

5) определён режим работы модернизированной техники для достижения наилучших сцепных качеств выровненного участка зимней скользкости.

**Методология и методы исследования.** Решение поставленных задач было реализовано на основе анализа научной информации о методах борьбы с льдообразованиями и вариантах моделирования процесса разрушения льда, а также теории сопротивления материалов, теории планирования эксперимента, методов математического моделирования, теории математической статистики, теории проведения тягового расчёта для плужных уборочных машин, методов оценки эффективности использования дорожных снегоуборочных машин.

**На защиту выносятся:**

1) модель разрушения льда ударным воздействием на дорожном покрытии и имитационная модель НДС льда на дороге при таком воздействии;

2) результаты исследований по установлению наиболее рациональной формы для контактирующих с участками зимней скользкости частей уборочного оборудования ударного действия;

3) условия выполнения шероховатости уборочным оборудованием ударного типа на поверхности участков зимней скользкости для обеспечения безопасного передвижения автомобилей и пешеходов по обработанному покрытию;



4) конструкция дополнительного устройства ударного действия для плужно-щёточной уборочной машины, с вариантами привода этой машины от общей силовой установки.

**Достоверность полученных результатов работы** основана на достижениях в области проведённых исследований и подтверждается:

- сопоставлением результатов расчёта модели НДС льда с результатами эксперимента по определению значимых факторов и подтверждению достоверности данной модели;

- воспроизводимостью результатов исследований по определению и оценки энергоёмкости процесса разрушения льда ударниками различных конфигураций и воспроизводимостью результатов исследований по оценке изменения коэффициента трения движителя по скользкой наклонной поверхности в зависимости от угла насечек, нанесённых на эту поверхность;

- сравнением технико-эксплуатационных показателей базовой и модернизированной уборочной машины.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» РУТ (МИИТ) и на шести конференциях:

- Вторая российская конференция пользователей программных комплексов MSC Software среди высших учебных заведений (г. Москва, апрель 2016 г.);

- XX Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (г. Москва, апрель 2016 г.);

- XXXVI Всероссийская конференция, посвященная памяти Референта МСНТ Н.Н. Ершовой (г. Миасс, июнь 2016 г.);

- Девятнадцатая российская конференция пользователей программных комплексов MSC Software (г. Москва, октябрь 2016 г.);

- Первая Всероссийская конференция Россоюзхолодпрома «Бизнес и образование». Школа молодых учёных имени профессора И.М. Калниня (г. Москва, март 2017 г.);

- XIV Международная научно-практическая конференция «Инновационные научные исследования: Теория, Методология, Практика» (г. Пенза, май 2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 3 в изданиях из перечня ВАК Российской Федерации. Для публикации [148] в приложении А приведено отсканированное изображение справки № 014/13306 от 25.10.2019 об ошибочном напечатании соавтору статьи Кузнецову отчества «Николаевич» вместо «Владимирович».

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «ИМЭДЖИН ЛАБ» (приложение А).

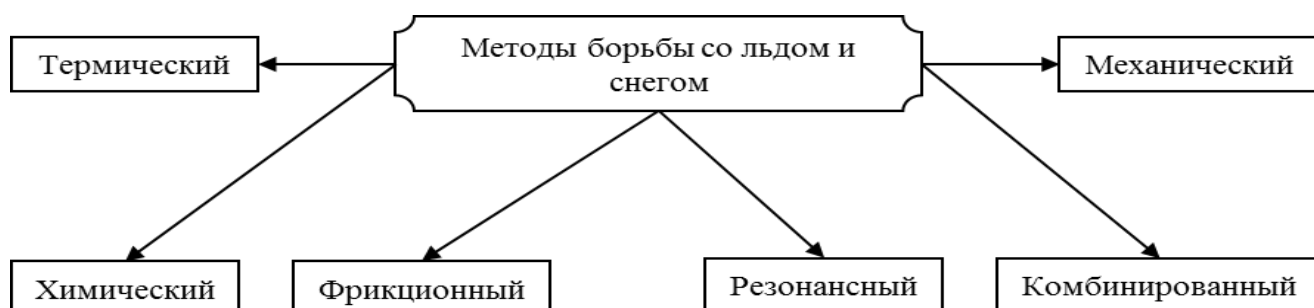
**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трёх разделов, заключения, словаря терминов, списка литературы и четырёх приложений. Работа выполнена на 155 страницах, содержит 26 таблиц и 56 рисунков. Список литературы включает в себя 209 наименований.

# 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ В ОБЛАСТИ БОРЬБЫ С ЗИМНЕЙ СКОЛЬЗКОСТЬЮ И ЛЕДЯНЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

## 1.1 Методы борьбы со льдом и снегом

Борьбу со льдом и/или снегом ведут при эксплуатации воздушных судов, на крышах зданий и сооружений, линиях железных дорог и электропередач, объектах городской инфраструктуры, покрытиях проезжих частей дорог, пешеходных пространствах и аэродромов, а также в судоходстве и на водоёмах (природных и искусственных), при освоении территорий и развитии транспортных связей в приполярных и полярных широтах, разведке и добыче полезных ископаемых, проведении различных строительных и аварийных работ [55, 149, 151].

Для устранения (разрушения) льда и/или снега, в основном, используют методы, перечисленные на рисунке 1.1. Описание этих методов приведено в подразделах 1.2-1.7.



**Рисунок 1.1 – Наиболее распространённые методы борьбы со льдом и  
снегом**

Кроме перечисленных методов на рисунке 1.1, применяют способы, направленные на предотвращение появления снега и льда – высаживание деревьев с кустарниками, размещение различных специальных ограждений (снегозадерживающих и снегопередающих заборов, ограждений из снегозадерживающих щитов) [46, 47, 76, 122, 162] по периметру эксплуатируемых площадей, а также вдоль автомобильных и железных дорог.

К менее распространённым средствам борьбы со льдом и снегом относятся лучевые [179, 196], электроимпульсные [84, 104], электрогидравлические разработки [164].

## 1.2 Механический метод борьбы

Для многих случаев борьбы со льдом и снегом этот метод является одним из самых эффективных. При этом, механический метод является экологически более безопасным и менее затратным с экономической точки зрения, чем тепловой, химический и отчасти фрикционный. Однако, при наличии особо прочных участков льда и/или уплотнённого снега (снежного наката) значительной толщины, использование механических средств борьбы может быть неэффективным и даже нецелесообразным.

Ниже приведён краткий обзор средств борьбы со льдом из основных областей реализации механического метода:

- рабочих органов машин и устройств, предназначенных для очистки проезжих частей дорог, пешеходных пространств и аэродромов от зимней скользкости;
- железнодорожной техники, применяемой для борьбы со снежными заносами и гололёдными образованиями;
- оборудования, используемого в условиях водоёмов.

В этих трёх областях борьбы используют и обычные ручные инструменты (лом, кайло, пешня и др.), но эффективность их применения значительно меньше, чем у рассматриваемых в настоящем подразделе средств.

Далее рассмотрены наиболее распространённые типы уборочных машин (таблица 1.1) и устройств, с некоторыми менее распространёнными типами уборочной техники, применяемые в том числе для механической очистки покрытий в зимний период. Анализ выполнен в части назначения этих машин и устройств, а также конструктивных особенностей, преимуществ и недостатков их рабочих органов.

**Таблица 1.1 – Наиболее распространённые типы уборочных машин для зимней механической и комбинированной очистки покрытий**

Тип уборочных машин	Примеры модификаций
<p><i>Плужно-щёточные снегоочистители</i></p>	<div data-bbox="874 331 1262 528" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="786 539 1342 622">Поливомоечная машина ПМ-130Б (зимний вариант)</p> <div data-bbox="890 622 1235 824" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="863 831 1262 913">Коммунально-уборочная машина КМ-82 БГ</p> <div data-bbox="866 913 1259 1122" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="772 1128 1353 1249">Дорожно-комбинированная машина КО-823-04 (с поливомоечным оборудованием)</p>
	<div data-bbox="852 1261 1272 1462" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="820 1469 1305 1592">Многоцелевая прицепная аэродромная машина Vammas PSB 5500H</p> <div data-bbox="858 1597 1267 1778" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="754 1785 1374 1823">Аэродромная уборочная машина ДЭ-224</p> <div data-bbox="799 1823 1329 1980" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="780 1986 1347 2060">Машина для очистки аэродромных покрытий Амкодор 9561 (ДЭ-235)</p>

## Продолжение таблицы 1.1

<p><i>Автогрейдеры</i></p>	 <p>Автогрейдер ДЗ-98</p>  <p>Автогрейдер ДЗ-180</p>
<p><i>Снегопогрузчики</i></p>	<p><u>Ковшовые</u></p>  <p>Снегопогрузчик ПФС-0,75Б-2</p> <p><u>С питателями лапового типа</u></p>  <p>Снегопогрузчик ТКМ-237-02</p> <p><u>С питателями шнекового типа</u></p>  <p>Снегопогрузчик ТКМ-237-01</p>

## Продолжение таблицы 1.1

	<p><u>С питателями фрезерного типа</u></p>  <p>Снегопогрузчик КО-207</p>
<p><i>Роторные снегоочистители</i></p>	<p><u>Одноэлементные</u></p> <p><i>С режущим ротором</i></p>  <p>Снегоочиститель роторный S 3.1 Schmidt</p> <p><u>Двухэлементные</u></p> <p><i>С питателями шнекового типа</i></p>  <p>Шнекороторный снегоочиститель ДЭ-226 (Амкодор 9531/КО 605М)</p> <p><i>С питателями фрезерного типа</i></p>  <p>Фрезерно-роторный снегоочиститель ДЭ-250</p>

Двигатель с передачей – это *привод* дорожной уборочной машины. Привод принято классифицировать по виду передаваемой энергии, её количеству и типу двигателя (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Классификация привода

Привод дорожных уборочных машин	
Вид передаваемой энергии передачи	Тип двигателя
механическая, электрическая, гидравлическая, пневматическая, комбинированная	электромеханический, дизель-механический, дизель-гидравлический, электрогидравлический, турбомеханический

Щёточными рабочими органами (с доработанным приводом, специальных конструкций, в виде наборных дисков и т.д.) оснащают подметально-уборочные и аэродромные уборочные машины, плужно-щёточные, тракторные и роторные снегоочистители [17, 102, 113, 155]. С помощью данного оборудования счищают оставшийся после прохода отвала рыхлый снег толщиной до 3 см, а также свежевывавший снег толщиной до 15 см. Однако щёточным оборудованием практически невозможно разрушать и удалять прочные участки зимней скользкости, в этом случае ворс щёток при соприкосновении с разрушаемой поверхностью будет прогибаться, не обеспечивая необходимую силу резания.

На плужно-щёточные снегоочистители и аэродромные уборочные машины [68, 101] устанавливают отвалы, снабжённые эластичными ножами, выполненными из полиуретана или жёсткой резины, для защиты от повреждения очищаемого покрытия. Отвалы, как и щёточное оборудование, располагают на базовых машинах либо спереди, либо под днищем, либо сзади, а иногда и сбоку. С помощью таких рабочих органов удаляют свежевывавший рыхлый снег с покрытий проезжих частей дорог и взлётно-посадочных полос, но при разрушении прочной наледи эти средства малоэффективны (из-за проскальзывания по её поверхности ножей отвалов).

Автогрейдеры используют для борьбы с прочными слоями зимней скользкости на покрытиях проезжих частей, в случае затруднения или невозможности применения других типов уборочных машин [54, 60, 69, 144, 175]. Основным отвалом у автогрейдера – эффективный рабочий орган для разрушения и уборки верхних слоёв льда и снега. Тем не менее, далеко не всегда отвалами автогрейдеров можно разрушать особо прочные слои, по причине того, что данные



рабочие органы конструктивно не приспособлены для такого вида работ. Поэтому при очистке взлётно-посадочных полос их применяют очень редко.

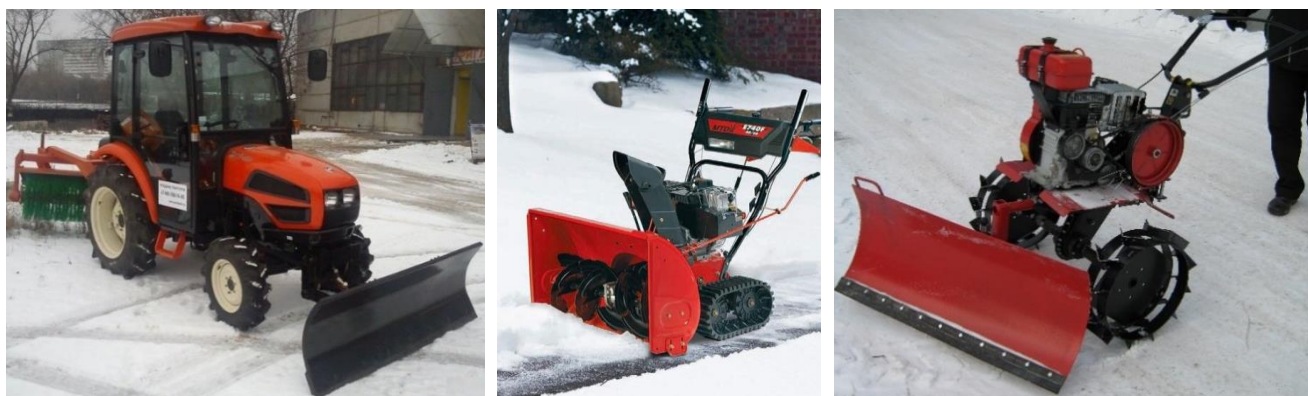
Для устранения снежных заносов и предварительно сформированных валов из снега и раздробленного льда на покрытиях проезжих частей дорог, пешеходных пространств и аэродромов используют роторные снегоочистители [37, 102]. Рабочие органы данных машин предназначены для срезания, захвата и отбрасывания (через выбросные патрубки) удаляемой массы в сторону от зоны очистки. Однако после прохода машины некоторая часть снега всё же остаётся на покрытии, по причине того, что питатели (как шнековые, так и фрезерные) располагают с небольшим зазором относительно выровненной ножами поверхности снежного покрова. К недостаткам роторных снегоочистителей также относится значительная металлоёмкость их рабочих органов и высокая энергоёмкость процесса уборки.

Снегопогрузчики с лаповыми, шнековыми и фрезерными питателями также используют для очистки покрытий от снежных заносов и валов из снега и раздробленного льда [101]. При наличии у погрузчика конвейера (транспортёра), подача на него снега и льда осуществляется с помощью питателя (питателей), а после конвейера снег и мелкие куски льда поступают в кузов транспортного средства, следующего за погрузчиком. В случае отсутствия конвейера, после прохождения снега и раздробленного льда через питатель (питатели), происходит или поступление их в кузов самосвала, или выбрасывание этой массы за пределы очищаемой зоны. Если за погрузчиком с конвейером не отправляют самосвал, то оборудование этого погрузчика служит только для перекидывания снега и мелких кусков льда на покрытие до следующей их уборки.

При помощи уборочных (коммунальных) тракторов в основном ведут борьбу с непрочными слоями зимней скользкости. На эти тракторы, в зависимости от того какие виды навесного уборочного оборудования будут наиболее эффективными для очистки покрытий при текущих условиях, можно поочерёдно устанавливать и использовать практически все совместимые и одновременно соизмеримые с

базовой машиной рабочие органы. Ещё одним важным преимуществом данных тракторов является относительно невысокая стоимость их навесного оборудования.

Для очистки покрытий пешеходных пространств от снега и наледи часто применяют малогабаритную уборочную технику – мини-тракторы, снегоуборщики и мотоблоки (рисунок 1.2) [49]. Основной её недостаток – малая почасовая производительность, то есть такая техника в целом предназначена для расчистки небольших площадей.



а)

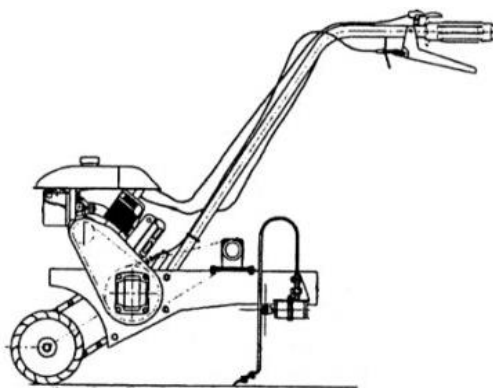
б)

в)

а) мини-трактор *КИОТИ СК22С* с навесным оборудованием; б) фрезерный снегоуборщик *MTD E 740 F*; в) мотоблок *МБ-1* с лопатой *ЛМ-1*

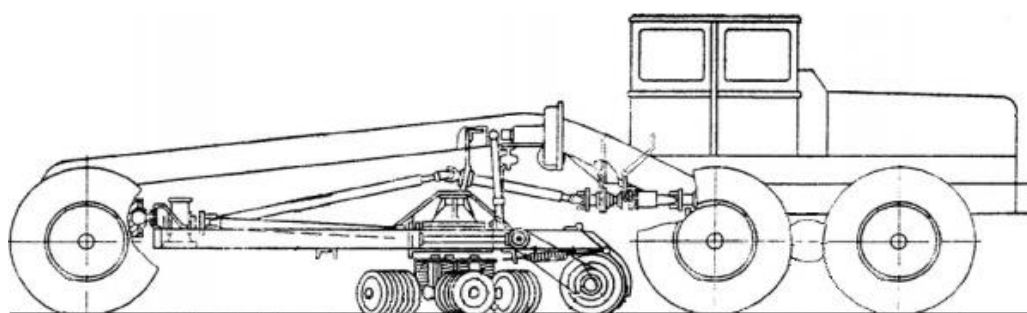
**Рисунок 1.2 – Малогабаритная уборочная техника**

Посредством виброскальвателей (вибрационное ножевое оборудование) [41, 42, 45] можно весьма эффективно срезать и удалять ровные многослойные участки зимней скользкости (при весьма неровной поверхности этих участков, эффективность применения оборудования для вибрационного резания существенно снижается). Одно из таких устройств показано на рисунке 1.3.

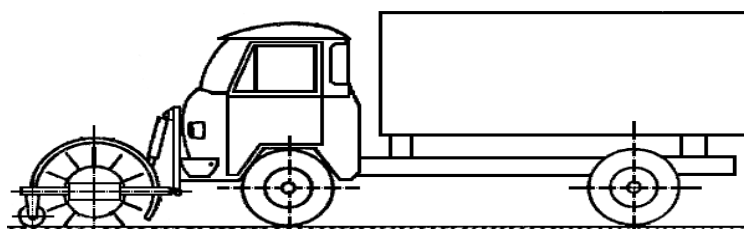


**Рисунок 1.3 – Устройство для разрушения уплотнённого снега**

Кроме того, борьбу с зимней скользкостью можно вести и при помощи рабочих органов, выполненных в виде различных по конфигурации резцов, скальвателей, пил, ножей и ударников [23, 43, 44, 102, 132-136], устанавливаемых как на уборочные машины и устройства, так и на машины, предназначенные для других целей (рисунок 1.4). К недостаткам данных рабочих органов относится быстрое изнашивание частей этого оборудования, контактирующих со слоями зимней скользкости, а также сложность точного регулирования глубины проникновения указанных частей в такие слои. Поэтому существует большая вероятность повреждения очищаемых покрытий.



а)



б)



в)

*а) рабочий орган в виде набора вращающихся дисковых резцов; б) рабочий орган в виде барабана с цепями; в) рабочий орган в виде набора дисков, на которых размещены резцы*

**Рисунок 1.4 – Примеры машин с режущими, ударными и скальвающими рабочими органами**

При использовании современной дорожной уборочной техники очень трудно обеспечить полную очистку покрытий. И всё же, при решении задач, связанных с устранением зимней скользкости, для нас определённый интерес представляют плужно-щёточные машины и уборочное оборудование ударного типа, поскольку при *совместном* использовании данных видов техники можно значительно повысить эффективность очистки покрытий [97].

Основные технические характеристики распространённых отечественных и иностранных модификаций плужно-щёточных машин представлены в таблице 1.3 [49, 60, 68, 101, 144, 175].

**Таблица 1.3 – Технические характеристики плужно-щёточных дорожных и аэродромных машин**

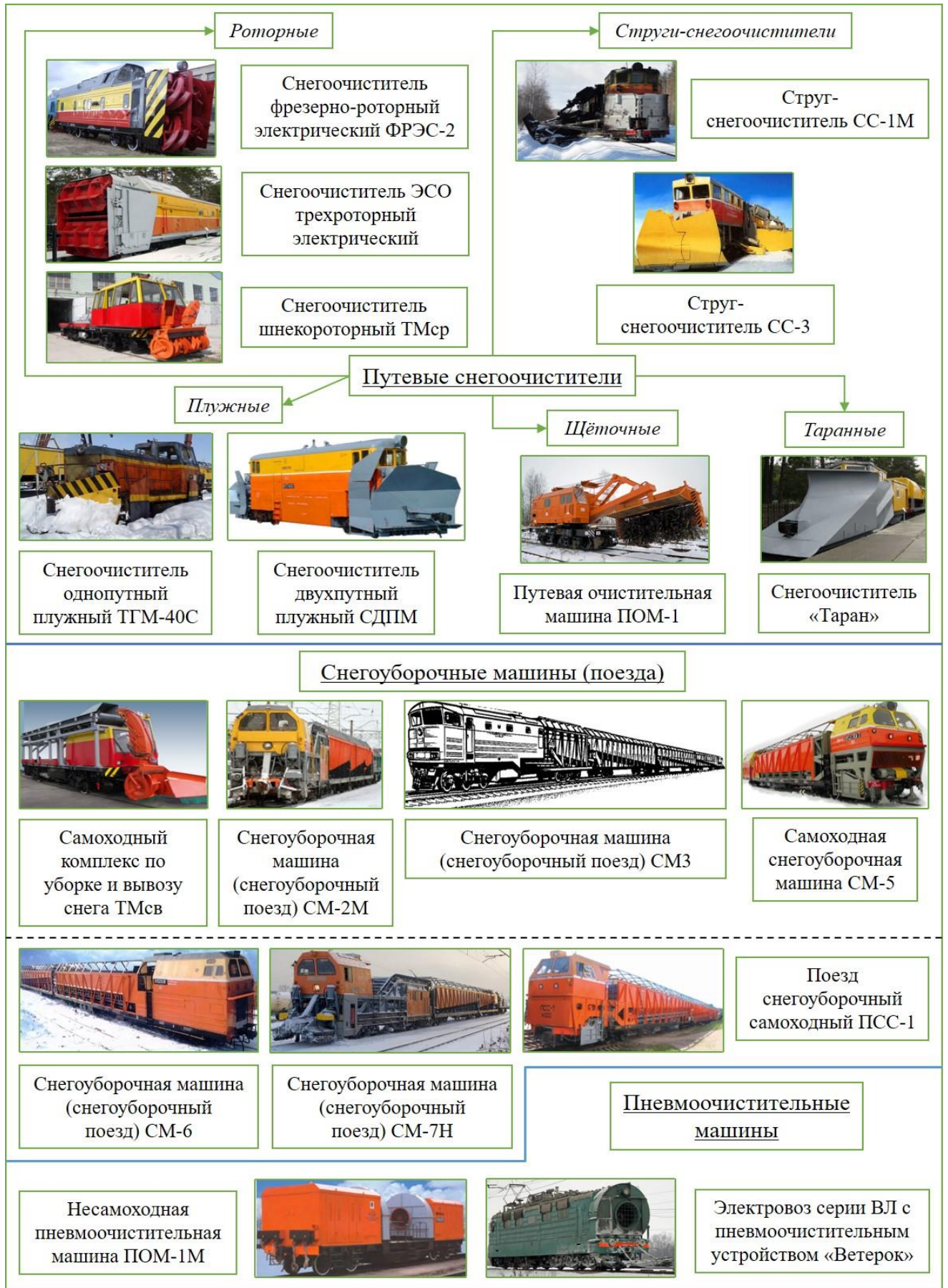
Модификация	ПМ-130Б	КМ-82 БГ	КО-823-04	Vammas SB 5500H	ДЭ-224	Амкодор 9561 (ДЭ-235)
Страна-производитель	Россия	Россия	Россия	Финляндия	Беларусь	Беларусь
Базовое шасси	ЗИЛ-13076	МТЗ-82.1	КАМАЗ53215	Vammas SB	МАЗ-546П	МоАЗ-6442
Мощность, кВт	110	60	165	313	165	165
Масса, т	11,2	4,37	22,4	15	31	31,9
Максимальный крутящий момент, Н·м	402	290	912			
<i>Скорость движения, км/ч</i>						
Транспортная	35	20	60	40-60	40	44
Рабочая	10	12,5	10-20	40-60	25	25
<i>Габариты, м</i>						
Ширина	2,42	2,4	2,5	7,48	6,04	4,52
Длина (с оборудованием для уборки снега и раздробленных ледяных образований)	7,72	6,36	8,0	12,4	17,1	15,52
Ширина отвала	2,5	2,4	2,5	7,5	5,4	4,52
Ширина щётки	2,3	1,8	2,3	5,5	4,5	4

При этом процесс разрушения участков зимней скользкости оборудованием ударного типа отличается относительно небольшой энергоёмкостью, а плужно-щеточное оборудование (при совместном использовании с ударным) наиболее рационально на начальном и завершающем этапе работ: при выравнивании поверхности таких участков и удалении с покрытия раздробленной ударниками массы. Поэтому лёд и снег будут подвергаться сразу нескольким видам разрушающих усилий. Воздействие данных усилий может быть осуществлено вплоть до самых нижних слоёв скользкости.

В случае необходимости создания устройств ударного действия, подразумевающего незначительное изменение приводов уборочных машин, потребуется, прежде всего, подробное рассмотрение свойств и параметров *льда, видов зимней скользкости* и разработка *моделей* взаимодействия ударников с такими слоями для их разрушения на покрытиях, с учётом того, что будут определены условия, при которых исключается возможность нанесения повреждений покрытиям.

Вместе с тем, для нормативных документов по содержанию покрытий, необходимо разработать отдельные разделы, в которых будут содержаться общие требования по использованию ударных устройств против зимней скользкости, несмотря на их необоснованно небольшую распространённость среди уборочного оборудования.

Снежные заносы и гололёдные образования представляют большую опасность для движения железнодорожного транспорта. Попадание снега и льда на железнодорожные пути является причиной дополнительного сопротивления движению поездов, вызывающей также увеличение расхода энергии (топлива) и снижение скорости движения вплоть до полного его прекращения. Поэтому на участках железных дорог, покрытых снегом и льдом, осуществляют преимущественно механизированную очистку при помощи путевых снегоочистителей (роторных, плужных, щёточных, таранных, стругов), снегоуборочных машин (поездов) и пневмоочистительных машин вентиляторного типа (рисунок 1.5) [33, 67, 74-76, 127].



**Рисунок 1.5 – Основные типы и примеры модификаций железнодорожной уборочной техники, применяемые в России в зимний период**

Щёточные снегоочистители используют, в основном, на железнодорожных путях и стрелочных переводах, расположенных на территориях предприятий (заводов, фабрик, портов и т.д.), для борьбы со снежными заносами толщиной до 0,2-0,4 м и непрочными гололёдными образованиями. Пневмоочистительные машины вентиляторного типа предназначены для удаления снега с перегонов и стрелочных переводов (посредством обдува воздухом) при толщине слоя не более 0,5 м. Однако в процессе работы пневмоочистительных машин и щёточных снегоочистителей, с путей и стрелочных переводов разлетается большое количество снега, представляющего опасность для людей, находящихся вблизи прохождения этой техники.

При толщине слоя выпавшего снега не более 0,6 м, на перегонах используют однопутные плужные снегоочистители (их рабочие органы служат для перемещения снежной массы с железнодорожного пути в боковые стороны). На многопутных участках борьбу с заносами до 1,5 м ведут с помощью двухпутных плужных снегоочистителей (в этом случае производится отсыпка снега и раздробленного льда в полевую сторону). Таранными снегоочистителями на перегонах устраняют заносы толщиной 2,5-3 м.

Мощными путевыми роторными снегоочистителями (преимущественно двух- и трёхроторными, а также фрезерно-роторными) осуществляют устранение заносов толщиной 2,5-4,5 м. Для увеличения высоты убираемого слоя в трёхроторных и фрезерно-роторных снегоочистителях роторы-питатели размещают один над другим. Менее мощные роторные снегоочистители применяют, если толщина снежного покрова составляет не более 1 м.

Необходимо отметить то, что на многих снегоочистителях в качестве рабочих органов также устанавливают крылья для увеличения ширины захвата снега.

Струги-снегоочистители применяют для борьбы со снегом (при толщине слоя до 1,5-2 м) на перегонах, станционных путях и промежуточных станциях, а также для скалывания льда, планировки снежных валов (образованных после прохода плужных снегоочистителей), отвалки снега в специально отведённых местах выгрузки снегоуборочных составов, вскрытия кюветов от снега, с целью пропуска

весенних вод и удаления снега из выемок. Рабочими органами струга-снегоочистителя является пара боковых крыльев и пара снегоочистительных устройств, установленных в торцевых частях. Каждое снегоочистительное устройство состоит из двух вертикальных щитов с механизмом их регулирования. Система управления рабочими органами у таких машин пневматическая.

Железнодорожные снегоуборочные машины предназначены для очистки от снега и льда станционных участков путей, стрелочных переводов, а также горловин.

На головные машины снегоуборочных поездов устанавливают заборные органы (роторы-питатели, ножи), устройства для скалывания (разрушения) льда (уплотнённого снега), крылья с щётками и, при необходимости, другое уборочное оборудование. В процессе работы снегоуборочных поездов производится забор снега и раздробленного льда для подачи на загрузочный конвейер, а затем, при помощи этого конвейера, осуществляется перемещение массы либо в первый промежуточный полувагон, расположенный за головной машиной, либо в специальный бункер, размещённый на головной машине. Далее происходит поступление снега и раздробленного льда на пластинчатый конвейер-накопитель, с последующей их транспортировкой вдоль состава по наклонным пластинчатым конвейерам, выступающим за торцевые стенки всех полувагонов. Причём конвейер предыдущего полувагона перекрывает конвейер последующего. Таким образом, обеспечивается заполнение полувагонов состава. После завершения погрузки, состав отправляют к специально отведённому месту выгрузки.

В одновагонных снегоуборочных машинах рабочие органы и разгрузочные устройства те же, что и у многовагонных, но одновагонные машины используют, прежде всего, для очистки стрелочных переводов и околоторочных путей.

С помощью машин, устройств и средств, используемых в условиях водоёмов, осуществляют следующие операции:

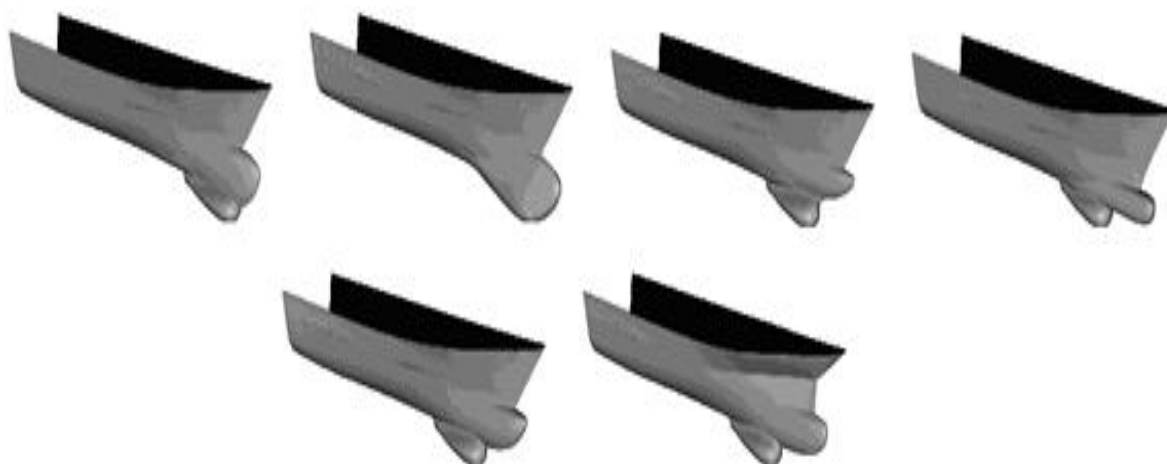
- выполняют в ледяном покрове проходы для судов, траншеи, щели, отверстия и проруби;
- расчищают водоёмы и прибрежные территории ото льда;



- ведут борьбу с ледяными заторами и айсбергами;
- ведут борьбу с обледенением судов и гидротехнических сооружений.

К взламывающим средствам относятся различные ледокольные системы [105, 106], виброударные инструменты [9], сбрасываемые грузы.

Большую часть взламывающих средств устанавливают на ледовых судах. В этом случае ледяной покров разрушают за счёт форштевня оригинальной формы, специальных расширений (бульб) нижних частей носовых оконечностей судов (рисунок 1.6) [148], раскачивающих устройств на лодках [15], изменения угла наклона бульба, наличия у корпуса судна откосов и обводов, создания бульбом опорной волны или снижения коэффициента трения по льду в подводном положении до 0,01. Взламывание ледяного покрова также осуществляют путём подачи под него газа или сжатого воздуха [30].



**Рисунок 1.6 – Некоторые конфигурации судовых подводных бульб**

К режущим средствам относятся следующие машины и устройства:

- с пильными цепями различных модификаций (недостатком подобных устройств является то, что пропилы быстро смыкаются при низких температурах);
- с баровыми рабочими органами [29, 38];
- с гибкими режущими рабочими органами [117];
- с различными по конфигурации фрезами и резцами в качестве рабочих органов [88, 105, 119, 120].

Скалывающие средства (ледовые струги, скребки и ледоочистительные устройства) [18, 71, 106, 168, 169] применяют потому, что лёд обладает свойством хрупкого разрушения в результате действия волн напряжений.

Гидроструйные средства используют, в основном, для разрушения ледяного покрова акваторий [19], резания льда на стенах и воротах шлюзов [180], при укладке трубопроводов в районах многолетней мерзлоты [199]. Эти средства наиболее эффективны при резки льда толщиной до 0,6 м, но при большей толщине покрова снижается производительность резания, а количество потребляемой энергии существенно возрастает [173].

Взрывные средства используют при разрушении ледяных заторов, с их помощью пробивают «окна» в ледяном покрове водоёмов и разрушают айсберги. Подрыв заряда приводит к возникновению и распространению ударной волны, в результате действия которой и разрушается лёд.

При проведении ледовых взрывных работ применяют мощные водостойчивые и менее опасные в обращении взрывчатые вещества – радиоуправляемые заряды КБ «Арзамас-16», а также тротил и аммонит (если толщина ледяного покрова составляет менее 0,5 м) [124].

Одиночные заторы разрушают удлинёнными или сосредоточенными зарядами, а небольшие по площади – накладными сосредоточенными. Большие заторы следует разрушать зарядами, закладываемыми под ледяной покров [64, 111, 124].

Преимущество взрывных работ заключается в их незначительных капитальных затратах и простоте средств механизации, необходимых при проведении таких работ.

Основной недостаток подавляющего большинства из перечисленных средств для разрушения ледяного покрова водоёмов состоит в том, что их невозможно (прежде всего, по причине сложности переоборудования) использовать для борьбы с зимней скользкостью на покрытиях проезжих частей дорог и пешеходных пространств.

### 1.3 Комбинированный метод борьбы

Очевидно, что при сочетании разных по характеру воздействия средств происходит существенное улучшение процесса борьбы со льдом и снегом.

Для разрушения ледяного покрова водоёмов [32] применяют комбинированные судовые устройства и отдельные конструкции [20-22], с механическими, тепловыми и другими средствами борьбы. Комбинированный метод также реализуют и при удалении (снятии) ледяных чаш с подводных частей корпусов судов посредством подогрева, скалывания и дальнейшего смещения льда специально сформированным потоком воды или воздуха [13, 71].

В зимний период для содержания покрытий проезжих частей дорог и пешеходных пространств часто применяют комбинированные уборочные машины, которые оснащают рабочими органами для механической очистки, распределителями и резервуарами для противогололедных материалов (ПГМ) [49]. Одна из таких машин показана на рисунке 1.7. Как правило, последовательность использования оборудования комбинированных уборочных машин выбирают перед началом работ, в зависимости от прочности, площади и толщины участков зимней скользкости.



Рисунок 1.7 – Комбинированная уборочная машина КрАЗ С20-2R0

Кроме того, для борьбы с зимней скользкостью используют многокомпонентные комбинированные ПГМ (смеси из фрикционных и химических компонентов) [56]. В основном, к химическим компонентам комбинированных материалов относятся твёрдые соли, жидкие хлориды (натрия,

кальция, магния), ингибиторы коррозии. Наиболее эффективными комбинированными ПГМ являются фрикционно-химические смеси с содержанием формиата натрия и мраморной крошки (например, в Москве за первый зимний период использования таких смесей на покрытиях пешеходных пространств удалось снизить количество пострадавших от зимней скользкости почти в 2,5 раза) [6, 146].

#### 1.4 Термический метод борьбы

Этот метод заключается в воздействии тепловыми установками и средствами на лёд и снег. Причём наиболее эффективными считаются такие установки и средства, с помощью которых удаётся предотвратить повторное образование льда и появление снега в местах устранения.

При сравнении затрат разрушения единицы объёма льда различными видами воздействия установлено, что для использования термических средств, почти всегда требуется расходовать большое количество энергии (только для того, чтобы растопить 1 м<sup>3</sup> льда за один час, при идеальных условиях, необходим источник с мощностью приблизительно 0,1 МВт) [32].

И всё же, в некоторых случаях использование термических средств может быть выгодным. Например, зачерняющие средства (фосфоритная мука, шлаковая пыль, угольная пыль, отходы литейной промышленности в виде формовочной земли) применяют из-за очень большой отражательной способности поверхности льда (около 90 % солнечной радиации, взаимодействующей с этой поверхностью, возвращается назад в атмосферу) [27, 36, 66, 157, 170, 171]. При нанесении на поверхность льда зачерняющих материалов, для таяния необходим лишь доступ к ней солнечной энергии, но использование таких материалов ограничивается в случае возникновения облачности, выпадения осадков, наличия воды на поверхности [148].

Более энергетически затратными являются пневматические, гидродинамические, паро-водовоздушные и электротермические средства.

Пневматические [28, 72, 139] и гидродинамические средства [70, 163] применяют для разрушения ледяного покрова водоёмов либо посредством подачи тёплых масс придонных вод и выпуска специально нагретой воды к местам льдообразования, либо путём создания направленного скоростного потока воды (турбулентной струи).

Паро-водовоздушные средства (специальные трубопроводы, перфорированные трубы, паропроводы, системы отопления отсеков судов) используют для образования майн в ледяном покрове водоёмов [140] и создания незамерзающих акваторий [71], а также для борьбы с обледенением надводных и подводных частей корпусов судов [12, 14, 16]. На самолёты зачастую устанавливают воздушно-тепловые противообледенительные системы [160].

Электротермические средства в виде электротермобуров, электротермобуровых снарядов и электроигл [95, 114-116] предназначены для проходки скважин в ледниках и массивах льда. К электротермическим средствам также относятся аппараты с нагревательными приводами для резания ледяного покрова водоёмов [72, 87], проволочные электронагреватели [201] и электротепловые противообледенительные системы, устанавливаемые на судах [5].

Для ликвидации снежных заносов (толщиной до 0,5 м) и непрочных гололёдных образований на станционных участках путей, стрелочных переводов и горловин станций используют железнодорожные реактивные снегоочистители – автодрезины (либо платформы), с установленными на них турбореактивными двигателями (рисунок 1.8) [33, 67]. В процессе работы реактивного снегоочистителя из его сопла на путь выдувается струя горячих выхлопных газов, растапливающих и испаряющих снег и лёд.



**Рисунок 1.8 – Реактивный железнодорожный снегоочиститель**

Текущую очистку стрелочных переводов от снежных заносов и наледи осуществляют в том числе и при помощи систем электрообогрева с дистанционным и/или местным управлением. Оборудование системы для электрообогрева стрелочного перевода (например, кабельного типа) показано на рисунке 1.9.

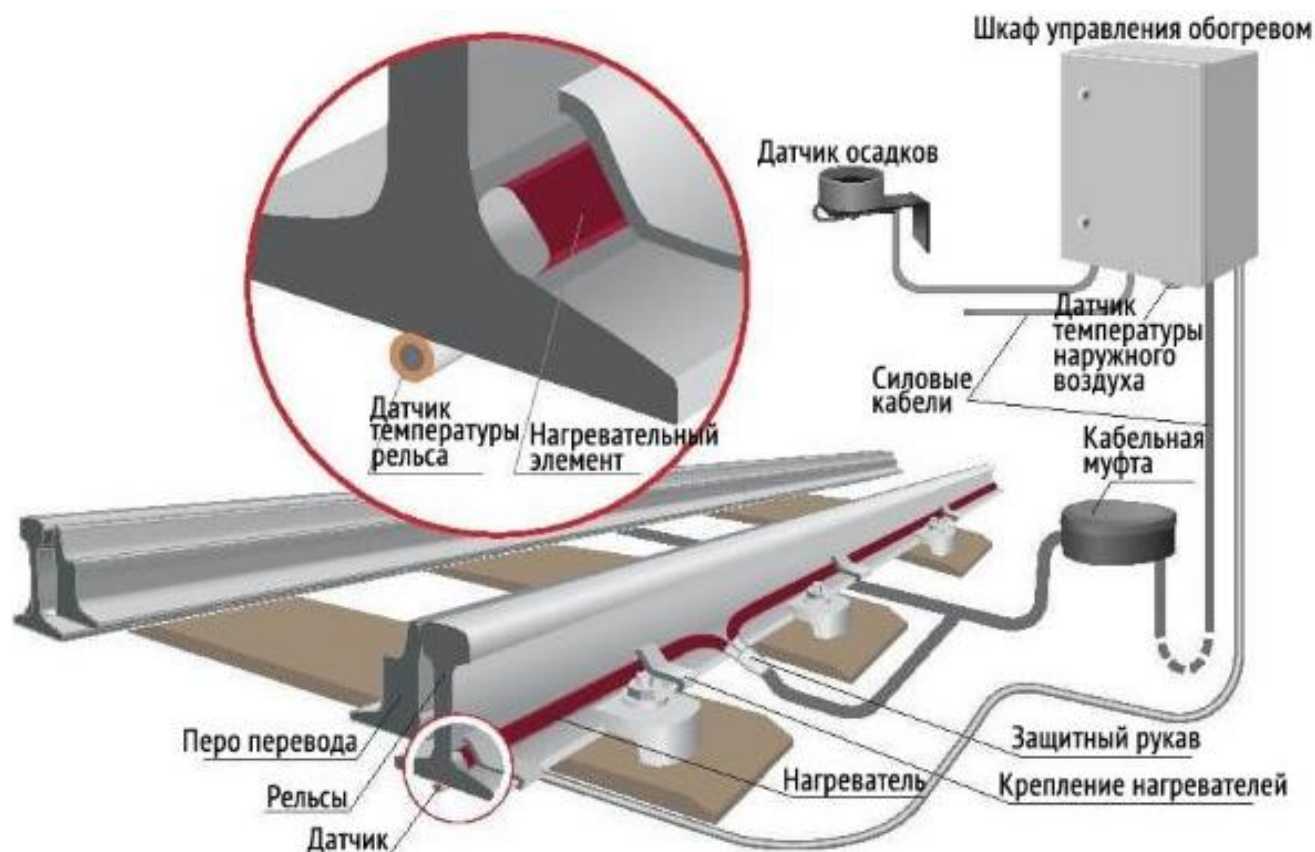


Рисунок 1.9 – Кабельная система электрообогрева стрелочного перевода

Включение нагревательных элементов системы производится с помощью терморегулирующей аппаратуры. В случае поступления сигнала от одного из датчиков, система либо отключается, либо изменяется мощность на нагревательных элементах.

Ниже приведены устройства, которые применяют для покрытий проезжих частей, пешеходных пространств и взлётно-посадочных полос в зимний период.

Специальные системы обогрева («системы растапливания на месте») встраивают в покрытия пешеходных пространств, автотранспортных стоянок, мостов и в кровли зданий для обеспечения таяния льда и снега [24, 25, 101]. По причине существенных капитальных вложений при изготовлении и высоких

эксплуатационных расходов, системы обогрева используют только там, где либо неэффективны механические средства разрушения, либо возможно повреждение покрытий химикатами, либо недопустима задержка транспорта.

Удаление льда и снежного наката с покрытий дорог и взлётно-посадочных полос можно осуществлять при помощи аэродромных тепловых машин ТМ-59 МГ, АИСТ-5ТМ (рисунок 1.10) и других подобных модификаций [8, 24, 25, 68]. В этом случае удаление производится высокотемпературной струёй выхлопных газов от установленного на базовой машине авиационного двигателя и потоком отработавших газов, скорость которого может достигать до 900 м/с.



а) тепловая машина ТМ-59 МГ; б) тепловая машина АИСТ-5ТМ

**Рисунок 1.10 – Аэродромные тепловые машины**

При работе тепловых машин, от покрытия отрываются куски льда, поэтому в полном объёме должны выполняться требования техники безопасности.

### 1.5 Химический метод борьбы

Принцип действия химических (противогололедных, противообледенительных и т.д.) материалов состоит в том, что при контакте этих материалов со льдом или снегом, происходит образование раствора (смеси) с более низкой температурой плавления, чем у исходных составляющих [32].

В области борьбы со льдом и снегом, химические материалы применяют, в основном, для достижения следующих целей:

- разрушения на водоёмах ледяного покрова значительной толщины (в сочетании с механическими устройствами) [7];

- защиты от обледенения металлических поверхностей судов, мостов, кровель зданий [5, 35, 85, 130];

- предотвращения образования льда в авиационных топливных баках, за счёт добавления в керосин специальных присадок на основе производных этиленгликоля [1];

- устранения зимней скользкости с покрытий проезжих частей дорог и пешеходных пространств.

На основе практического применения химических ПГМ, рекомендованных в [123, 126], установлено, что многие такие материалы не соответствуют обязательным для них функциям, перечисленным в этих отраслевых нормативных документах. Именно по этой причине, дорожные и коммунальные службы (организации) начали использовать для борьбы с зимней скользкостью более эффективные и экологически безопасные многокомпонентные химические ПГМ [6, 50, 51, 146].

### **1.6 Фрикционный метод борьбы**

Данный метод состоит в распределении песка, высевок каменных материалов (мелкого гранитного щебня, мраморной крошки и т.д.), шлака, зол уноса, песчано-гравийной смеси и подогретых фрикционных материалов [128] по участкам зимней скользкости на покрытиях проезжих частей для повышения коэффициента сцепления колёс автомобилей с поверхностью этих участков. Фрикционные ПГМ распределяют по дорогам III-V категорий, а также по дорогам, расположенным в районах с продолжительным периодом устойчивых низких температур (от  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [2] и в тех случаях, когда недопустимо использовать химические материалы на дорогах, вблизи которых расположены природные заповедники или водные объекты.

С помощью фрикционных материалов можно лишь временно повысить сцепные качества покрытий проезжих частей, ввиду слабого закрепления этих материалов на поверхности участков зимней скользкости и последующего



смещения большей их части в придорожные полосы (из-за передвижения автомобилей и воздействия ветров).

### **1.7 Резонансное разрушение ледяного покрова**

Суть данного метода заключается в том, что во время движения нагрузки по льду, в последнем развивается система изгибно-гравитационных волн (ИГВ) [82]. При скорости нагрузки близкой к минимальной фазовой скорости ИГВ возникает резонанс (происходит резкое возрастание амплитуды колебаний ледяного покрова, и, при определённых параметрах нагрузки, начинается разрушение льда с минимальными энергозатратами) [83].

Разрушение льда от ИГВ возможно при движении автомобилей и поездов, при взлёте и посадке самолётов, но к наиболее подходящим средствам для реализации резонансного метода разрушения, относятся амфибийные суда на воздушной подушке [129].

### **1.8 Выводы по первому разделу**

1) Термический метод, а также химический, фрикционный, резонансный, механический и комбинированный – основные методы борьбы со льдом и снегом в различных условиях. Для борьбы с зимней скользкостью одним из наиболее подходящих методов (с экологической, экономической и отчасти энергетической точек зрения), считается механический. Тем не менее, при реализации механического метода весьма трудно полностью очистить покрытие ото льда и снега, по причине конструктивного несовершенства рабочих органов современных уборочных машин и устройств. Поэтому нередко приходится использовать дополнительные виды уборочной техники или ПГМ.

2) Для эффективной борьбы с зимней скользкостью лучше всего подходят плужно-щёточные уборочные машины, дополнительно оборудованные ударными

рабочими органами и механизмами точного регулирования внедрения этих рабочих органов в толщу плотных слоёв такой скользкости.

3) При создании рабочих органов ударного типа, в первую очередь следует учитывать свойства и параметры льда, характерные особенности видов зимней скользкости и требуется моделирование вариантов воздействия ударников на участки скользкости, с установлением условий, исключающих разрушение покрытий.

4) Полноценное функционирование ударных уборочных устройств в составе плужно-щёточных машин возможно при условии соответствующего дополнительного оснащения приводов машин. При этом, для реализации такого оснащения не понадобятся серьёзные затраты.

## 2 ЛЕД, КАК ОБЪЕКТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ УБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ

### 2.1 Виды зимней скользкости, ее влияние на движение автомобилей и пешеходов, действующие требования к состоянию покрытий в зимний период после окончания работ по их очистке

Для территории Российской Федерации определены восемь температурных зон, исходя из климатических условий её субъектов. Сведения по зимнему периоду для всех этих зон приведены в таблице 2.1 [58].

**Таблица 2.1 – Основные сведения по температурным зонам России для зимнего периода**

Температурные зоны	Показатели средних из среднемесячных отрицательных температур зимнего периода, °С	Удельный вес зимнего периода в году (в среднем)
I	до 3	0,23
II	до 5	0,33
III	до 8	0,4
IV	до 12	0,45
V	до 18	0,52
VI	до 25	0,6
VII	до 31	0,65
VIII	ниже 31	

Данные из таблицы 2.1 являются свидетельством того, что в России имеются все условия для образования зимней скользкости на покрытиях проезжих частей дорог и пешеходных пространств.

В разделе 2 Отраслевого дорожного методического документа Министерства транспорта Российской Федерации [126] приведена классификация видов зимней скользкости для покрытий проезжих частей дорог, а также перечислены внешние признаки и условия образования таких видов. Согласно этому документу, к видам зимней скользкости относятся: рыхлый снег, снежный накат, стекловидный лёд. Образование перечисленных видов происходит и на покрытиях пешеходных пространств.

На рисунке 2.1 показаны виды зимней скользкости, которые представляют наибольшую опасность для передвижения машин и пешеходов.



**Рисунок 2.1 – Наиболее опасные виды зимней скользкости**

Наличие зимней скользкости на покрытиях проезжих частей и пешеходных пространств представляет большую угрозу для передвижения транспортных средств и людей: у автомобилей снижается устойчивость и скорость движения, увеличивается тормозной путь и вероятность заносов, а пешеходы подвергаются риску получения ушибов, переломов и черепно-мозговых травм [6, 99].

Для обеспечения безопасного движения транспортных средств, коэффициент сцепления колеса автомобиля с покрытием должен быть не менее 0,3, согласно требованиям пункта 5.2.2 Государственного стандарта [57]. Однако, в большинстве случаев, из-за образования зимней скользкости, коэффициент сцепления составляет менее 0,3 (таблица 2.2).

**Таблица 2.2 – Коэффициент сцепления шин автомобилей с покрытиями проезжих частей в зимних условиях [63, 126]**

Виды зимней скользкости и других схожих образований	Коэффициент сцепления
Стекловидный лёд	0,08-0,15
Гололёд (на асфальтобетонном покрытии)	0,09-0,1
Снежный накат	0,1-0,25
Снеговой покров с обледеневшей поверхностью после россыпи песка по норме 0,1 м <sup>3</sup> на 1000 м <sup>2</sup> дороги	0,17-0,19
Рыхлый снег	0,2
Снеговой покров (толщина 50 см) после прохода грейдера	0,24-0,28
Снеговой покров с обледеневшей поверхностью после россыпи песка по норме 0,4 м <sup>3</sup> на 1000 м <sup>2</sup> дороги	0,25-0,26

Вместе с тем, ежегодно зимой в России свыше 50 тысяч человек получают ранения по причине аварий, произошедших в связи с неудовлетворительными дорожными условиями, но ситуация с травматизмом пешеходов обстоит ещё хуже – в городе с населением 1 млн. человек за зимний период в медицинские учреждения с травмами, полученными в результате падения на скользких покрытиях улиц, обращается около 6-7 тысяч человек [80]. При этом, в

Министерстве здравоохранения РФ не ведётся централизованного учёта числа пострадавших от зимней скользкости пешеходов.

Размеры участков зимней скользкости на покрытиях не должны превышать значений, установленных в Государственном стандарте [57] и Отраслевом дорожном методическом документе [121]. Предельные значения размеров из указанных документов содержатся в таблице 2.3.

**Таблица 2.3 – Предельные значения размеров (толщин и высот) некоторых видов зимней скользкости на различных покрытиях**

Виды зимней скользкости и других схожих образований	Размер, категории дорог, группы улиц
<u>Проезжие части автомобильных дорог</u> (наличие на дорожных покрытиях участков зимней скользкости, с указанными ниже предельно допустимыми значениями размеров, возможно только до окончания работ по их устранению)	
Слой рыхлого снега толщиной не более, см	1 (IA-III) 2 (IV)
Слой талого снега толщиной не более, см	2 (IA-III) 4 (IV)
Слой (плёнка) стекловидного льда толщиной не более, мм	1-10 (для всех категорий автомобильных дорог)
<u>Обочины автомобильных дорог</u> (состояние дорожных покрытий после окончания работ по устранению зимней скользкости)	
Слой рыхлого снега толщиной не более, см	1 (IA, IB, IB, II) 3 (III)
Слой талого снега толщиной не более, см	2 (IA, IB, IB, II) 6 (III) не нормируется (IV, V)
Снежный вал высотой м, не более	0 (IA, IB, IB) 1 (II-IV)
Слой (плёнка) стекловидного льда	0 (для обочин всех категорий автомобильных дорог)
<u>Улицы</u> (наличие на покрытиях участков зимней скользкости, с указанными ниже предельно допустимыми значениями размеров, возможно только до окончания работ по их устранению)	
Слой рыхлого снега толщиной не более, см	5 (для всех групп улиц)
Слой талого снега толщиной не более, см	5 (для всех групп улиц)

Продолжение таблицы 2.3

Слой (плёнка) стекловидного льда толщиной не более, мм	1-10 (для всех групп улиц)
<i>Тротуары</i> (наличие на покрытиях участков зимней скользкости, с указанными ниже предельно допустимыми значениями размеров, возможно только до окончания работ по их устранению)	
Слой рыхлого снега толщиной не более, см	5 (для тротуаров всех категорий автомобильных дорог)
Слой талого снега толщиной не более, см	4 (для тротуаров всех категорий автомобильных дорог)
Слой (плёнка) стекловидного льда толщиной не более, мм	1-10 (для тротуаров всех категорий автомобильных дорог)
Снежный вал высотой м, не более	0 (для тротуаров всех категорий автомобильных дорог)
<i>Заездные карманы и посадочные площадки остановочных пунктов</i> (состояние покрытий после окончания работ по устранению зимней скользкости)	
Слой рыхлого снега толщиной не более, см	2 (IA, IB) 6 (IB, II, III) 8 (IV, V)
Слой уплотнённого снега (снежного наката) толщиной не более, см	0 (IA, IB) 4 (IB, II, III) 6 (IV, V)
Слой (плёнка) стекловидного льда толщиной не более, мм	0 (для всех категорий автомобильных дорог)

Требования к состоянию покрытий после выполнения работ по частичному или полному устранению зимней скользкости из таблицы 2.3 с требованиями к срокам устранения из [57, 121] являются весьма жёсткими, но при условии их неукоснительного соблюдения дорожными и коммунальными службами, можно минимизировать негативные последствия, вызванные от образования зимней скользкости.

Очевидно, что не только в России, но и в странах со схожим климатом, несвоевременное и некачественное устранение зимней скользкости с покрытий проезжих частей и пешеходных пространств, является причиной угрозы жизни, здоровью и имущества граждан, а также увеличения нагрузки на бюджет государства в виде оплаты лечения, страховых случаев и т.д.

Ведение эффективной борьбы с зимней скользкостью в значительной степени зависит от свойств и характеристик льда.

## 2.2 Основные характеристики льда

Лёд (твёрдое агрегатное состояние воды) оказывает существенное влияние на климат Земли и хозяйственную деятельность человека, так как лёд является одним из основных компонентов криосферы [167]. На Земле имеется большое количество природных льдов (рисунок 2.2) [40, 92, 138], например, площадь только Антарктического и Гренландского ледяных щитов составляет около 10 % от всей поверхности планеты, а морским льдом покрыто не менее 10 % поверхности Мирового океана [206].



**Рисунок 2.2 – Информационная схема о группах и основных видах природных льдов на Земле**

При этом льдообразование зачастую представляет угрозу для безопасного функционирования многих видов транспорта, является причиной травматизма людей (из-за падения сосулек с крыш домов, наличия зимней скользкости на покрытиях), ухудшения условий проведения строительных и аварийно-



восстановительных работ, а также повреждения линий электропередач (ЛЭП), кровель зданий, объектов (конструкций) городских инфраструктур, деревьев, растений и т.д.

В настоящее время известно о шестнадцати кристаллических модификациях (структурах) [184, 205] и трёх аморфных разновидностях льда [86]. Самая распространённая модификация льда на Земле – модификация *Ih*. Другие модификации возникают или могут быть получены только при очень низких температурах и высоком давлении [200].

На фрагменте структуры льда *Ih* (рисунок 2.3) показано расположение атомов кислорода и водорода. Итак, каждый атом кислорода расположен в центре тетраэдра, образованного из четырёх других атомов кислорода, отстоящих друг от друга на расстоянии  $2,76 \cdot 10^{-8}$  см [61, 176]. Атомы водорода расположены между атомами кислорода. При этом одна пара атомов водорода соединена с атомом кислорода полярной ковалентной связью, а вторая пара – водородной связью (пунктирные линии на рисунке 2.3), то есть они относятся к двум другим молекулам  $H_2O$  [78].

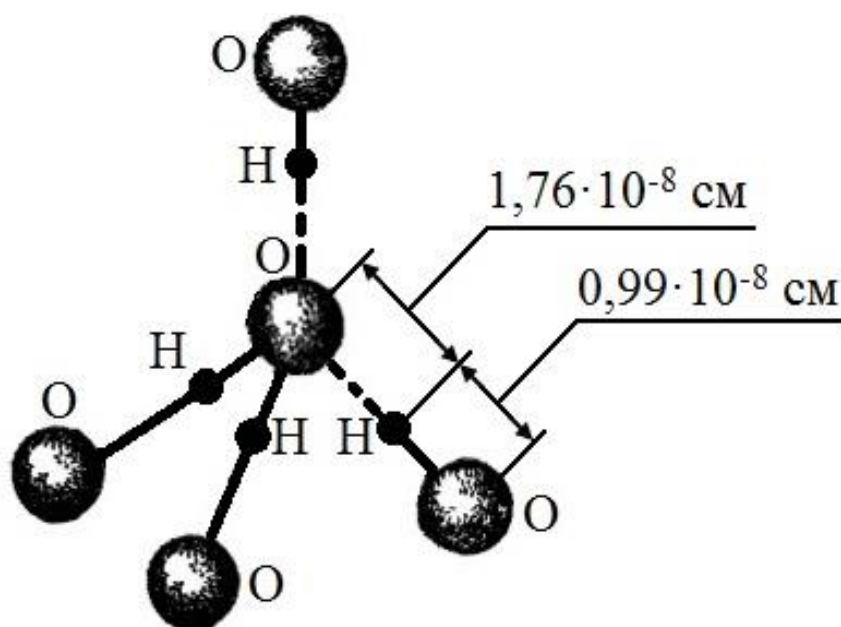
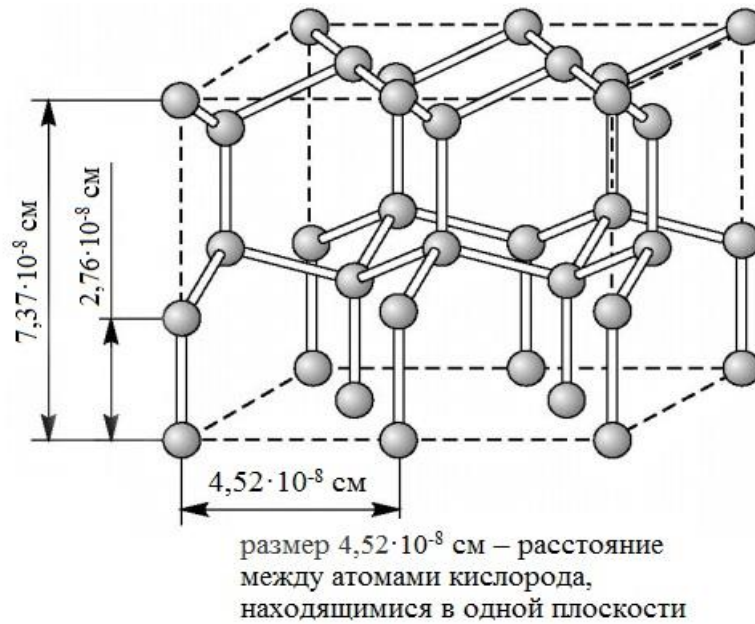


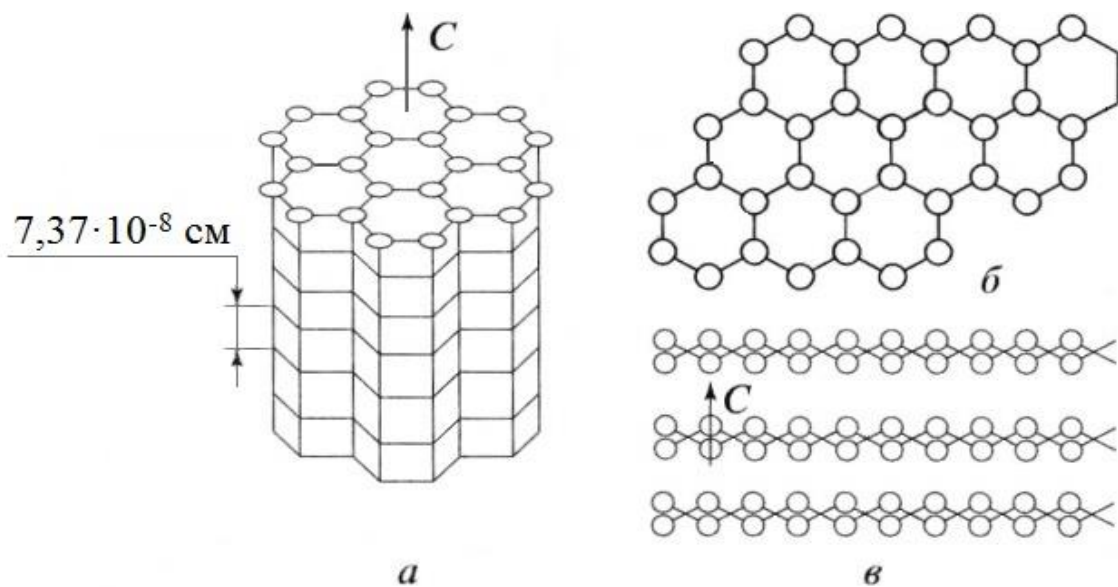
Рисунок 2.3 – Фрагмент структуры льда *Ih*

В свою очередь, кристаллическая структура льда образована из совокупности тетраэдров (рисунок 2.4) [110].



**Рисунок 2.4 – Кристаллическая структура обычного гексагонального льда *Ih***

Кристалл льда – уложенные послойно плотноупакованные молекулярные плоскости (прочные и гибкие элементарные пластины) [73, 110, 156]. Известно, что *C*-ось кристалла перпендикулярна его базисной плоскости [34, 61, 161]. Кристаллы же находятся в параллельных базисных плоскостях, а расстояние между этими плоскостями составляет около  $7,37 \cdot 10^{-8}$  см (рисунок 2.5) [143, 188, 200]. Однако связей между базисными плоскостями кристаллов относительно немного (в таких местах прочностные показатели льда самые низкие) [143].



*a* – изометрический вид; *б* – вид сверху; *в* – вид сбоку

**Рисунок 2.5 – Схематическая структура кристаллов льда *Ih***

Исследование физико-механических свойств льда с целью его последующего разрушения актуально для многих отраслей народного хозяйства страны [96, 151]. В частности, для создания эффективных способов и средств борьбы с *зимней скользкостью*, необходимо учитывать такие свойства льдообразований, как адгезия льда к покрытиям, плотность, теплоёмкость, теплопроводность, скрытая теплота плавления, прочность [101]. Однако пластические свойства льда (вязкость, ползучесть и релаксация) оказывают незначительное влияние на характер его взаимодействия с рабочими органами уборочных машин, так как эти свойства не успевают проявиться за период действия нагрузки [49]. При этом значения параметров, характеризующих физико-механические свойства льда, следует определять экспериментальным путём, с учётом текущих местных условий.

*Плотность* «чистого» льда  $\rho_l$  при 0 °С и давлении 0,101 МПа равна 916,8 кг/м<sup>3</sup> (плотность воды при положительной температуре близкой к 0 °С равна 999,87 кг/м<sup>3</sup>), а у морского льда величина плотности может составлять и до 953 кг/м<sup>3</sup> (по причине содержания в нём солей и различных примесей) [40, 93]. При этом плотность льда под воздействием давления практически неизменна. Коэффициент сжимаемости составляет  $2 \cdot 10^{-5}$ .

С понижением температуры происходит снижение теплоёмкости льда (в диапазоне от 0 до минус 100 °С примерно на 34 % или с 2,12 до 1,39 кДж/°С) и повышение теплопроводности (в том же диапазоне, примерно на 36 % или с 2,22 до 3,48 Вт/м·°С) [40, 101, 141, 159].

Скрытая теплота плавления – количество теплоты, необходимое для превращения одного килограмма твёрдого тела в жидкое, но без изменения его температуры, а у льда величина этого параметра близка к 335 кДж/кг [26, 100]. Скрытая теплота парообразования у воды (2260 кДж/кг) в 6,8 раз выше, чем скрытая теплота плавления льда [142].

При приложении какой-либо нагрузки начинается деформирование льда, приводящее к тому, что лёд начинает вести себя как упругое, пластическое и хрупкое тело [39]. В основном, проявление этих трёх свойств бывает

одновременным, но может быть и в разных комбинациях. Например, при медленном нагружении, кроме упругих деформаций, происходят и вязкопластические, которые сопровождаются возникновением микротрещин и завершаются хрупким разрушением. Импульсные нагрузки являются причиной возникновения упругих деформаций и хрупкого разрушения.

Далее представлены сведения о прочностных свойствах льда из [31, 39, 40, 49, 65, 90, 101, 137].

*Прочностью* материала называют способность этого материала к сопротивлению разрушению при воздействии механических нагрузок. Прочность льда зависит от его температуры и структуры, наличия или отсутствия в нём примесей, а также от условий льдообразования, размеров исследуемых образцов, скорости приложения нагрузки, условий проведения эксперимента и других факторов.

*Предел прочности* – величина наибольшего напряжения сопротивления образца (твёрдого тела) непосредственно перед его разрушением. Однако для льда эта величина отчасти считается условной из-за того, что разрушение льда не обусловлено однозначным достижением конкретного значения предела напряжений.

Тем не менее, для льда измеряют пределы прочности на растяжение, сжатие, изгиб, срез и вдавливание.

Измерения величин пределов прочности льда осуществляют не только в лабораториях, выбор условий проведения испытаний зависит от целей задач, связанных с разрушением льда в различных ситуациях. Для определения прочности льда на растяжение (разрыв) и изгиб, в лабораториях используют выполненные из льда пластины, балки и другие подобные образцы.

Величина прочности льда при растяжении  $\sigma_p$  зависит от скорости деформации  $V_d$  исследуемого образца: с увеличением  $V_d$  (от 2,5 до 50 см/мин) происходит снижение прочности в 6-7 раз. В случае растяжения образца вдоль осей

кристаллов, наблюдается увеличение  $\sigma_r$  почти в 2,6 раза, по сравнению с поперечным направлением.

Прочность льда на изгиб  $\sigma_{и}$  для двухопорной балки зависит от её размеров (ширины и высоты), величины разрушающей нагрузки и расстояния между опорами, а для консольной балки величина сопротивления изгибу (помимо разрушающей нагрузки и размеров этого образца) зависит от расстояния от места закрепления консоли до точки приложения разрушающей нагрузки. Большие значения предела прочности льда на изгиб можно получить при испытании малых образцов.

Экспериментальные значения предела прочности льда на сжатие  $\sigma_{сж}$  определены за счёт испытания образцов, выполненных, преимущественно, в форме куба и цилиндра, при больших скоростях нагружения. Опытным путём установлено следующее: получение больших значений  $\sigma_{сж}$  возможно в тех случаях, когда нагрузка приложена под углом  $90^\circ$  к оси кристаллов, а уменьшение величины  $\sigma_{сж}$  наблюдается с увеличением размеров образца и, если скорость нагружения  $V_d$  составляет более 0,2 МПа/с. Кроме того, отмечен рост  $\sigma_{сж}$  с увеличением  $V_d$  при небольших её значениях и дальнейший медленный рост прочности, с одновременным возрастанием  $V_d$ .

Величина сопротивления льда срезу возрастает с понижением температуры (как и пределы прочности у льда при других видах испытаний), но ещё изменяется и от таких факторов, как структура льда, направление среза относительно направлений осей кристаллов, скорость нагружения, давление в плоскости среза. Однако вопрос о сопротивлении льда срезу изучен менее других, по причине затруднений в постановке проведения опытов.

Предел прочности льда на вдавливание определяют при помощи внедрения в него жёсткого тела (штампа). Изменение величины сопротивления и характера разрушения льда в этом случае, зависит от скорости вдавливания штампа в образец, размеров и конфигурации образца и штампа. Необходимо отметить, что вследствие медленного нарастания нагрузки и её длительного действия, наблюдается плавное

внедрение штампа в образец, которое обусловлено ползучестью льда, а в случае быстрого нарастания нагрузки, отмечается хрупкое разрушение образца вблизи границ внедрения штампа, с образованием многочисленных трещин.

Вместе с тем, экспериментальные значения пределов прочности льда часто отличаются (иногда даже в несколько раз) от теоретических представлений о его разрушении. Большой разброс этих значений в научных источниках (таблица 2.4) можно объяснить тем, что прочность льда зависит от многих факторов (они уже были перечислены выше).

**Таблица 2.4 – Минимальные и максимальные значения пределов прочности льда**

Способ разрушения льда	Пределы прочности льда, МПа
Сжатие	1,0-8,0
Растяжение	0,2-2,0
Изгиб	0,4-3,0
Срез	0,2-3,0
Вдавливание штампа	1,0-10,0

Кроме того, в самом льду постоянно происходит рекристаллизация. Наиболее сильно этот процесс проявляется на границе раздела между жидкой и твёрдой фазой.

В целом, лёд – увлекательный объект исследований, в том числе и как *материал* с регулируемой структурой и свойствами [151], необходимый для *моделирования борьбы с зимней скользкостью*.

### **2.3 Общие сведения о моделировании процесса разрушения льда**

Процесс контактного взаимодействия льда с телами и средами, приводящий к частичному или полному его разрушению, является сложным нелинейным процессом, требующим учёта всех нагрузок и деформаций [158, 191]. Для

моделирования этого взаимодействия требуется также и правильное описание поведения льда применительно к конкретным местным условиям.

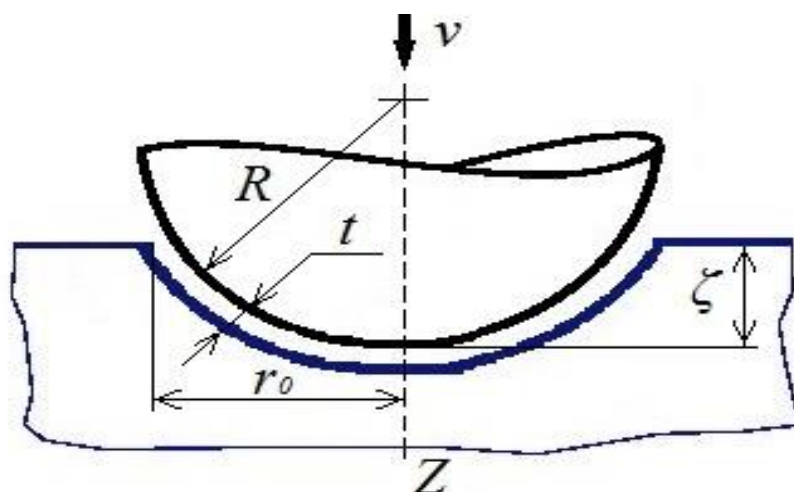
Самый ранний опубликованный метод прогнозирования ледовых нагрузок был предложен Константином Николаевичем Коржавиным в 1940-х годах для определения величин давления, с которыми лёд действует на опоры мостов [89-91], но этот метод не является универсальным описанием механизма процесса разрушения льда [181].

Ниже (в подразделах 2.3.1-2.3.6) представлен анализ состояния некоторых основных моделей для описания и расчёта процесса разрушения льда.

### 2.3.1 Континуальные модели

Поведение твёрдого тела (льда) в континуальных моделях рассматривается как постоянное, с сохраняющейся реологией [158].

Первую достоверную модель такого нагружения разработали Хейсин, Курдюмов и Лихоманов в 1975 году [103, 166]. Для реализации гидродинамической модели удара твёрдого тела о лёд были проведены эксперименты по сбрасыванию на ледяной покров отливок в форме полусфер, изготовленных из стали (рисунок 2.6).



$t$  – толщина промежуточного слоя ( $t \sim 1$  см);  $v$  – скорость ( $v = 100$  см/с);  $r_0$  – радиус отпечатка ( $r_0 \sim 10$  см);  $\zeta$  – параметр малости ( $\zeta = t/r_0$ ,  $\zeta \sim 0,1$ )

**Рисунок 2.6 – Внедрение ударника в лёд**

Здесь промежуточный слой толщины  $t$  формируется между полусферической отливкой и нетронутым льдом. С внедрением в лёд ударника (полусферы), происходит вытеснение раздробленного льда на поверхность.

К этой модели были получены выражения для толщины слоя  $t$ , давления  $p$ , касательных напряжений  $\tau$  на поверхности разрушения, максимальной глубины внедрения в конце удара  $\zeta_{\max}$ , времени удара  $T$ , скорости внедрения  $\bar{v}$ , суммарной силы  $\bar{P}$ , объёма образовавшейся лунки  $V$  [158].

Варста (Varsta) в 1983 году [209] изучал процесс контакта борта судна с ледяным покровом (рисунок 2.7).

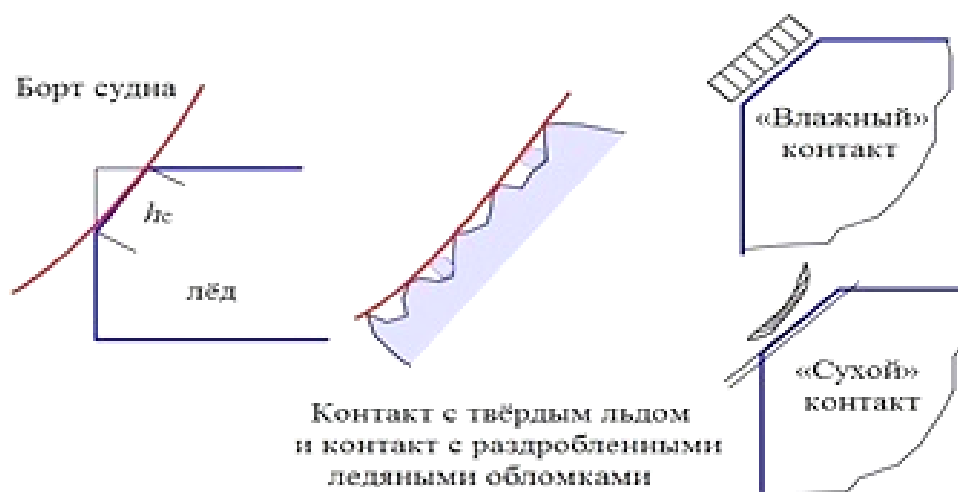


Рисунок 2.7 – Модель Варсты (влажное/сухое взаимодействие)

При проведении экспериментов по разрушению льда о борт судна (прямой контакт, «сухое» взаимодействие) в зону контакта впрыскивали воду («влажное» взаимодействие), наблюдая потом более высокие контактные давления (подача воды в зону контакта была обусловлена необходимостью разработки более совершенной модели разрушения льда). Исходя из данной интерпретации, Варсту также удалось найти объяснение расхождению величин давлений между «влажным» и «сухим» контактом.

При этом, «влажный» контакт в значительной степени соответствовал гидродинамической модели [103, 166], однако для «сухого» контакта требовалось разработать новую модель (чтобы смоделировать такой тип контакта, Варста



применил метод конечных элементов (МКЭ) с критерием прочности Цай-Ву (Tsai-Wu) [177].

Оценивать ледовые нагрузки с помощью нового метода (рисунок 2.8) предложил в 1987 году Риска (Riska) [181, 204]. Моделирование геометрии контакта проводилось с использованием МКЭ. Благодаря смоделированной геометрии контакта, Риска рассчитал в каждой отдельно взятой точке напряжённое состояние, обусловленное приложенным давлением в области контакта.



$l$  – принятая величина приложенного давления;  $\lambda_{\max}$  – «количество разрушения»;  $p_{\text{ном}}$  – номинальное давление разрушения

**Рисунок 2.8 – Модель номинального давления**

Исходя из примера, приведённого на рисунке 2.8, видно, что наихудшее напряжённое состояние отмечается в точке с разрушением 8,8 % образца по площади исследуемого контакта.

Недостаток модели заключается в отсутствии объяснений по отношению к результатам вычисления как давлений, так и площадей областей контакта, а преимуществом является хорошая согласованность рассчитанных значений номинальных давлений (разрушающих лёд) со значениями давлений, отмеченными в небольших областях контакта.

Модель объёмного континуального разрушения во льду представлена на рисунке 2.9. Здесь показано действие истинных местных напряжений  $\sigma$

на бесконечно малый элемент льда без трещин, и действие номинальных напряжений  $\tilde{\sigma}$  на малый элемент льда со множественными трещинами [181].

Напряжения во льду, имеющем малые трещины

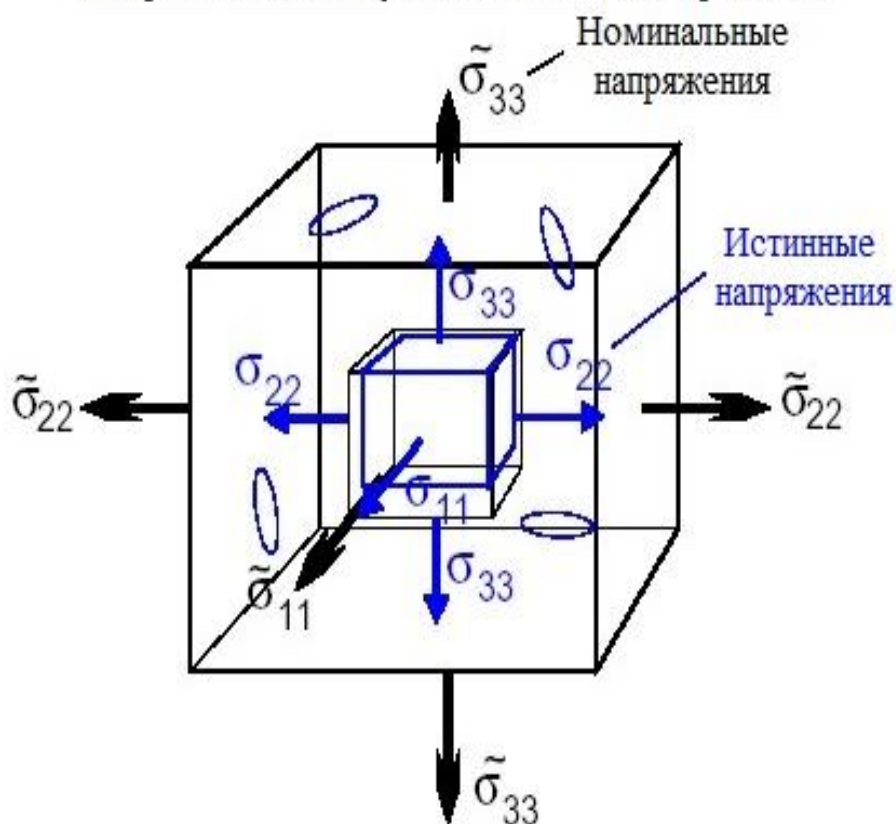


Рисунок 2.9 – Модель объёмного континуального разрушения твёрдого тела

Модель, основанную на данных экспериментов по внедрению в образец твёрдого тела, разработал Тимко (Timco) [208]. В ходе исследования перед индентором была обнаружена область монотонного нагружения льда, сохраняющего сплошность, с последующим хрупким интенсивным крошением.

Постепенное внедрение твёрдого тела в лёд приводило к линейному нарастанию в последнем напряжений, вызывающих кумулятивное (накопленное) разрушение льда (рисунок 2.10). Во время определённого критического этапа разрушения происходило почти мгновенное крошение образца (данные события одновременно вели к стремительному уменьшению контактной силы и фактической потери несущей способности). Далее, с вытеснением измельчённого льда начинало увеличиваться давление, и цикл повторялся снова.

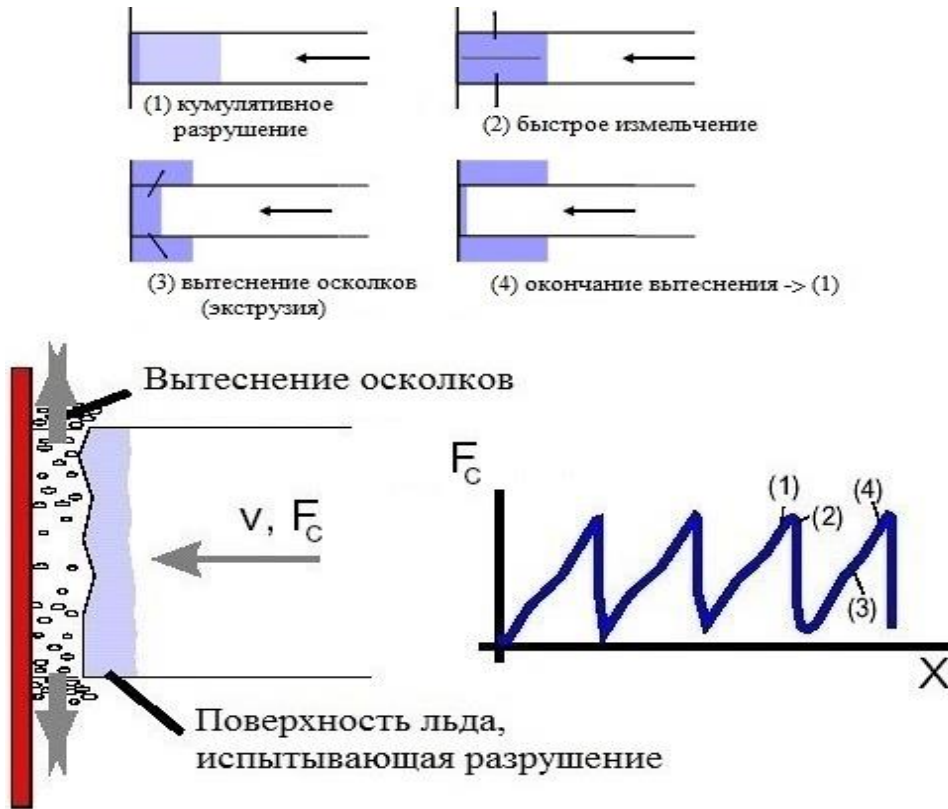


Рисунок 2.10 – Модель разрушения и крошения льда

Модель смешанного (гибридного) измельчения льда [190] (рисунок 2.11), предложена в 1993 году Карной (Kärnä). В модели объединён принцип континуального разрушения с описанием процесса образования больших сдвиговых трещин.

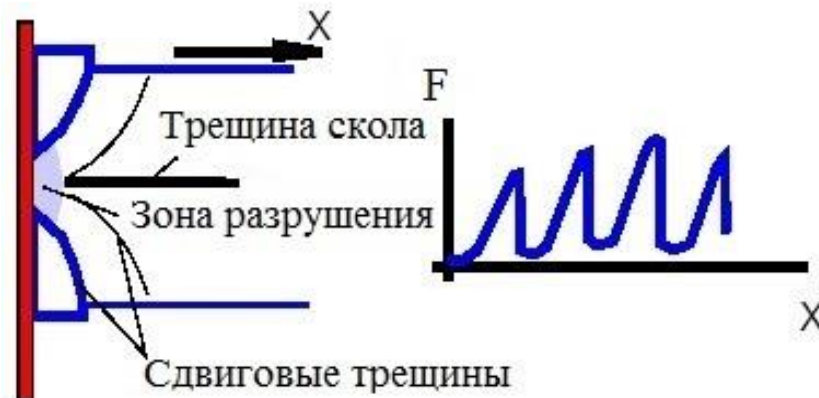


Рисунок 2.11 – Модель Карны

Исходя из рассмотренных континуальных моделей можно отметить, что по-прежнему существует проблема сложности выбора модели сплошной среды, то есть весьма трудно подобрать модель, которая вне зависимости от широкого

диапазона скоростей и температур, а также событий, происходящих в области контакта, будет вести себя подобно как твёрдому телу (прежде всего, хрупкому и пластичному), так и жидкости.

### 2.3.2 Дискретные модели

Экспериментальным путём установлено, что разрушения, происходящие при малых скоростях взаимодействия различных тел со льдом, не всегда могут быть связаны с измельчением образца изо льда до мелкодисперсной среды. Поэтому для части моделей характерно отступление от концепции континуального представления разрушения, с рассмотрением процесса разрушения по принципу «как есть» [158].

Показанная на рисунке 2.12 модель, разработана Матлоком (Matlock) совместно с другими авторами [197, 198] в период с 1969 по 1971 год на основе данных, полученных в результате наблюдений за разрушением льда об опоры нефтедобывающих платформ [202]. Поведение льда отмечалось, как последовательность возникновения хрупких разрушений, в виде серии разрушений эквивалентных консольных балок.

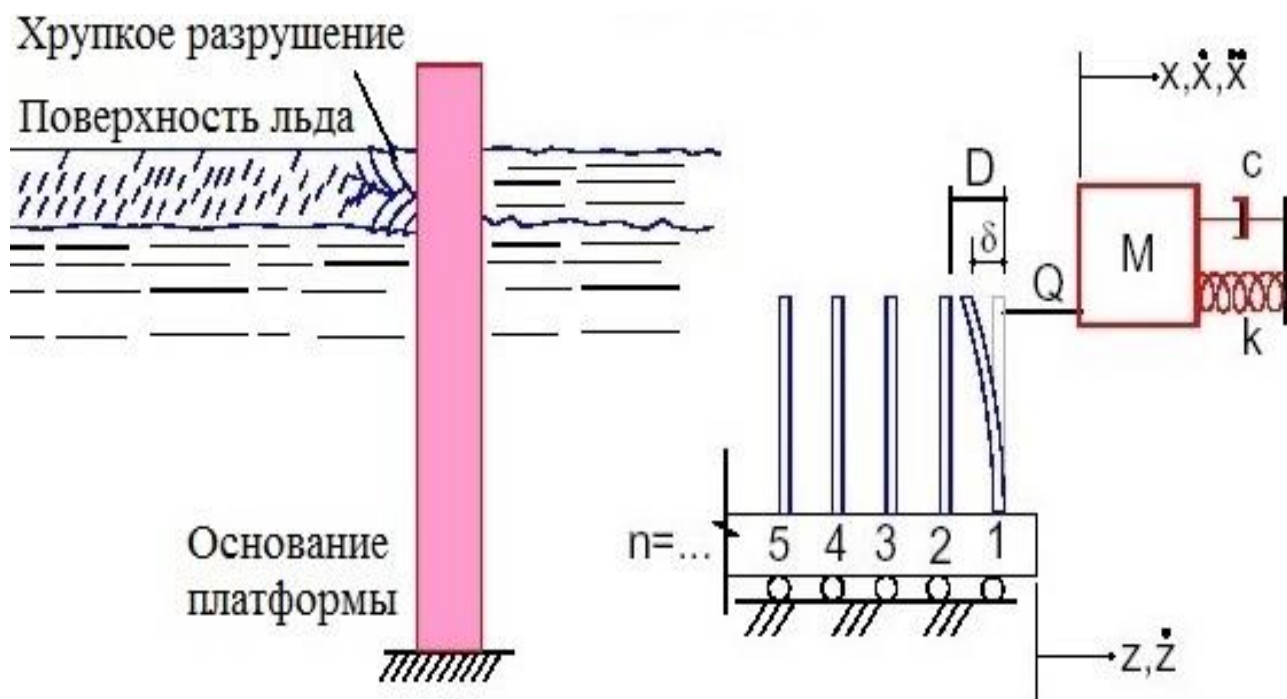


Рисунок 2.12 – Дискретная модель ледовых нагрузок Матлока

Модель разрушения кромки льда о борт судна (рисунок 2.13) предложена Варстом и Риском в 1977 году [203]. Разрушение рассматривалось как комбинация измельчения (смятия), сдвига и изгиба. Модель использовали для качественной иллюстрации разрушения, чтобы объяснить почему ледовые нагрузки содержали несколько локальных пиков, и по какой причине они наблюдались более продолжительное время, чем у модели Хейсина (рисунок 2.6).

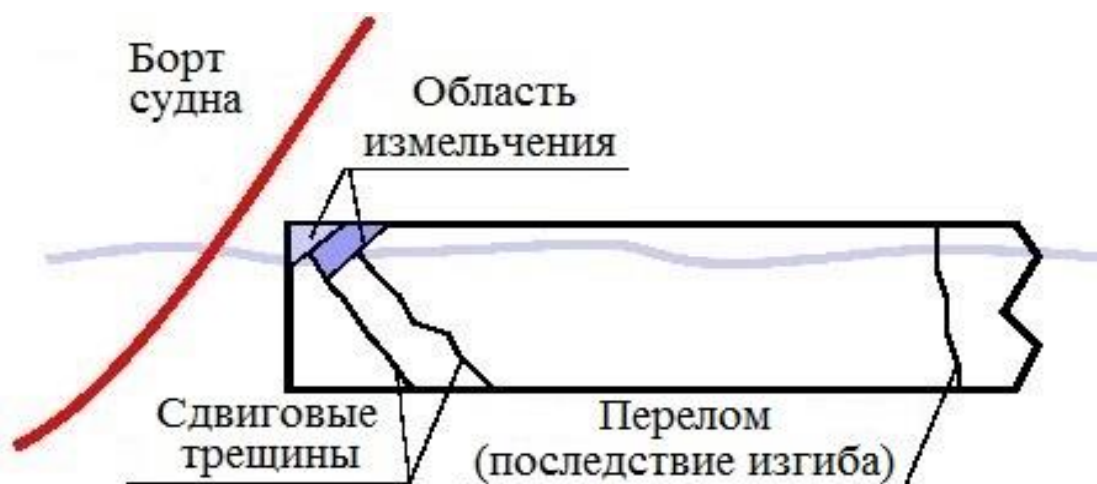


Рисунок 2.13 – Модель процесса взаимодействия кромки ледяного покрова с бортом судна

В 1988 году Йонсуу и Риска (Joensuu and Riska) провели большое количество лабораторных экспериментов по смятию блоков (выполненных из льда), используя для этого стальной лист, с смонтированными в него датчиками давления, а также стеклянную плиту, с фиксированием событий взаимодействия на видеокамеру [189].

На рисунке 2.14 показано в том числе и графическое отображение процесса изменения силы в зависимости от времени в виде пилообразной кривой. Указанная форма была характерной для всех случаев изменения силы в зависимости от времени. Благодаря проведённому изучению видеозаписей непосредственного касания стеклянной плиты и льда, удалось установить то, что касание осуществлялось по тонкой и неустойчивой линии, находившейся у границы контакта [189].

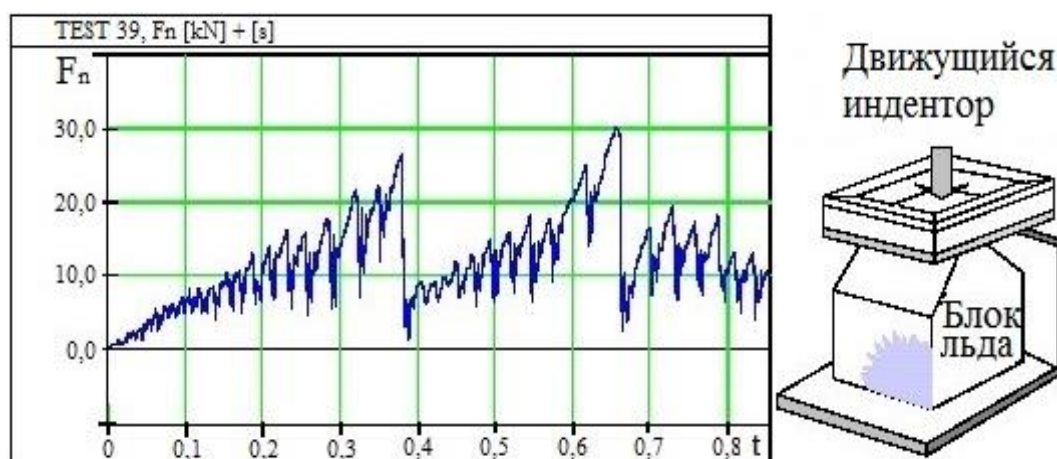


Рисунок 2.14 – Экспериментальные исследования по смятию блока из льда

Дискретная модель разрушения льда [182, 183], показанная на рисунке 2.15, была разработана в 1990 году Дейли (Daley) в результате поисков качественной интерпретации результатов экспериментальных исследований, полученных Йонсуу и Риском.

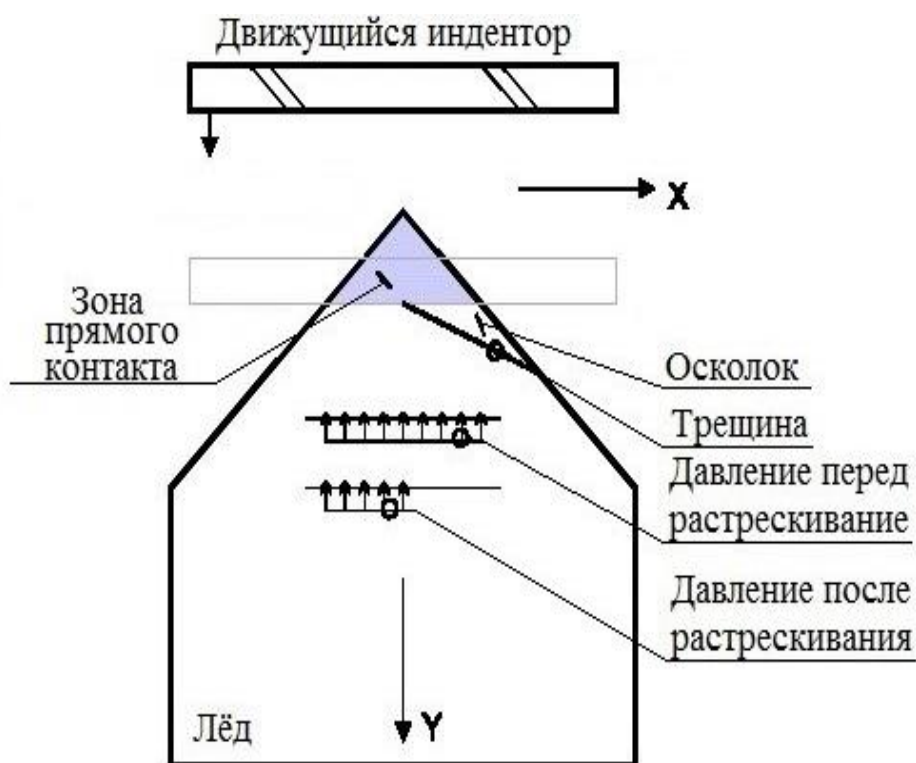


Рисунок 2.15 – Дискретная модель разрушения льда, разработанная Дейли

Применительно к модели Дейли, предполагается то, что при резких падениях силы, процесс изменения силы в зависимости от времени подвергается влиянию внезапных событий разрушения образца.

Дейли провёл тщательное изучение видеозаписей экспериментальных исследований. На основании полученных им сведений, была выдвинута гипотеза, состоявшая в том, что возникновение внезапных событий разрушения образца обусловлено его растрескиванием из-за горизонтального сдвига [182, 183].

Учитывая модель Дейли, Куяла (Kujala) в 1993 году предложил модель беспорядочного (хаотичного) растрескивания льда (рисунок 2.16) [193, 194] для того, чтобы исследовать ледовые нагрузки на один из бортов судна, статически сжатого льдами. В модели считалось возможным разрушение льда посредством изгиба, обусловленным вертикальным неуравновешенным положением обломков и эксцентриситетом нагрузки, действовавшей в горизонтальной плоскости.

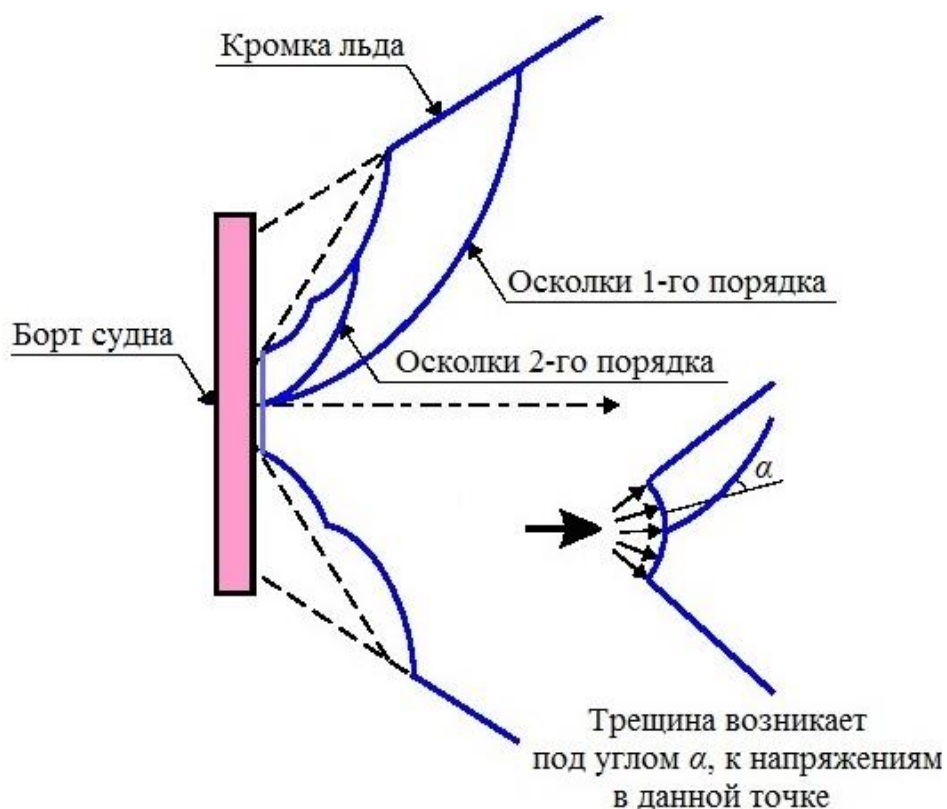


Рисунок 2.16 – Модель Куялы

Куяла стал вводить в рассмотрение модели процесса разрушения криволинейные сдвиговые трещины, допуская, что направление у главных напряжений должно быть по радиусу, а распространение трещины должно происходить под постоянным углом (рисунок 2.16).

К сожалению, значительную часть континуальных и дискретных моделей ледовых нагрузок не имеет смысла или же практически невозможно применять для прогнозирования разрушения участков зимней скользкости по причине того, что в этих моделях объектом разрушения приняты цилиндрические, кубические, трапецеидальные, пирамидальные образцы, а также образцы сложных конфигураций, ледяной покров водоёмов, балки и т.д.

### **2.3.3 Модели, в которых лед представлен упругопластическим материалом или средой**

В целом, упругопластическими материалами являются такие тела, для которых при малых нагрузках характерно проявление упругих свойств, однако с увеличением нагрузки они подвергаются пластической деформации [77].

Смысл модели из [107, 108] заключается в следующем: материал (лёд), достигнув предела упругости, переходит из упругой стадии в пластическую, но после того, как в ячейке происходит достижение предельной пластической деформации, он разрушается. Модель предназначена для того, чтобы определить предельную несущую способность ледяной плиты.

В.А. Лобанов проанализировал несколько моделей материалов с целью прогнозирования поведения льда [109]. На основании полученных результатов исследования, им была выявлена наиболее подходящая модель для льда – модель упругопластического материала с изотропным упрочнением и критерием текучести Мизеса.

Ю.Н. Орлов и М.Ю. Орлов [125] предложили модель, в которой лёд был представлен упруго-пластической, пористой средой, при этом учитывались свойства прочности, ударно-волновые явления, а также совместное образование отрывных и сдвиговых ледовых разрушений. Модель была разработана для прогнозирования разрушения взрывчатим веществом ледяного покрова водоёмов.



### 2.3.4 Модели, в которых лед представлен вязкопластическим материалом или средой

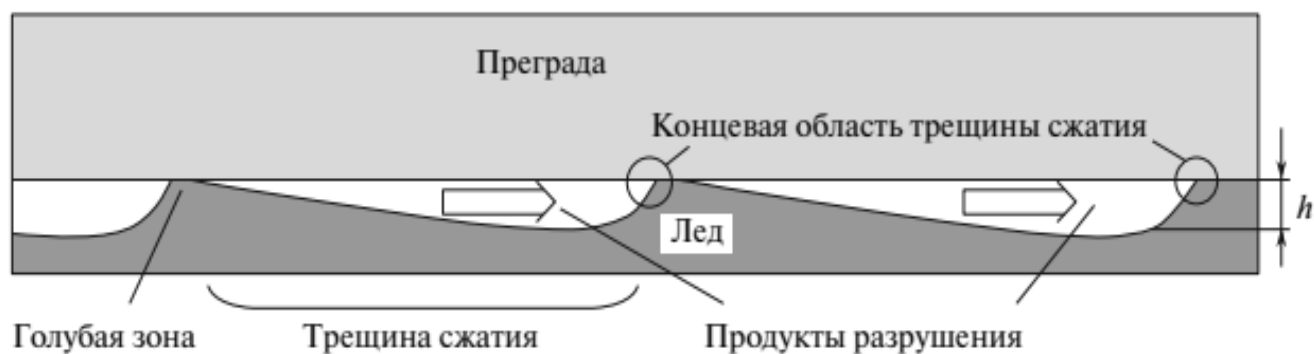
В общем смысле, вязкопластические среды (материалы) – тела, которые в различной степени обладают вязкими и пластическими свойствами [52].

Применительно к описанию и расчёту разрушения льда, ниже перечислены модели, отличительная особенность которых отражена в названии данного подраздела.

В 2002 году Колари (Kolari), Коухия (Kouhia) и Карна [191] осуществляли моделирование взаимодействия «лёд-структура». Состояние разрушающего усилия и размягчение льда после разрушения здесь описывалось с помощью вязкопластической модели материала Друкера-Прагера (Drucker-Prager). Однако модель Друкера-Прагера не ограничивала рост первого инварианта напряжений при сжатии (в условиях жёсткого ограничения эта модель могла привести к ошибочным результатам). Поэтому Колари, Коухия и Карна посчитали необходимым разработать материальную модель процесса разрушения льда.

Те же исследователи в 2004 году [192] представили лёд вязкопластическим материалом Пэжины (Perzyna), с условием текучести Надро (Nadreau). К сожалению, применить корректно данную модель можно только, если известна зависимость предела текучести материала (поликристаллического льда) от скорости деформации, но в настоящее время эта проблема считается недостаточно изученной, особенно при больших скоростях деформации [109].

Модель, показанная на рисунке 2.17, разработана Р.В. Гольдштейном и Н.М. Осипенко [53], в связи с постоянной необходимостью обеспечения защиты водного транспорта и морских сооружений от крупных ледовых массивов. Помимо прочих допущений, в данной модели подвижные продукты разрушения считались вязкопластической средой в заданном месте, для которой был определён расход [52]. Работа вытеснения была оценена, как работа сжатия вязкопластической среды (подвижных продуктов разрушения) между параллельными плоскостями [53].



**Рисунок 2.17 – Плоская модель процесса разрушения (вариант сечения области контакта)**

Основным недостатком перечисленных в подразделах 2.3.3 и 2.3.4 моделей является то, что при их помощи можно решить небольшой круг задач, поэтому данные модели не являются универсальными.

### 2.3.5 Реологические модели

Применительно ко льду используют и реологические модели, в которых явления представлены в виде уравнений состояния через напряжения и деформации, а также через производные напряжений и деформаций по времени [81].

Зачастую деформации и последующее за ними разрушение льда невозможно описать простейшей реологической моделью с небольшим количеством упругопластических констант [81].

Как правило, для описания поведения льда под нагрузкой, применяют модели, в которых учитывается характер деформирования. Иногда применяют и более сложные реологические модели [207].

К реологическим моделям относятся перечисленные ниже модели.

Например, в 1983 году Лэйни (Laine) и Тинави (Tinawi) предложили модель для оценки уменьшения модуля сдвига вдоль структурных элементов [195]. За счёт этого эффекта удалось получить корректное описание поведения ледяных пластин при долговременном воздействии нагружения.

Фиш (Fish) предложил модель ползучести льда при комбинации нагрузок [185-187], в которой содержались следующие принципиальные элементы: основное уравнение, уравнение потока и критерий разрушения [81].

Следует отметить, что правильный выбор корректной (относительно рассматриваемой ситуации) реологической модели всегда является определяющим, но не простым при решении проблем разрушения [172], так как лёд отличается реологически разнообразным поведением [109].

### **2.3.6 Модели разрушения участков зимней скользкости**

К сожалению, проблеме *моделирования* событий процесса устранения зимней скользкости на сегодняшний день уделено мало внимания, но определённые результаты в этом направлении всё же были получены российскими исследователями.

Например, к таким моделям можно отнести математическую модель резания льда дисковым инструментом В.А. Ганжи [48], модель взаимодействия слоя гололёда с асфальторезиновым дорожным покрытием В.И. Моисеева [112], математическую модель взаимодействия щёточного рабочего органа со льдом и снежным накатом А.Р. Пуртова [145].

Однако перечисленные в настоящем подразделе модели не предназначены для прогнозирования разрушения участков зимней скользкости воздействием ударного типа.

### **2.4 Построение модели разрушения льда на дорожном покрытии воздействием ударного типа и имитационной модели напряженно-деформированного состояния льда**

Лёд может воспринимать различные виды нагрузжений [39, 40, 137]. Таким образом, напряжённно-деформированное состояние льда и другие его

характеристики возможно определить и оценить, пользуясь обычными законами сопротивления материалов [152, 153].

В свою очередь, построение модели разрушения льда ударным воздействием (усилием) на дорожном покрытии необходимо для прогнозирования условий эффективной борьбы с прочными и неоднородными участками зимней скользкости, посредством установления значений данного воздействия при каждом изменении параметров объекта разрушения, а модель напряжённо-деформированного состояния предназначена для оценки событий этого состояния, происходящих при использовании воздействия ударного типа.

Ниже приведены теоретические исследования по моделированию разрушения льда воздействием ударного типа на дорожном покрытии [152, 153].

Предлагаемая нами физическая модель разрушения льда (рисунок 2.18) представляет собой пластину, опирающуюся на упругие связи чередующейся жёсткости, расположенные на дорожном покрытии. Основным элементом модели принят обычный кристалл льда  $Ih$ . Кристаллы модели ориентированы вертикально и «спаяны» между собой, но характеристики спаек отличаются от характеристик кристаллов. Направим ударное усилие разрушения  $Q$  на пластину. Тогда со стороны упругого основания на кристаллы и спайки будут действовать реакции связей переменной жёсткости  $k_1$  и  $k_2$ , которые изменяются в зависимости от точки приложения внешнего усилия. Величины ширины кристаллов льда  $b_1$  и спаек  $b_2$  приняты равными в диапазоне от 4,5 до 7,4 Å ( $1\text{Å} = 10^{-8}\text{ см}$ ) [110, 156].

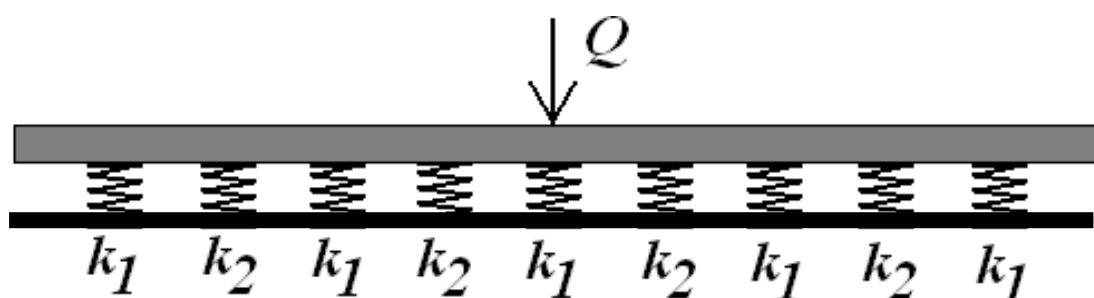


Рисунок 2.18 – Предлагаемая модель разрушения льда ударным усилием

Модули Юнга и коэффициенты Пуассона равны для кристалла льда –  $E_1$  и  $\mu_1$ , а для спайки –  $E_2$  и  $\mu_2$  (рисунок 2.19).

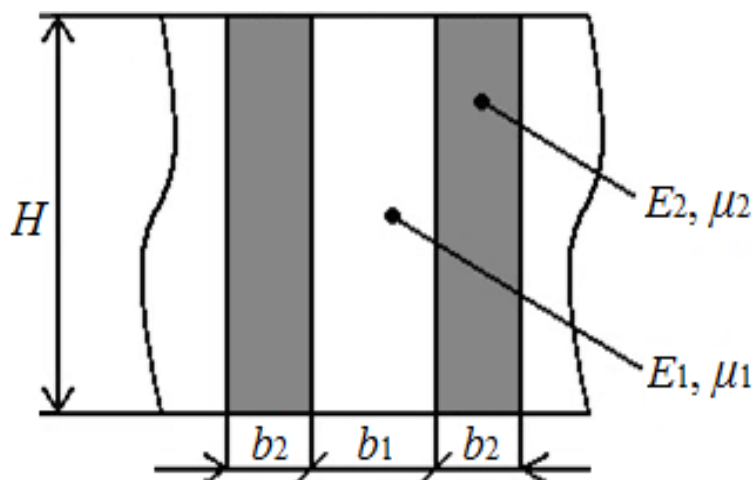


Рисунок 2.19 – Схема фрагмента слоя модели

Реакция со стороны основания – усилие, определяемое, как произведение функции переменной жёсткости  $k(x)$  на перемещение  $w$  всех кристаллов льда и спаек. Полагаем, что все кристаллы льда и спаек воспринимают независимую друг от друга нагрузку, представляя, таким образом, систему независимых упругих стержней, работающих на сжатие.

Тогда жёсткость ( $c$ ) кристалла льда или спайки равна:

$$c = \frac{EA}{H}, \quad (2.1)$$

где  $E$  – модуль Юнга стержня ( $E = 9,29 \cdot 10^9$  Па [178]);  $A$  – площадь поперечного сечения кристалла льда или спайки,  $m^2$ ;  $H$  – длина стержня (толщина слоя), м.

Определим ориентировочную жёсткость элемента модели:

$$c = \frac{9,29 \cdot 10^9 \cdot 4,5 \cdot 10^{-10} \cdot 4,5 \cdot 10^{-10}}{7,4 \cdot 10^{-10}} = 25,42 \cdot 10^{-1} = 2,542 \text{ Н/м.}$$

Функцию жёсткости представим в виде непрерывной периодической функции, приняв то, что области кристаллов и спаек чередуются с заданными интервалами. Эту функцию можно представить в виде:

$$k(x) = \frac{(C \times \text{sign} \cdot \cos(Ax) + B + D)}{H}, \quad (2.2)$$

где  $A$  – период функции ( $A = 3$ , исходя из реакции опор);  $B$  – смещение значений функции косинуса, для получения нужных отрезков по оси  $x$  (первое пересечение должно быть при  $h_1/2$ );  $C$  – половина разницы между значениями модулей Юнга ( $C = E_1 - E_2/2$ );  $D$  – среднее арифметическое модулей Юнга ( $D = E_1 + E_2/2$ ).

Представим функцию (2.2), например, при  $h_1 = 1$ ,  $h_2 = 2$ ,  $E_1 = 10$ ,  $E_2 = 20$ ,  $H = 1$  (рисунок 2.20).

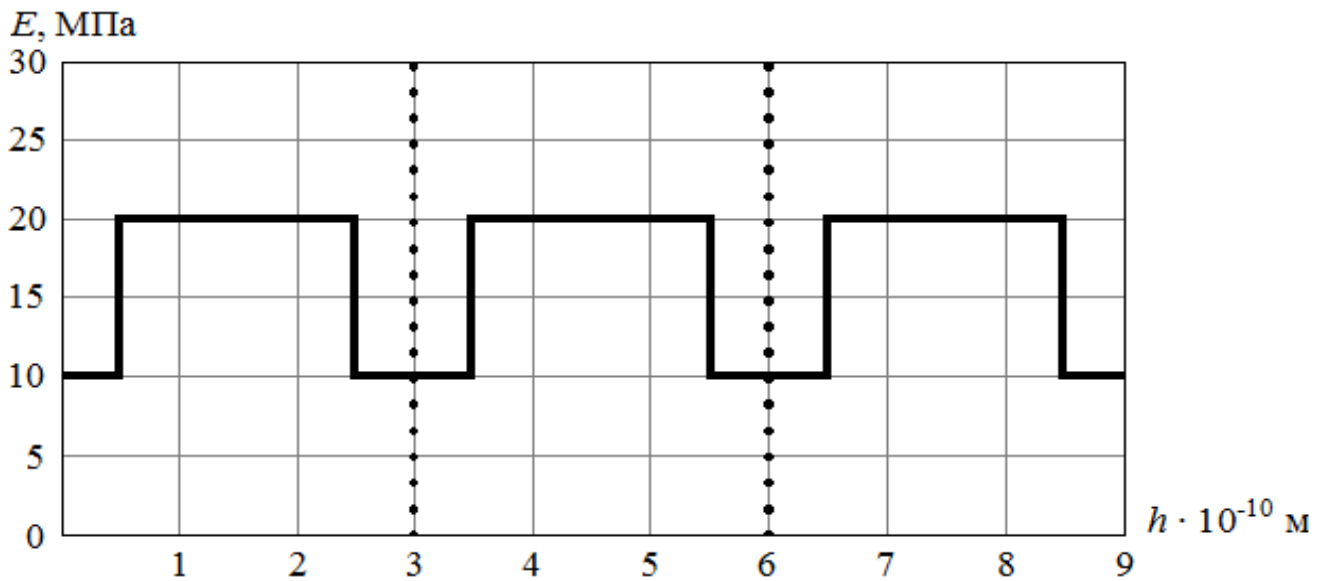


Рисунок 2.20 – Функция изгибной жёсткости

Разобьём пластину на балки единичной ширины (горизонтальную составляющую силы примем равной нулю), тогда для каждой балки уравнение изгиба будет иметь вид:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[ EI \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \right] + k(x)w = q(x), \quad (2.3)$$

где  $w$  – прогиб единичной балки, м;  $x$  – изменение координаты жёсткости;  $E$  – модуль Юнга балки, Па;  $I$  – момент инерции площади поперечного сечения балки,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $q$  – вертикальная нагрузка на единицу длины балки, Н/м.

Момент инерции площади поперечного сечения балки равен:

$$I = \frac{bH_1^3}{12}, \quad (2.4)$$

где  $b$  – ширина балки, м;  $H_1$  – высота (толщина) балки, м.

Классическое решение задачи [94] в данном случае неприемлемо, так как реакция упругого основания варьируется в зависимости от изменения координаты  $x$ .

Переходя к задаче Коши, принимаем перемещения в каждой точке единичной балки равными:

$$\frac{dw}{dx} = w_1, \quad (2.5)$$

$$\frac{dw_1}{dx} = w_2, \quad (2.6)$$

$$EI \frac{dw_2}{dx} = w_3, \quad (2.7)$$

а уравнение (2.3) преобразуем к виду:

$$\frac{dw_3}{dx} = q(x) - k(x)bw. \quad (2.8)$$

Далее принимаем факторы, оказывающие влияние на прочность льда при воздействии нагрузок ударного типа. Эти факторы и введённые для них обозначения приведены в таблице 2.5.

**Таблица 2.5 – Факторы, влияющие на прочность модели**

Фактор	Обозначение	
	Реальное	Условное
Внешнее воздействие	$Q$	$X_1$
Толщина кристалла льда	$h_1$	$X_2$
Толщина спайки	$h_2$	$X_3$
Модуль Юнга кристалла льда	$c_1$	$X_4$
Модуль Юнга спайки	$c_2$	$X_5$
Высота слоя льда	$H$	$X_6$

Предлагаемая имитационная модель является шестифакторной. Исследуемые факторы изменяются в пределах, указанных в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Пределы изменения исследуемых факторов

Фактор	Значение	
	Минимальное	Максимальное
Внешнее воздействие, Н	10000	20000
Толщина кристалла льда, мм	0,4	0,6
Толщина спайки, мм	0,3	0,8
Модуль Юнга кристалла льда, Па	8500	9500
Модуль Юнга спайки, Па	5000	15000
Высота слоя льда, мм	10	30

Выбор факторов и установление границ изменения их значений выполнены на основе анализа современных научных сведений о физико-механических характеристиках льда  $lh$  и геометрических параметров самой модели.

Для получения полного решения уравнения (2.8) и построения имитационной модели НДС льда (подвергнутого ударному воздействию на дорожном покрытии), будем считать, что распределённая нагрузка, в силу малости кристалла, может считаться сосредоточенной и будет приложена в центре (совпадает с осью) одного из кристаллов льда. Совместим начало координат с местом приложения предполагаемой сосредоточенной нагрузки и будем рассматривать только половину пластины, так как решение в этом случае будет симметричным. Тогда граничные условия в начале координат будут таковы: угол поворота равен нулю (ввиду симметрии задачи), внутренняя сила равна приложенной сосредоточенной.

Граничные условия на дальнем участке, где возмущения от приложенной нагрузки отсутствуют, таковы: момент равен нулю и внутренняя сила также равна нулю.

Как известно из теории балок на Винклеровском основании, численное интегрирование системы дифференциальных уравнений расходится. Происходит это потому, что базисные векторы, при интегрировании, перестают быть линейно



независимыми – два слагаемых с отрицательными показателями степени стремятся к нулю, а с положительными, начинают значительно доминировать. Поэтому для получения качественного решения следует применить специальный метод ортогонализации С.К. Годунова [11]. Отрезок интегрирования разбивается на точки ортогонализации. Решение делится на две стадии: прямой прогон и обратный прогон.

На первой стадии, при достижении интегрирования каждой из таких точек, процесс интегрирования прерывается. Из полученных векторов решения строится ортонормированный базис, и далее решение продолжается, отталкиваясь от нового базиса. Матрицы преобразования в каждой точке ортогонализации запоминаются. На последнем участке выполняются условия, как для конечного отрезка интегрирования.

На второй стадии (обратный прогон) получается решение от конечного участка к первому, с учётом выполненных граничных условий на конце и сохранённых коэффициентов преобразования в точках ортогонализации. Таким образом, получается полное решение. Количество точек ортогонализации нужно выбирать исходя из сходимости задачи.

Графическая интерпретация полученного решения для имитационной модели приведена на рисунках 2.21-2.23.

Из графика (рисунок 2.21) видно, что величина деформации будет значительно увеличиваться с ростом толщины спайки, в результате снижения её жёсткости.

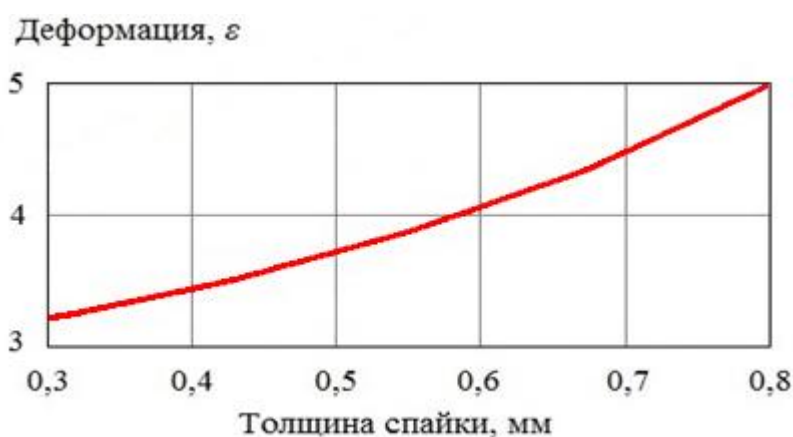


Рисунок 2.21 – График изменения деформации от толщины спайки

С ростом высоты (толщины) слоя льда, величина прогиба снижается (рисунок 2.22).

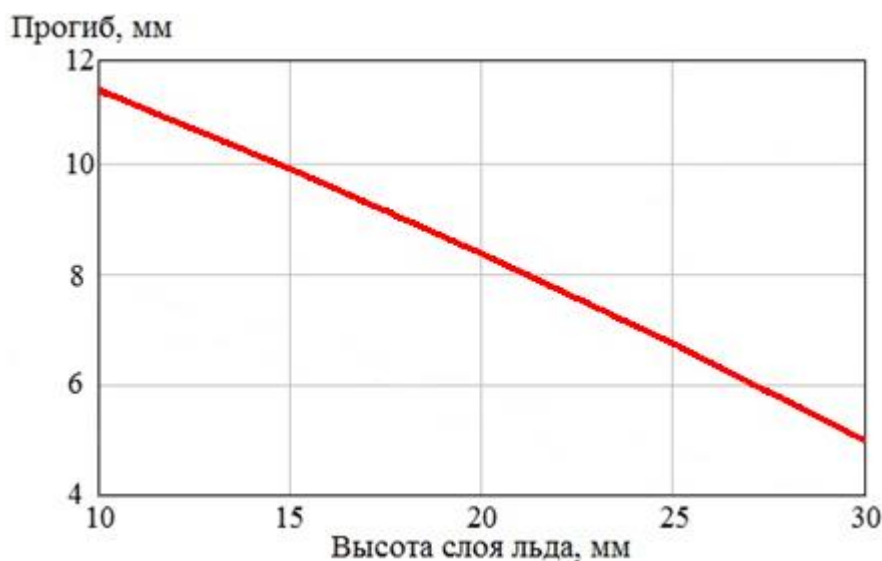


Рисунок 2.22 – График изменения прогиба от высоты слоя льда

При увеличении внешнего воздействия (усилия) наблюдается увеличение прогиба (рисунок 2.23).

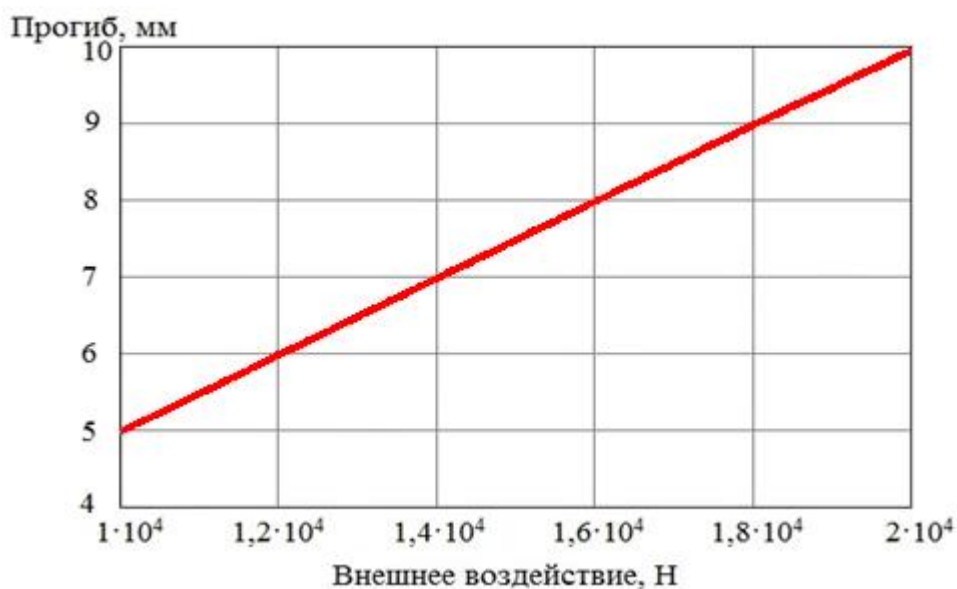


Рисунок 2.23 – График изменения прогиба от внешнего воздействия

Однако построения модели недостаточно для оценки заданных факторов и обоснования её достоверности, поэтому были проведены эксперименты по

определению влияющих на НДС льда значимых факторов и подтверждению правильности разработанной имитационной модели.

Сначала было определено необходимое количество опытов:

$$N = 2^P = 2^6 = 64, \quad (2.9)$$

где  $P$  – количество факторов.

Уравнение регрессионной зависимости прогиба образца в общем виде было составлено для осуществления количественной и качественной оценки исследуемых факторов:

$$w = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_6X_6 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + \dots + b_{56}X_5X_6, \quad (2.10)$$

где  $b_0, b_1$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Коэффициенты уравнения регрессии определены по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum y_j}{N}, \quad (2.11)$$

$$b_j = \frac{\sum x_{1i} \cdot y_j}{N}, \quad (2.12)$$

$$b_{im} = \frac{\sum x_{ji} \cdot x_{jm} \cdot y_j}{N}, \quad (2.13)$$

где  $i \neq m$ .

Исходя из многовариантности исследования (шестифакторный эксперимент), в программе моделирования процесса деформации льда [147] была произведена оценка факторов имитационной модели НДС льда (приложение Б). Учитывая основные положения теории планирования многофакторного эксперимента [3, 4, 150], в указанной программе были получены данные, перенесённые затем в стандартный табличный процессор Microsoft Excel для обработки, после которой уравнение регрессионной зависимости прогиба выровненного участка обледенения на дорожном покрытии приобрело вид:

$$w = 5,564 + 1,878X_1 - 1,084X_5 + 2,193X_6. \quad (2.14)$$

Уравнение (2.14) позволило установить, что значимыми факторами являются: внешнее воздействие, модуль Юнга спайки и высота слоя льда (обозначаемые, как  $X_1, X_5$  и  $X_6$ ). Факторы  $X_2, X_3$  и  $X_4$  не оказывают существенного влияния на

напряжённно-деформированное состояние льда, испытывающего воздействие нагрузок ударного типа на дорожном покрытии.

Из графической интерпретации выполненной проверки достоверности модели НДС льда (рисунки 2.24-2.26) видно, что данная модель имеет высокую степень корреляции с регрессионной зависимостью.

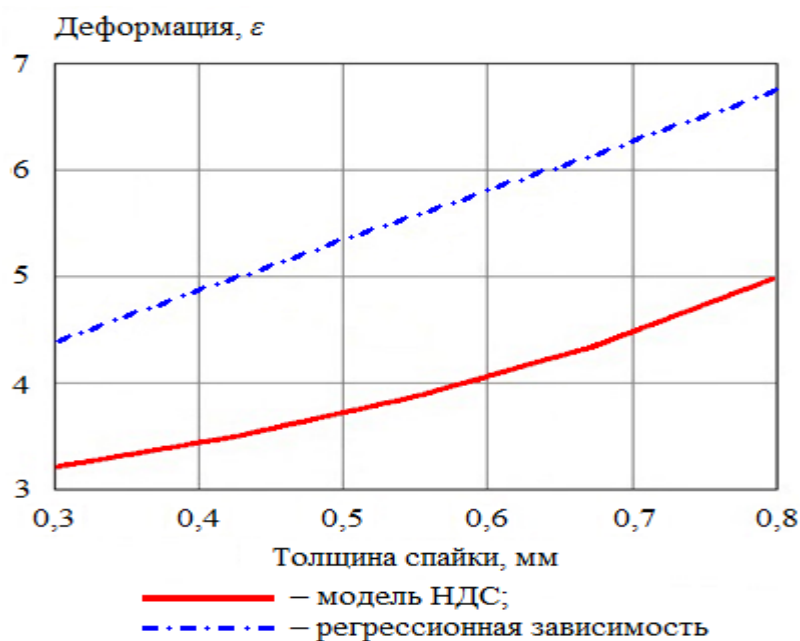


Рисунок 2.24 – Результирующие графики изменения деформации от толщины спайки

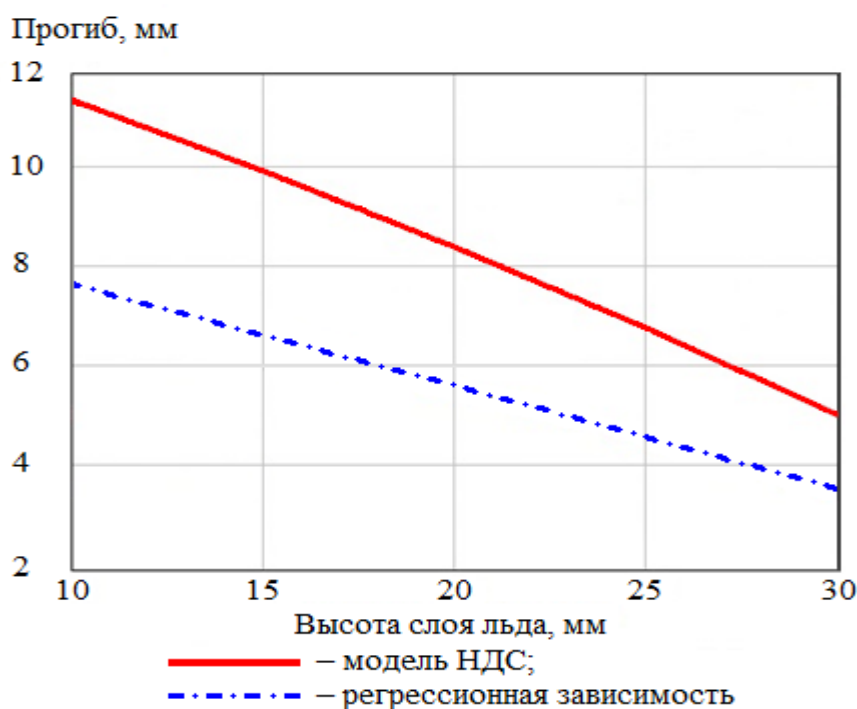
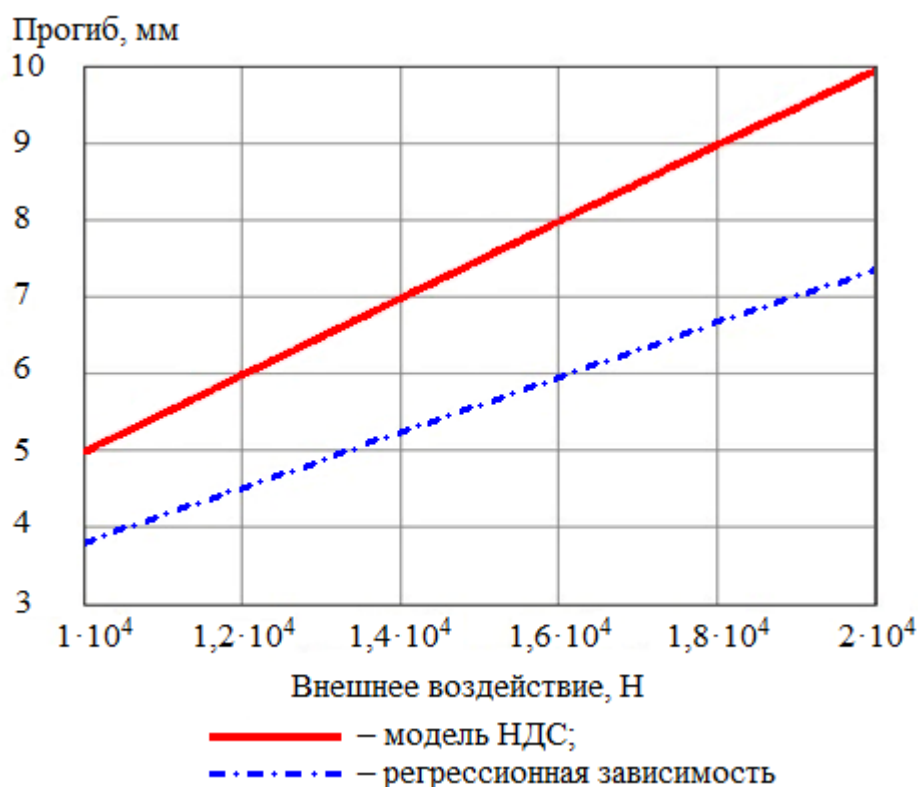


Рисунок 2.25 – Результирующие графики изменения прогиба от высоты слоя льда



**Рисунок 2.26 – Результирующие графики изменения прогиба от внешнего воздействия**

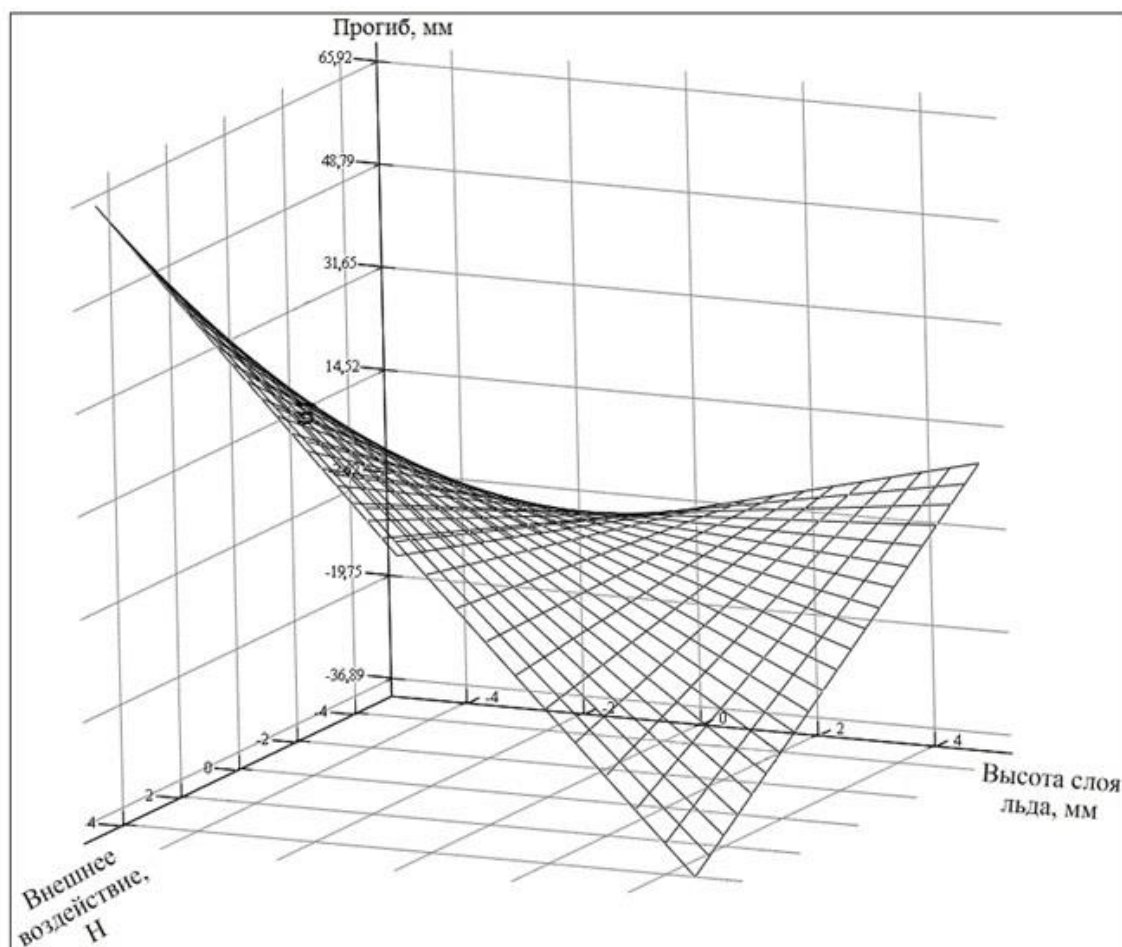
Таким образом, предложенная имитационная модель является достоверной и может быть использована в дорожной отрасли для прогнозирования событий разрушения и процессов, возникающих при воздействии на лёд (участки зимней скользкости) нагрузок ударного типа. Кроме того, модель можно использовать и при разработке устройств и установок, разрушающих такие участки ударными нагрузками.

## **2.5 Исследование регрессионной зависимости прогиба в трехмерном пространстве**

Данное исследование проведено из условия того, что один из значимых факторов принят равным нулю, как параметр второго порядка малости [152]. Тогда величина искомого прогиба будет иметь вид:

$$w = 5,564 + 1,878X_1 + 2,193X_6. \quad (2.15)$$

Очевидно, что изменение прогиба представляет собой плоскость, ограниченную координатными осями. Поэтому можно оценить, например, внешнее воздействие от высоты слоя льда (рисунок 2.27).



**Рисунок 2.27 – Поверхность совместного влияния внешнего воздействия и высоты слоя льда**

Для обеспечения разрушающего усилия необходимо, чтобы соблюдалось превышение действительной величины прогиба  $w$  над допускаемой  $[w]$ :

$$w \geq [w]. \quad (2.16)$$

Учитывая данное условие, определим внешнее воздействие:

$$X_1 = \frac{([w] - 5,564 - 2,193X_6)}{1,878} \geq 0. \quad (2.17)$$

Для выполнения формулы (2.17) нужно, чтобы допускаемая величина прогиба пластины выбиралась из условия:

$$[w] \leq 5,564 + 2,193X_6. \quad (2.18)$$

Следовательно, величина критической деформации, приводящей к разрушению пластины (выровненного участка обледенения), должна быть не менее 71,35 % от толщины данного образца (если  $X_6 = 30$  мм).

## 2.6 Выводы по второму разделу

1) Наличие льда и/или снега на многих видах покрытий и поверхностей считается крайне нежелательным. В частности, на покрытиях проезжих частей и пешеходных пространств образование зимней скользкости (при условии несвоевременной и/или некачественной очистки) приводит к снижению сцепных качеств, большому количеству дорожно-транспортных происшествий (ДТП), травматизму среди пешеходов и значительной финансовой нагрузке на бюджет государства, несмотря на жёсткие требования к срокам устранения зимней скользкости и к состоянию этих покрытий после завершения работ по очистке. Тем не менее, коммунальным и дорожным службам (в силу ряда причин) не всегда удаётся предотвратить последствия от её образования.

2) Сложный процесс разрушения льда вполне возможно описать (выразить) через эмпирическую или теоретическую модель, то есть таким образом можно представить и оценить события и последствия разрушения.

3) Основными видами моделей описания и расчёта процесса разрушения льда являются континуальные и дискретные модели ледовых нагрузок, реологические модели, а также модели, в которых лёд представлен упругопластическим и вязкопластическим материалом (средой). Однако подавляющее большинство моделей этих видов очень трудно или невозможно вообще адаптировать для прогнозирования разрушения участков зимней скользкости.

4) Направление моделирования разрушения участков зимней скользкости ударным воздействием считается в настоящее время недостаточно развитым, поэтому была разработана теоретическая модель в виде пластины из льда, расположенной на дорожном полотне и испытывающей воздействие *ударного* усилия. Кроме того, предложена имитационная модель НДС льда, с помощью

которой можно осуществить оценку событий данного состояния при воздействии разрушающей нагрузки ударного типа.

5) Для получения подтверждения результатов теоретического исследования по построению имитационной модели НДС льда потребовалось провести численный эксперимент, заключавшийся в составлении уравнения регрессионной зависимости прогиба пластины и определении степени корреляции модели с указанной регрессионной зависимостью посредством графического сопоставления. В результате эксперимента определены значимые факторы. Кроме того, оказалась достаточно высокой корреляция между графиками модели НДС и уравнения регрессионной зависимости прогиба.

6) Регрессионная зависимость была использована для исследования в трёхмерном пространстве, с целью определения величины деформации, необходимой для разрушения пластины, толщина которой при необходимости может быть изменена.



### **3 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

#### **3.1 Цели и задачи двухэтапных исследований по определению условий для повышения сцепных качеств покрытий в зимний период**

Рассмотрим разрушение льда с точки зрения борьбы с зимней скользкостью. Безусловно, полное удаление льда и снега с покрытий проезжих частей и пешеходных пространств, является наиболее приемлемым результатом. Однако, если отсутствует возможность полностью очистить покрытие, для улучшения сцепных качеств, на наш взгляд, необходимо, чтобы на поверхности оставшихся участков зимней скользкости были нанесены насечки ударными рабочими органами уборочной машины, так как при контакте ударников со льдом, кроме образования следа от их внедрения, происходит и выталкивание раздробленной массы (крошки) на поверхность. Очевидно, что наличие этой крошки на поверхности также способствует улучшению сцепления колёс автомобилей и обуви с покрытием.

Тем не менее, при устранении плотных слоёв зимней скользкости с минимальными энергозатратами, большое значение имеет правильно подобранная форма частей ударного оборудования, непосредственно контактирующих с этими слоями [98], но при неполной очистке покрытия, кроме формы указанных частей, очень важен и характер расположения насечек [99]. Поэтому для установления условий минимизации негативного воздействия зимней скользкости на качество передвижения автомобилей и пешеходов, нами были проведены двухэтапные исследования. Первый этап данных исследований – определение и оценка значений энергоёмкости разрушения льда при использовании ударников различных конфигураций, с целью выбора наиболее рациональной формы для непосредственно соприкасающихся с участком зимней скользкости частей рабочих органов ударного действия. В свою очередь, второй этап исследований – установление угла наклона насечек (относительно направления движения машин), при котором произойдёт повышение коэффициента сцепления шин с выровненной

поверхностью участка зимней скользкости до значений, достаточных для безопасной эксплуатации такого покрытия.

Для достижения поставленных целей потребовалось решить следующие задачи:

- определить условия и порядок проведения двухэтапных исследований;
- выбрать испытуемые образцы;
- разработать методику для первого этапа исследований;
- провести двухэтапные исследования;
- проверить и оценить результаты исследований;
- найти практическое применение полученным результатам.

Кроме того, потребовалось составить зависимости влияния температуры воздуха на изменение энергоёмкости разрушения льда ударниками установленных эффективных конфигураций.

### **3.2 Методика для определения и проверки значений энергоёмкости разрушения льда ударниками различных конфигураций**

При отсутствии высокоточного измерительного оборудования, определение величины показателя энергоёмкости  $E$  разрушения (ударником) слоя льда с ровной поверхностью, производится по следующей формуле [98, 154]:

$$E = \frac{A}{V}, \quad (3.1)$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на разрушение, Дж;  $V$  – объём зоны разрушения льда ударником, м<sup>3</sup>.

Параметр  $A$  необходимо вычислять по формуле:

$$A = mgh, \quad (3.2)$$

где  $m$  – масса сбрасываемого держателя с ударником, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – высота сбрасывания держателя с ударником, м.

Минимальное число опытов для всех выбранных конфигураций ударников равно двум ( $N = 2^1 = 2$ ), но конечное число опытов принято равным трём [3, 4].

Для получения воспроизводимых данных по каждой серии опытов, проводятся параллельные опыты ( $k = 3$ ).

Оценка дисперсии для каждой серии параллельных опытов определяется по формуле:

$$S_i^2 = \frac{1}{k-1} \sum (y_{ij} - \bar{y}_i)^2, \quad (3.3)$$

где  $\bar{y}_i$  – среднее арифметическое значение функции отклика.

С помощью формулы (3.4) можно определить данное значение функции отклика:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k y_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (3.4)$$

Проверка воспроизводимости опытов проводится по критерию Кохрена:

$$G_p = \frac{\max S_i^2}{\sum S_i^2} \leq G, \quad (3.5)$$

где  $\max S_i^2$  – максимальная из оценок дисперсий;  $\sum S_i^2$  – сумма оценок дисперсий каждого опыта;  $G_p$  и  $G$  – расчётное и табличное значение критерия Кохрена.

Оценка дисперсии воспроизводимости определяется по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum S_i^2}{N}. \quad (3.6)$$

Оценка дисперсии среднего значения рассчитывается по формуле:

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{S_y^2}{k}. \quad (3.7)$$

Приведённые в настоящем подразделе формулы [150] были использованы на следующих стадиях первого этапа исследований: непосредственное проведение опытов, обработка и проверка полученных результатов.

### 3.3 Влияние конфигураций ударников на энергоёмкость разрушения льда

Эксперимент по определению объёмов зон разрушения льда от ударников различных конфигураций, с целью установления вариантов образцов,

необходимых для устранения участков зимней скользкости с наименьшей энергоёмкостью, был проведён (в естественных условиях) на пешеходных дорожках вблизи озера Юшино городского округа Балашиха, Московской области, при температуре, характерной для появления гололёдных образований (от 0 до минус 15 °С) [154], с учётом температуры поверхности льда. Также учитывалась и возможность изменения физико-механических свойств льда из-за температурных колебаний воздуха, поэтому эксперименты проводились в фиксированное дневное время, при стабильной, за длительный промежуток времени, температуре.

Ровная поверхность площадки для проведения экспериментов не имела явно выраженных дефектов. Эта площадка была выбрана однократно и в дальнейшем её положение не менялось, то есть условия проведения экспериментов были идентичными.

Разрушение льда осуществлялось за счёт сбрасывания на него держателя со сменными ударниками. Для исключения (при падении) отклонения образцов от вертикали, сбрасывание производилось через цилиндрическую направляющую (трубу), установленную перпендикулярно разрушаемой поверхности. Высота сбрасывания ( $h = 1$  м) фиксировалась при помощи отметки на шнуре, который был прикреплен к держателю ударника. В качестве ударников были выбраны стальные профили, представленные на рисунке 3.1 и стальной шар.



*1 – крестообразный остроконечный; 2 – шестигранная призма;*

*3 – крестообразный тупоконечный; 4 – клиновидный*

**Рисунок 3.1 – Экспериментальные профили**

Сбрасывание всех экспериментальных образцов осуществлялось только со специально зафиксированной высоты, поэтому энергоёмкость процесса разрушения равна отношению  $0,7848/V$  (так как  $A = 0,08 \cdot 9,81 \cdot 1 = 0,7848$ ). Данное отношение практически обратно пропорционально объёму зоны разрушения льда.

Ниже приведён порядок проведения эксперимента.

1) Выбор места без явных дефектов на поверхности льда, в пределах экспериментальной площадки.

2) Размещение направляющей на заранее выбранный ровный участок поверхности льда (для проверки ровности поверхности был применён строительный уровень).

3) Фиксация в держателе сменного ударника выбранной геометрической конфигурации.

4) Введение держателя с ударником внутрь направляющей и их поднятие на требуемую высоту, обозначенную отметкой на шнуре.

5) Сбрасывание держателя с размещённым в нём ударником на лёд.

6) Снятие направляющей, с одновременным удерживанием держателя с ударником во льду.

7) Фиксирование отметки на ударнике, соответствующей верхней кромке льда, для последующего измерения заглубления его в лёд.

8) Извлечение держателя с ударником.

9) Измерение объёма зоны разрушения льда и занесение результата измерения в журнал наблюдений (приложение В).

10) Определение энергоёмкости процесса разрушения льда для выбранных образцов.

11) Определение эффективной формы ударника, исходя из сравнения полученных значений энергоёмкости всех экспериментальных профилей.

На основании проведённых расчётов установлено, что с доверительной вероятностью  $P = 0,95$ , при числе степеней свободы  $f = 3 - 1 = 2$ , числе опытов  $k = 3$  и табличном значении критерия Кохрена  $G_{(P=0,95;f=2;k=3)} = 0,871$  [150], все параллельные опыты воспроизводимы. Результаты воспроизводимости экспериментов для всех выбранных конфигураций ударников приведены в приложении В (таблицы В 3.2.1-В 3.2.5).

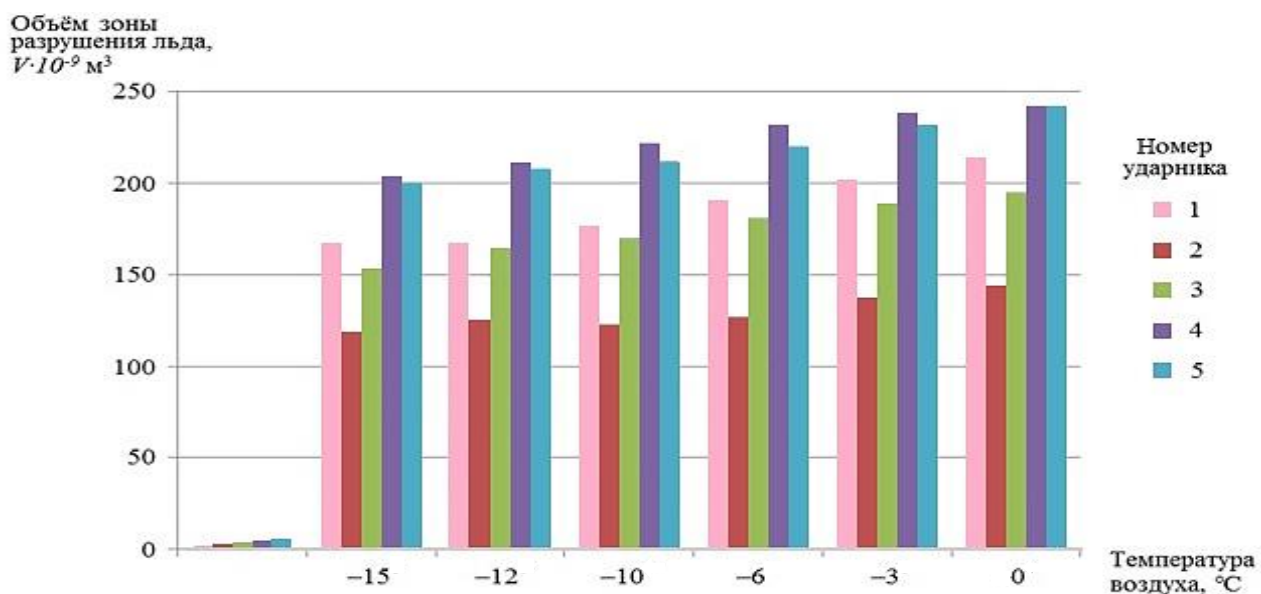
В таблице 3.1 представлены численные результаты первого этапа исследований [98].

**Таблица 3.1 – Величины объёмов зон разрушения льда ударниками в зависимости от температуры воздуха**

Температура воздуха, °С	Номер ударника				
	1	2	3	4	5
	Объём зоны разрушения льда, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$				
-15	168	118	153	205	200
-12	167	125	164	211	208
-10	177	123	170	222	212
-6	191	127	181	232	220
-3	203	138	189	238	232
0	215	144	195	242	242

Примечание: 1 – крестообразный остроконечный; 2 – шестигранная призма; 3 – крестообразный тупоконечный; 4 – клиновидный; 5 – шар.

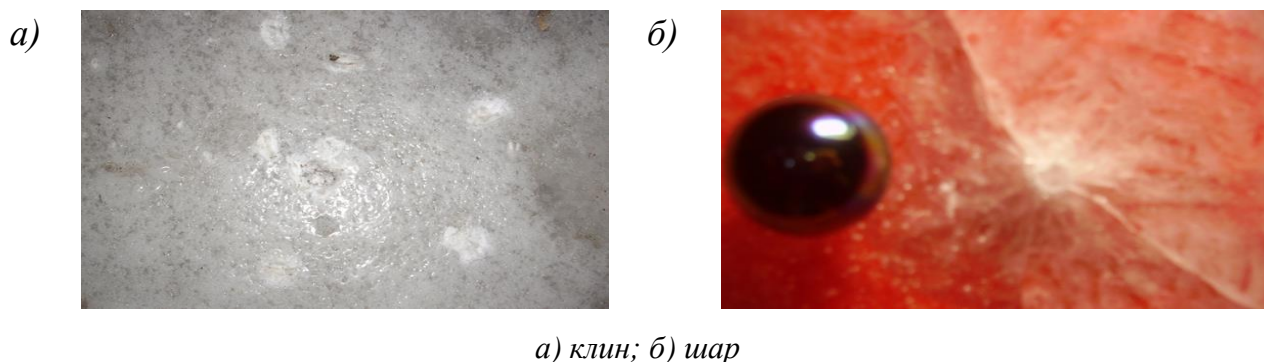
Для визуальной оценки эффективности применения всех выбранных конфигураций ударников выполнена обработка численных результатов первого этапа исследований (рисунок 3.2).



**Рисунок 3.2 – Диаграмма изменения объёмов зон разрушения льда**

Значения энергоёмкости процесса разрушения льда от ударника, выполненного в форме шестигранной призмы, во всех опытах практически одинаковы, но эти значения самые высокие, так как объёмы зон разрушения от данного образца меньше, чем от остальных выбранных ударников (рисунок 3.2). На втором месте находится величина энергоёмкости разрушения, полученная в результате сбрасывания крестообразного тупоконечного ударника, а на третьем –

от применения крестообразного остроконечного. Наименьшие значения энергоёмкости разрушения получены от клина и шара, поэтому наиболее рациональную конфигурацию для контактирующих со льдом и/или снегом частей рабочих органов ударного типа мы выбирали из этих двух вариантов [98]. Далее для сравнения показаны следы от их внедрения в лёд (рисунок 3.3), например, при температуре воздуха минус 3 °С.



**Рисунок 3.3 – Следы от внедрения клина и шара**

При разрушении льда шаром, кроме следа от внедрения, происходит образование трещин, приводящих к ослаблению прочности льда, а при разрушении клином – трещины не образуются (рисунок 3.3) [98]. Такой характер разрушения наблюдался во всех опытах выбранного диапазона температур. Однако объём зоны разрушения льда от внедрения клина больше, чем от внедрения шара. Следовательно, эти сравниваемые конфигурации можно считать отчасти равнозначными [98], то есть рассматриваемое (ударное) уборочное оборудование можно оснащать как шарообразными, так и клиновидными контактирующими частями.

### **3.4 Влияние температуры воздуха на изменение энергоёмкости разрушения льда ударниками рациональных конфигураций**

С повышением или понижением температуры воздуха, происходит изменение показателя энергоёмкости разрушения льда рабочим органом ударного действия. Эмпирические зависимости характера указанного изменения (при

использовании клина и шара) установлены с помощью применения метода наименьших квадратов [154]:

$$E = a_0 + a_1 t, \quad (3.8)$$

где  $a_0$  и  $a_1$  – искомые коэффициенты;  $t$  – температура воздуха, °С.

Коэффициенты эмпирических зависимостей определены согласно [59] по следующим формулам:

$$a_0 = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - \sum x \sum y}, \quad (3.9)$$

$$a_1 = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - \sum x \sum y}. \quad (3.10)$$

Результаты расчётов по установлению коэффициентов эмпирических зависимостей для ударников, выполненных в форме клина и шара, приведены в таблицах 3.2 и 3.3.

**Таблица 3.2 – Результаты расчётов по установлению коэффициентов эмпирической зависимости изменения энергоёмкости разрушения от температуры при использовании клина**

Температура воздуха, °С, (x)	Объём зоны разрушения, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$	Энергоёмкость, Дж/м <sup>3</sup> , (y)	$x^2$	xy	$(\sum x)^2$
-15	205	3828292,68	225	-57424390,2	50625
-12	211	3719431,28	144	-44633175,4	20736
-10	222	3535135,14	100	-35351351,4	10000
-6	232	3382758,62	36	-20296551,7	1296
-3	238	3297478,99	9	-9892436,97	81
0	242	3242975,21	0	0	0
Суммы					
-46	1350	21006071,92	514	167597905,65	264196
Коэффициенты, вычисленные исходя из полученных сумм					
b	c	d	$a_0$	$a_1$	
3087617305	-261112	-39308126	-11825	150,541	

**Таблица 3.3 – Результаты расчётов по установлению коэффициентов эмпирической зависимости изменения энергоёмкости разрушения от температуры при использовании шара**

Температура воздуха, °С, (x)	Объём зоны разрушения, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$	Энергоёмкость, Дж/м <sup>3</sup> , (y)	$x^2$	xy	$(\sum x)^2$
-15	200	3924000	225	-58860000	50625



Продолжение таблицы 3.3

-12	208	3773076,92	144	-45276923,1	20736
-10	212	3701886,79	100	-37018867,9	10000
-6	220	3567272,73	36	-21403636,4	1296
-3	232	3382758,62	9	-10148275,9	81
0	242	3242975,21	0	0	0
Суммы					
-46	1314	21591970,27	514	172707703,23	264196
Коэффициенты, вычисленные исходя из полученных сумм					
b	c	d	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	
3153718370	-261112	-43015587	-12078	164,74	

Подставляя из таблиц 3.2 и 3.3 в формулу (3.8) вычисленные значения искомым коэффициентов, получим эмпирические зависимости изменения энергоёмкости разрушения от температуры воздуха при использовании клина (3.11) и шара (3.12):

$$E = -11825 + 151t, \quad (3.11)$$

$$E = -12078 + 165t. \quad (3.12)$$

Знак «минус» в эмпирических зависимостях свидетельствует о разнонаправленности векторов энергии разрушения ударом и энергии разрушения льда, как такового [154].

Следует отметить, что эти зависимости необходимы для определения массы ударников применительно к текущим погодным условиям, с целью предотвращения повреждения очищаемых покрытий и эффективного применения самих ударников.

### **3.5 Влияние угла наклона насечек на сцепные качества выровненного участка зимней скользкости**

Насечки, специально нанесённые (рабочим органом ударного типа) на поверхность участков зимней скользкости, должны быть расположены таким образом, чтобы коэффициент сцепления колеса с указанной поверхностью был более 0,3 [57].

С физической точки зрения, коэффициент сцепления резины протектора шины автомобиля с дорожным покрытием можно представить, как коэффициент трения данной пары материалов, поскольку эти коэффициенты равны в момент начала движения [118]. Поэтому мы проанализировали влияние угла наклона насечек на изменение коэффициента трения движителя по скользкой наклонной поверхности (второй этап исследований) [99].

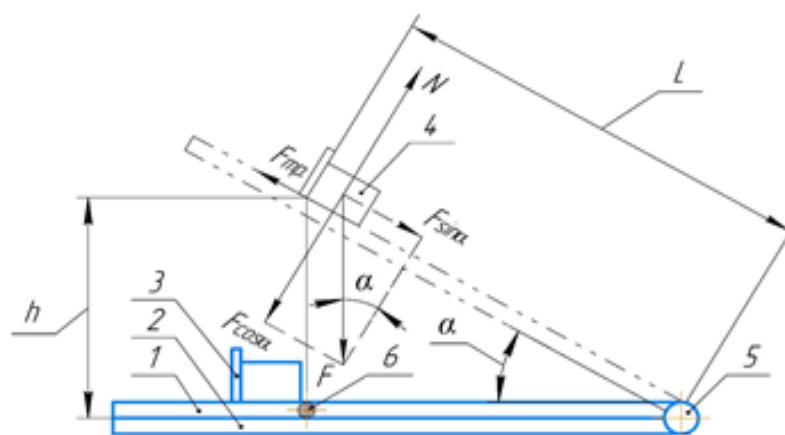
Данный эксперимент был выполнен на установке по определению коэффициента трения различных пар материалов (рисунок 3.4). Из материалов взаимодействующих поверхностей выбраны резина (для представления частей колеса автомобиля, контактирующих со льдом) и ламинированная древесно-стружечная плита с насечками для имитации поверхности участка зимней скользкости [99].



Рисунок 3.4 – Установка для определения коэффициента трения

Экспериментальная установка (рисунок 3.5) состоит из верхней плиты 1, соединённой с нижней плитой 2 шарниром 5. На верхней плите имеется выделенная зона контактирования с поверхностью образца и ограничитель 3, с прикреплённым к нему отвесом 6 для фиксации расстояния  $h$  до горизонтальной поверхности нижней плиты в момент начала движения резинового бруска 4. Длина  $L$  зоны контактирования составляет 385 мм. На поверхности зоны

контактирования нанесены насечки, ширина которых составляет 1 мм, а расстояние между ними – 5 мм. Угол наклона насечек выбран от 0 до 90° к направлению движения тела, с шагом в 15°.



1 – верхняя (наклонная) плита; 2 – нижняя (статичная) плита; 3 – ограничитель;  
4 – брусок; 5 – шарнир; 6 – отвес

**Рисунок 3.5 – Схема установки для определения коэффициента трения различных материалов**

В начале испытания брусок 4 располагается у ограничителя 3 на поверхности верхней плиты 1, находящейся в горизонтальном положении. Затем производится поворот этой плиты относительно шарнира 5 с постоянной угловой скоростью до начала движения бруска. В момент начала движения бруска, положение наклонной плиты фиксируется для измерения расстояния  $h$  и угла  $\alpha$  (рисунок 3.5).

Значения коэффициента трения  $\mu$  при различных углах наклона насечек определены путём подстановки полученных значений  $h$  и  $\alpha$  в следующую формулу:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} = \frac{h}{\sqrt{L^2 - h^2}}, \quad (3.13)$$

где  $\alpha$  – угол между наклонной и статичной плитой, при котором начинается движение образца (угол трогания).

Результаты вычислений коэффициента трения занесены в таблицу В 3.3.1 приложения В.

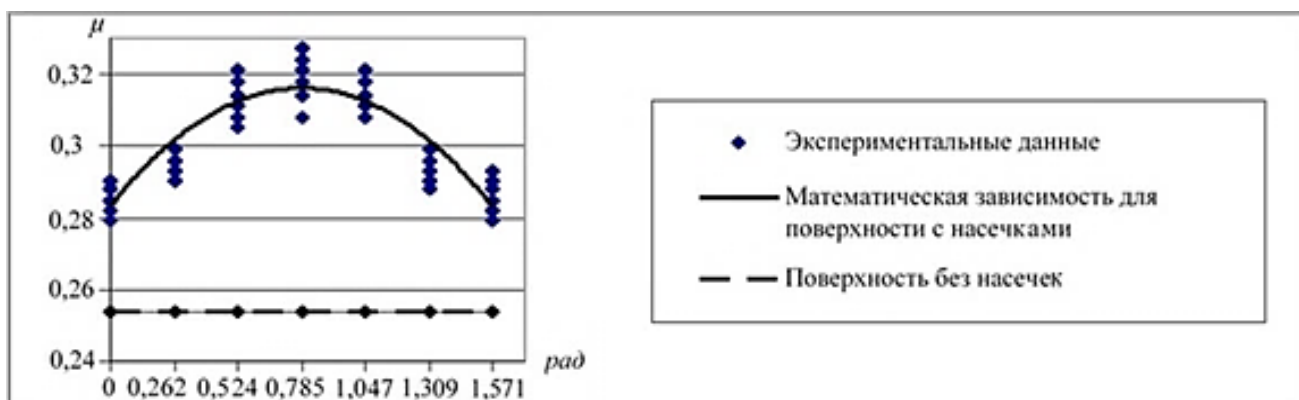
Проверка воспроизводимости опытов проведена по критерию Кохрена (3.5).  
Расчётное значение критерия Кохрена равно:

$$G_p = \frac{0,0000293553}{0,00012396} = 0,2368.$$

Табличное значение критерия Кохрена составляет 0,25639.

Все опыты (приложение В, таблица В 3.4.1), с доверительной вероятностью 0,95, числом степеней свободы  $f = 20 - 1 = 19$  и числе  $i$ -ых опытов  $N = 20$  – воспроизводимы, при расчётном значении критерия Кохрена 0,2368, которое меньше табличного значения, равного 0,2564.

Из графика (рисунок 3.6) видно, что максимальный коэффициент трения бруска по поверхности достигается при выполнении на ней насечек под углом наклона в  $45^\circ$  (0,785 рад). В данном случае коэффициент трения (коэффициент сцепления) на 20-25 % больше, чем коэффициент трения бруска по поверхности без насечек.



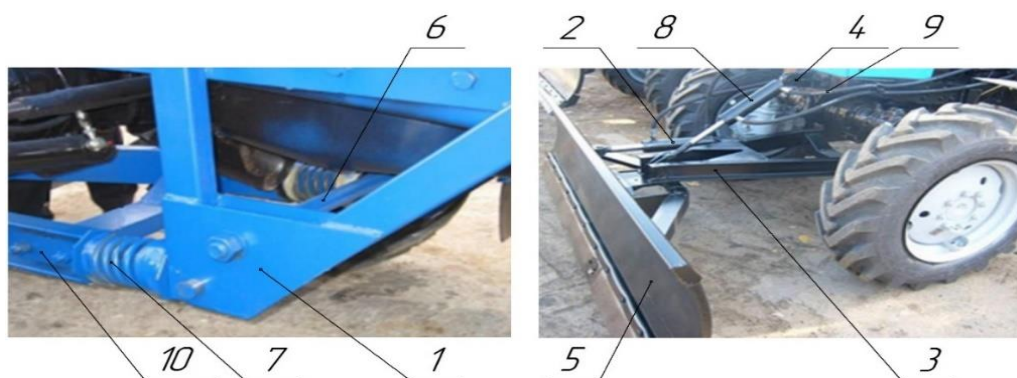
**Рисунок 3.6 – График влияния угла наклона насечек на изменение коэффициента трения**

Установленное нами условие, в части расположения насечек под углом в  $45^\circ$  на относительно ровной или специально выровненной поверхности участков зимней скользкости, может быть реализовано как на горизонтальных покрытиях, так и на покрытиях с уклоном, но для сохранения достигнутых сцепных качеств покрытий с насечками, необходим контроль за их состоянием со стороны дорожных и коммунальных служб [99]. После разрушения насечек, сотрудники этих служб должны принимать решение об их повторном нанесении.

### 3.6 Выбор уборочного оборудования

В качестве модернизируемого оборудования был выбран отвал коммунальный гидроповоротный УМДУ-80/82.01(-01) [131], так как на этой модификации имеется достаточно места для размещения предлагаемого нами устройства ударного действия. Хотя данное устройство также можно устанавливать и на схожие с УМДУ-80/82.01(-01) отвалы плужных и плужно-щёточных уборочных машин. Для устройства также подходят плоские отвалы и отвалы с малым радиусом кривизны.

Отвал коммунальный гидроповоротный УМДУ-80/82.01(-01) с конструкцией его крепления к базовой машине показаны на рисунке 3.7. Данное оборудование состоит из пары подрамников 1 (установленных на лонжеронах базовой машины и связанных между собой при помощи распорного вала 6), компенсирующих пружин 7 (служащих для смягчения ударных нагрузок между удлинителями 10 и подрамниками), рамы 3 и кронштейна 4, шарнирно связанных с гидроцилиндром подъёма-опускания 8, а также снежного отвала 5, соединённого с рамой и гидроцилиндром поворота 2. При этом гидроцилиндр подъёма-опускания и гидроцилиндр поворота соединены РВД 9 с гидросистемой базовой машины.



1 – подрамники; 2 – гидроцилиндр поворота; 3 – рама; 4 – кронштейн; 5 – снежный отвал; 6 – распорный вал; 7 – компенсирующие пружины; 8 – гидроцилиндр подъёма-опускания; 9 – РВД; 10 – удлинители

**Рисунок 3.7 – Отвал коммунальный УМДУ-80/82.01(-01)**

Следует отметить, что совместное использование базового и предлагаемого уборочного оборудования ударного типа безусловно приведёт к достижению как

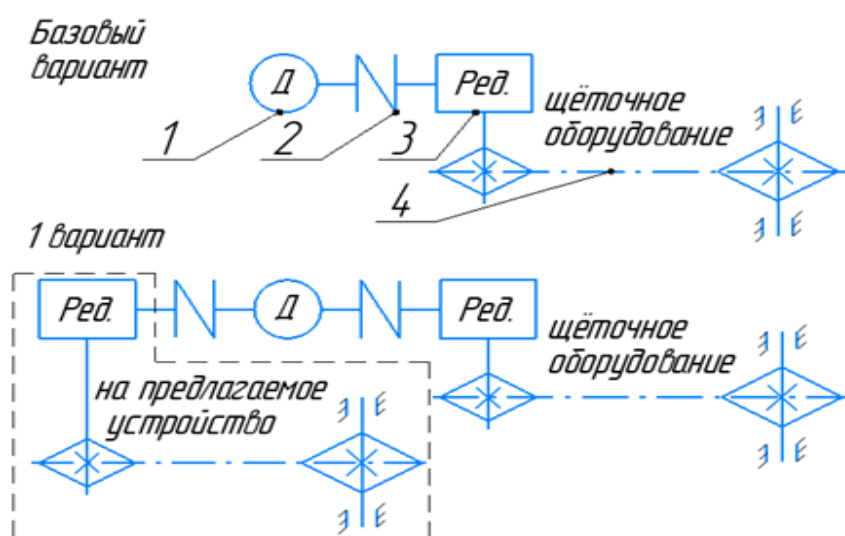
экономического эффекта (по причине исключения применения дополнительных единиц уборочной техники и ПГМ при очистке покрытий), так и не менее важного социального – снижение в зимний период количества ДТП и случаев травматизма среди пешеходов.

При этом, в зимний период модернизированные плужно-щёточные машины можно использовать в качестве вспомогательной пожарной техники для расчистки подъездных путей к труднодоступным местам возгораний и создания временных противопожарных разрывов из снежно-ледяных образований.

### 3.7 Расчет параметров привода

Для проектирования машин с предлагаемым устройством ударного типа, следует рассмотреть кинематические схемы для вариантов привода, а также определить мощности, вращающие моменты на валах привода и другие необходимые параметры [62, 79].

Помимо схемы базового варианта (машины с щётчным оборудованием, без устройства), на рисунке 3.8 показан вариант привода машины, на которой кроме щёток, также установлено данное устройство, то есть 1 вариант – привод с отдельным редуктором для устройства.



1 – двигатель; 2 – упругая муфта; 3 – редуктор; 4 – цепная передача

**Рисунок 3.8 – Кинематические схемы привода машины для базового варианта и варианта с дополнительным редуктором**

Формула для доли мощности, затрачиваемой на устройство по первому варианту, имеет вид:

$$x = P_{\text{прив.}} \cdot (\eta_{\text{ц.п.}} \cdot \eta_{\text{ред.}} \cdot \eta_{\text{муф.}} \cdot \eta_{\text{подш.}}), \quad (3.14)$$

где  $P_{\text{прив.}}$  – мощность привода бульдозера колёсного, модели ДЗ-82 на базе трактора МТЗ 82.1 с отвалом и щётчным оборудованием ( $P_{\text{прив.}} = 59,6$  кВт);  $\eta_{\text{ц.п.}}$  – коэффициент полезного действия (КПД) цепной передачи ( $\eta_{\text{ц.п.}} = 0,93$ );  $\eta_{\text{ред.}}$  – КПД редуктора ( $\eta_{\text{ред.}} = 0,96$ );  $\eta_{\text{муф.}}$  – КПД муфты ( $\eta_{\text{муф.}} = 0,98$ );  $\eta_{\text{подш.}}$  – КПД подшипников ( $\eta_{\text{подш.}} = 0,99$ ).

Установим по формуле (3.14) долю мощности на устройство:

$$x = P_{\text{прив.}} \cdot (0,93 \cdot 0,96 \cdot 0,98 \cdot 0,99) = 1 - 0,87 = 0,13.$$

Тогда мощность, затрачиваемая на функционирование разработанного устройства, вычисляется по формуле:

$$P_{\text{р.у.}} = P_{\text{прив.}} \cdot x. \quad (3.15)$$

Определим мощность, затрачиваемую на работу устройства для первого варианта:

$$P_{\text{р.у.}} = 59,6 \cdot 0,13 = 7,75 \text{ кВт.}$$

На рисунке 3.9 показаны 2 и 3 варианты – расположение привода вращения устройства за приводной передачей щётчного оборудования.

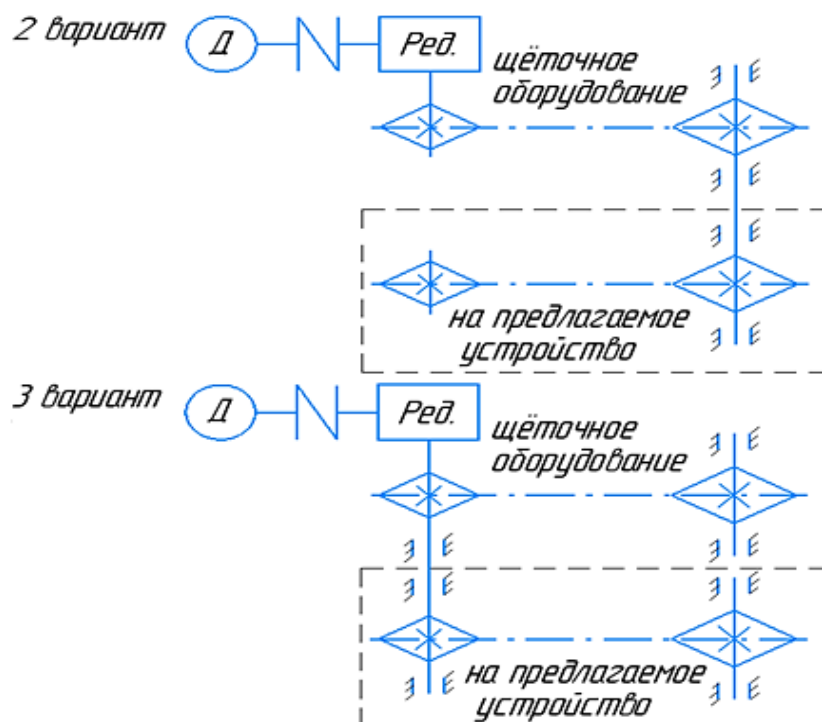


Рисунок 3.9 – Кинематические схемы привода для 2 и 3 варианта

Доля мощности  $x$ , затрачиваемая на разработанное устройство по второму и третьему варианту равна:

$$x = P_{\text{прив.}} - (\eta_{\text{ц.п.}} \cdot \eta_{\text{подш.}}). \quad (3.16)$$

По формуле (3.16) рассчитаем долю мощности, приходящуюся на устройство:

$$x = P_{\text{прив.}} - (0,94 \cdot 0,99) = 1 - 0,93 = 0,07.$$

Вычислим эту мощность для второго и третьего варианта:

$$P_{\text{р.у.}} = 59,6 \cdot 0,07 = 4,17 \text{ кВт.}$$

В первом варианте необходимо потратить мощности на 3,58 кВт больше, чем при втором и третьем, но варианты 2 и 3 не подходят для реализации с конструкционной точки зрения, поскольку в этих случаях потребуются цепная передача значительной длины, которая имеет ряд существенных недостатков, что свидетельствует о нецелесообразности применения второго и третьего вариантов.

Величина крутящего момента на валу разработанного устройства  $T_{\text{р.у.}}$  будет равна:

$$T_{\text{р.у.}} = \frac{P_{\text{р.у.}}}{\nu}, \quad (3.17)$$

где  $\nu$  – частота вращения вала разработанного устройства,  $\text{с}^{-1}$ .

Касательная сила  $F_t$ , приводящая во вращение вал устройства, равна:

$$F_t = \frac{T_{\text{р.у.}} \cdot 2}{d}, \quad (3.18)$$

где  $d$  – диаметр основной окружности звёздочки, м.

Сила тяжести всех отбойников устройства определяется по формуле:

$$G = nmg, \quad (3.19)$$

где  $n$  – количество отбойников, устанавливаемых на разработанное устройство;  $m$  – масса одного отбойника, кг.

Радиальная сила  $F_r$ , приходящаяся на звёздочку, равна:

$$F_r = k_B \cdot F_t = \frac{P_{\text{р.у.}} \cdot 2}{d\nu} k_B = \frac{2 \cdot P_{\text{п.б.м.}} \cdot \eta_{\text{ц.п.}} \cdot \eta_{\text{подш.}} \cdot k_B}{d\nu}, \quad (3.20)$$



где  $P_{п.б.м.}$  – мощность привода базовой машины, кВт;  $k_B$  – коэффициент превышения тангенциальной составляющей нагрузки на звёздочке, при условии, что внешняя нагрузка носит ударный характер ( $k_B = 1,15$ ).

Направления сил, за счёт которых производится движение (функционирование), приведены на рисунке 3.10.

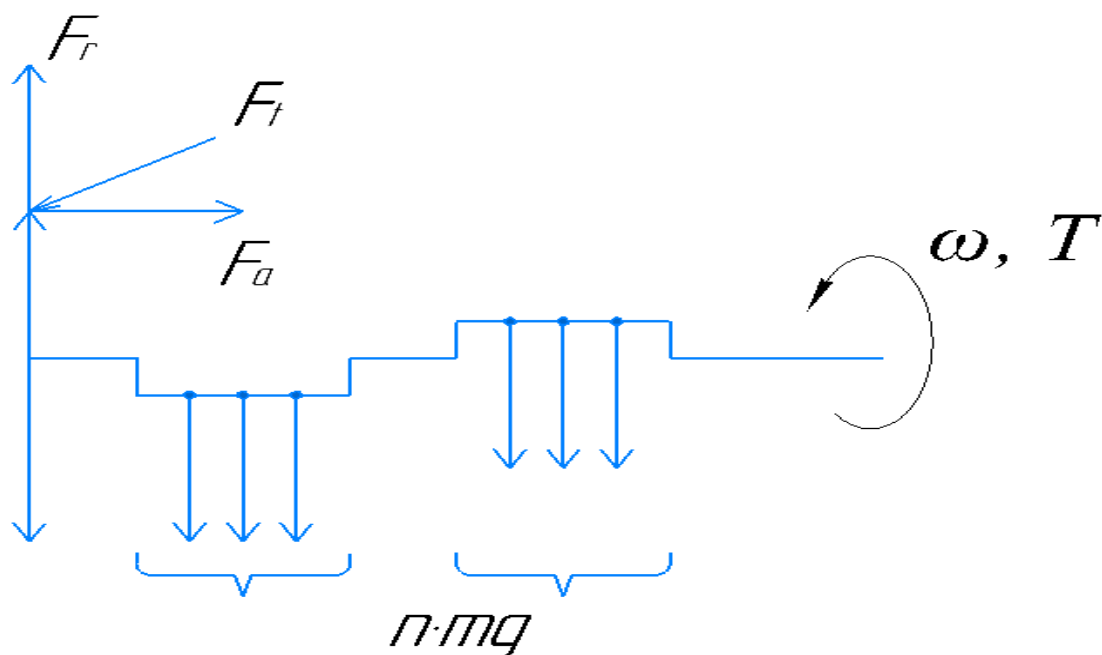


Рисунок 3.10 – Распределение сил, действующих для работы дополнительного устройства

Для нормальной работы привода принимаем условие:

$$F_r \leq G. \quad (3.21)$$

С учётом формул (3.19) и (3.20), получим:

$$\frac{2 \cdot P_{п.б.м.} \cdot \eta_{ц.п.} \cdot \eta_{подш.} \cdot k_B}{dv} \leq nmg. \quad (3.22)$$

Откуда диаметр ведомой звёздочки вала равен:

$$d = \frac{2 \cdot P_{п.б.м.} \cdot \eta_{ц.п.} \cdot \eta_{подш.} \cdot k_B}{vnmg}. \quad (3.23)$$

Диаметр ведущей звёздочки на валу привода равен:

$$d_1 = \frac{d}{i}, \quad (3.24)$$

где  $i$  – передаточное число цепной передачи ( $i = 1,5 \dots 4$  до 10).

Таким образом, проведённые расчёты вариантов привода позволяют выбрать рациональный вариант для осуществления работы усовершенствованной плужно-щёточной машины для борьбы с зимней скользкостью.

### 3.8 Описание конструкции дополнительного уборочного устройства

Имеющегося у плужно-щёточных машин базового уборочного оборудования зачастую бывает недостаточно для обеспечения качественной очистки покрытий: у слоёв льда и снега, оставшихся после прохода отвала, поверхность становится прочной и скользкой, а эффективность щёток в таких условиях очень мала [98]. Поэтому отбойники разработанного ударного оборудования будут воздействовать на те слои, которые не смогут срезать и снести отвал со щётками.

На базе плужно-щёточной машины возможно расположение предлагаемого оборудования с тыльной стороны отвала [97, 99, 154], разместив концы вала ударного оборудования в специальных кронштейнах, приваренных к отвалу. При этом, полностью смонтированный коленчатый вал можно сразу установить на отвале, сократив время на сборку и регулирование разработанного оборудования.

Ударные узлы, расположенные на коленчатом валу, целесообразно разбить на участки, которые между собой предлагается соединять сдвоенными муфтами (рисунок 3.11). Соединение участков в муфте осуществляется при помощи штифтов, установленных в её соосные отверстия. Штифты необходимо жёстко фиксировать с помощью гаек и пружинных шайб.

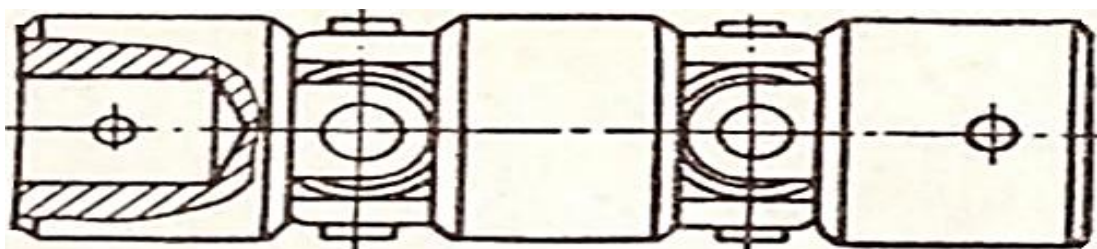


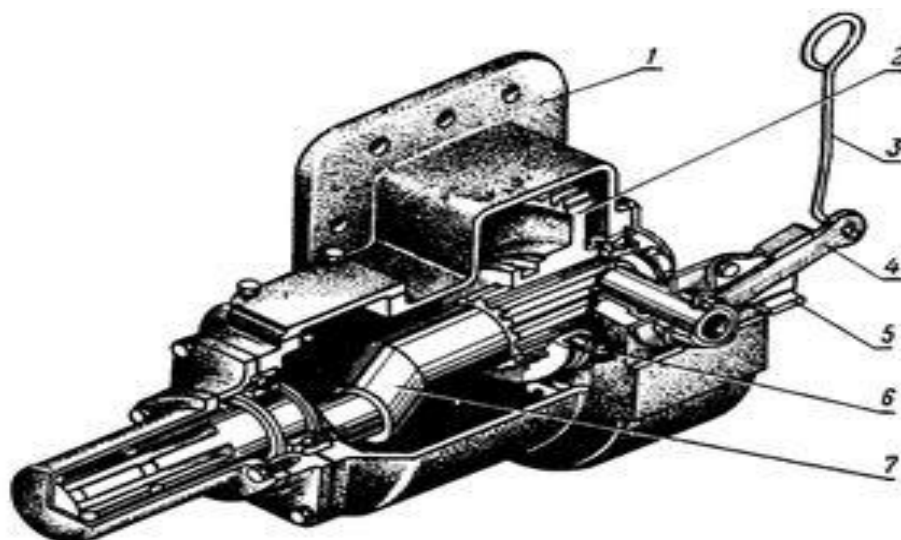
Рисунок 3.11 – Сдвоенная муфта

Одной из основных причин принятия такого конструктивного решения (использования сдвоенных муфт), является длина вала устройства, равная 2,5 м.

Очевидно, что при вращении вала такой длины, в нём возникают радиальные биения, которые приведут к поломке конструкции.

Сдвоенная муфта выполняет роль карданной передачи. Эта муфта передаёт крутящий момент с одного участка вала на другой и служит своеобразным компенсатором радиального биения. К тому же сдвоенная муфта удерживает вал крепления ведомой звёздочки цепной передачи по отношению к ведущему валу и служит для сохранения заданной скорости вращения отбойников при возможном повороте отвала.

Принцип работы устройства заключается в том, что ведущий вал цепной передачи через редуктор соединён с боковым валом отбора мощности уборочной машины (рисунок 3.12) для обеспечения вращения коленчатого вала и закреплённых на нём ударных узлов, в которых установлены отбойники [98].



*1 – корпус; 2 – подвижная шестерня; 3 – тяга управления; 4 – рычаг; 5 – фиксирующая пластина; 6 – поводок; 7 – вал отбора мощности*

**Рисунок 3.12 – Боковой вал отбора мощности (боковой ВОМ)**

Боковой вал отбора мощности необходим для привода дополнительного оборудования, размещённого как спереди, так и с боков машины.

В середине коленчатого вала установлен кронштейн, служащий для защиты конструкции от провисания. Этот кронштейн также приварен к отвалу.

Для обеспечения работы отбойников ударных узлов в вертикальном положении относительно поверхности участка зимней скользкости можно

использовать раскос, который одним концом соединён с отвальной поверхностью, а вторым – к неподвижной части кронштейна, на котором установлен вал.

Проведённое технико-экономическое обоснование предлагаемого оборудования, показало целесообразность его использования на практике с экономической эффективностью, равной 12321 рубль на одну машину в год (приложение Г).

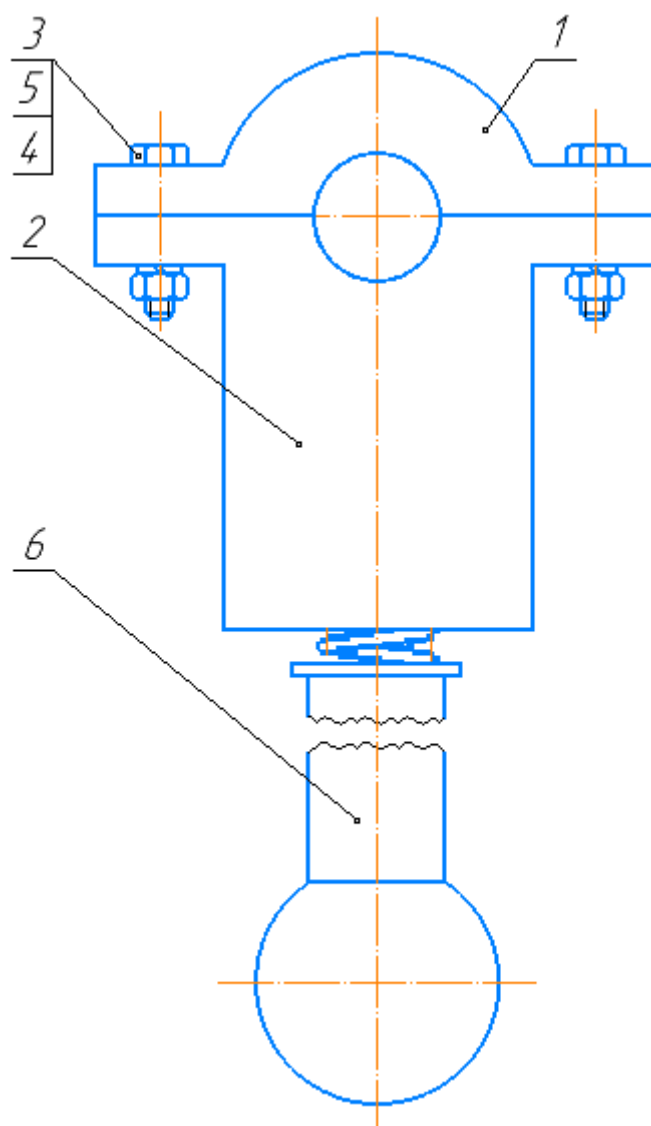
Сведения, необходимые для более полного представления о работе предлагаемого устройства [98], приведены далее.

К основным достоинствам разработанного устройства относятся следующие конструкционные и эксплуатационные особенности:

- простота и быстрота снятия и установки деталей устройства;
- относительно невысокая стоимость большинства составляющих его деталей;
- возможность изменения положения отбойников относительно обрабатываемой поверхности, в зависимости от прочности и толщины разрушаемых образований;
- оперативная замена контактирующих частей отбойников для увеличения или уменьшения массы рабочих органов;
- возможность регулирования размеров скола льда и слоя снежного наката (уплотнённого снега);
- возможность эксплуатации предлагаемого оборудования для зимней очистки покрытий проезжих частей и пешеходных пространств во всех субъектах РФ.

Для устройства длина коленчатого вала и количество ударных узлов определяется исходя из ширины отвала, а его высота влияет на размеры ударных узлов и отбойников.

Ударный узел (рисунок 3.13) состоит из верхнего полухомута 1 и нижнего полухомута 2, в котором закреплены отбойники б, предназначенные для нанесения периодических ударов по выровненной отвалом поверхности участка зимней скользкости. Фиксация ударного узла осуществляется на коленчатом валу за счёт болтов 3, гаек 4 и пружинных шайб 5.

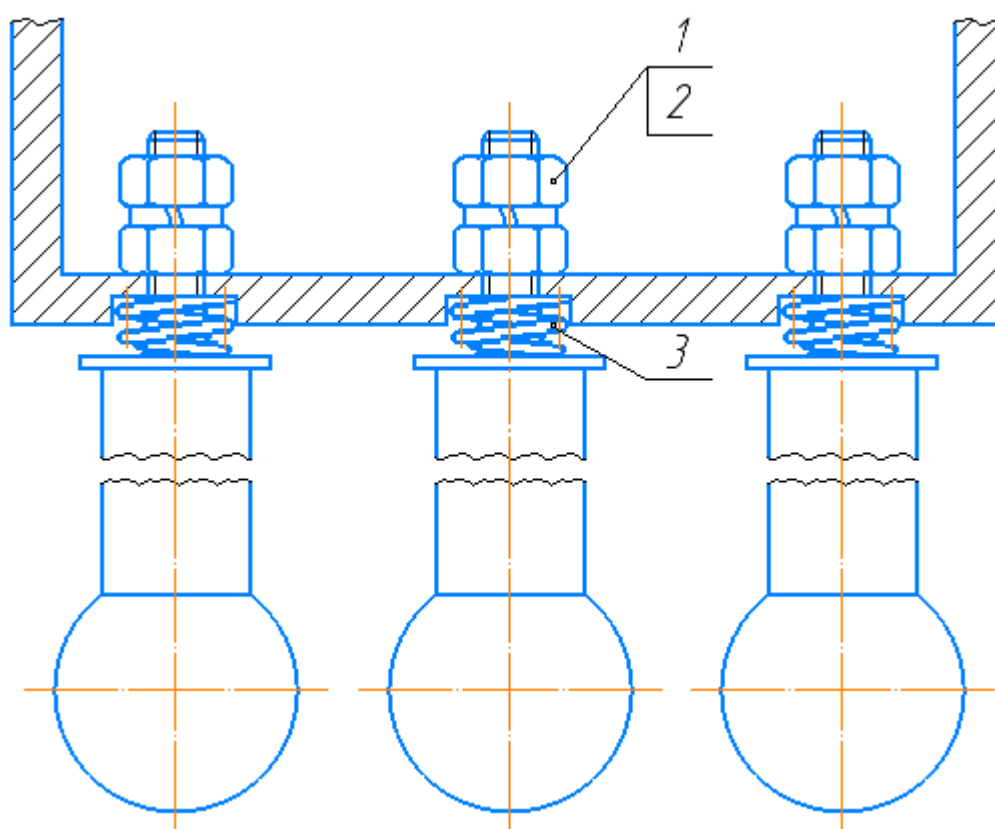


*1 – верхний полухомут; 2 – нижний полухомут; 3 – болты; 4 – гайки;  
5 – пружинные шайбы; 6 – отбойники*

**Рисунок 3.13 – Ударный узел (вид слева)**

Следует отметить, что болты 3 необходимо затягивать с таким усилием, чтобы вращение внутренней поверхности ударного узла относительно цилиндрической поверхности коленчатого вала было свободным. Для этого между полухомутами необходимо поставить резиновые прокладки, которые будут обеспечивать небольшой зазор. В противном случае, коленчатый вал зажмут полухомуты и его вращение будет серьезно затруднено. Из-за этого может произойти остановка работы механизма и даже не исключается вероятность его поломки.

Каждый отбойник внутри нижнего полухомута (рисунок 3.14) закреплён при помощи двух гаек 1 и пружинной шайбы 2. Пружина 3 необходима для обеспечения безопасности работы отбойника, в случае его столкновения с неровностью на обрабатываемой поверхности, а также для предотвращения повреждения стенки, на которой закрепляют отбойники. Эти повреждения могут быть при высоких рабочих скоростях оборудования, но пружина снижает нагрузку на ударный узел и защищает покрытие от разрушения.



1 – гайки; 2 – пружинные шайбы; 3 – пружины

**Рисунок 3.14 – Крепление отбойников внутри ударного узла**

Траектория вращения отбойника (рисунок 3.15) не хаотична. Защитой от беспорядочного вращения данного рабочего органа является фиксаторный раскос, с помощью которого для него сохраняется заданная траектория, вне зависимости от формы его части, непосредственно контактирующей с слоем (слоями) зимней скользкости. Раскос представляет собой затянутые полурейки, приваренные к отвалу по всей его ширине. Данные полурейки образуют отверстия, необходимые для установки в них отбойников.

На рисунке 3.15 также показаны промежуточные положения рабочего органа при вращении коленчатого вала.

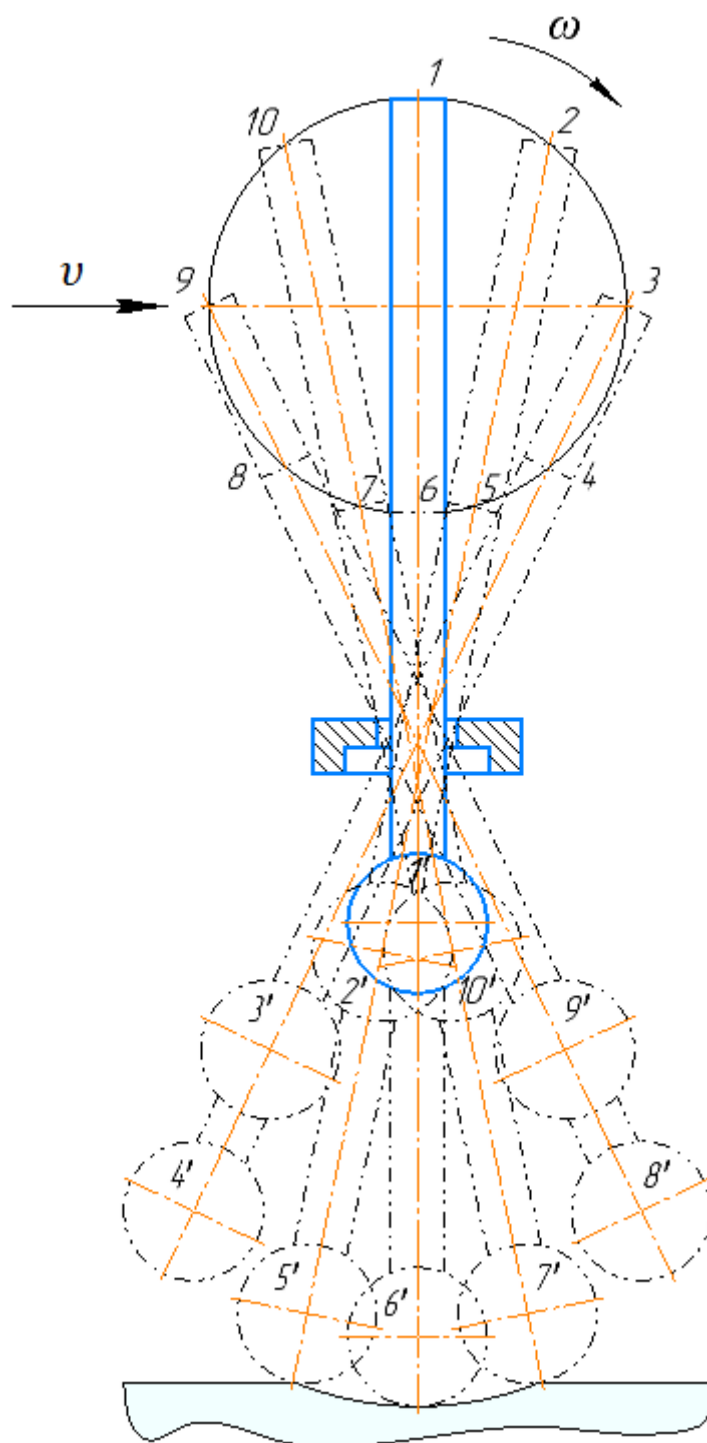


Рисунок 3.15 – Траектория вращения отбойника

Нужно отметить, что траекторию вращения отбойников можно изменить, поскольку её характер зависит от диаметра отверстий, выполненных в раскосе. Предусмотренное изменение позволяет как регулировать глубину проникновения

отбойника в участок зимней скользкости, так и задавать необходимые размеры насечек и разламываемых кусков.

Проверка работоспособности устройства проводится в режиме холостого хода. При этом, могут быть выявлены возможные неисправности для их оперативного устранения. Включение холостого хода необходимо также и для дальнейшей настройки коленчатого вала, ударных узлов, отбойников и цепной передачи.

От водителя уборочной машины не требуется прохождения дополнительного обучения для применения устройства, так как для работы этого оборудования достаточно всего лишь включения бокового вала отбора мощности, который устанавливается на заводе-изготовителе машины. Управлять боковым валом отбора мощности весьма просто.

Таким образом, при оснащении плужно-щёточной машины предлагаемым устройством, отсутствует необходимость изменения систем управления её уборочного оборудования.

### **3.9 Определение расположения и размеров насечек, наносимых разработанным устройством**

Характер расположения насечек на выровненной (ровной) поверхности участка зимней скользкости зависит, главным образом, от скорости перемещения модернизированной плужно-щёточной машины ( $v_p$ ), расстояния между ударными узлами, установленными на коленчатом валу и скорости вращения ( $v$ ) коленчатого вала с ударными узлами.

При работе базового и предлагаемого уборочного оборудования плужно-щёточной машины, скорость её перемещения составляет 2-4 км/ч. От расстояния между ударными узлами, зависит расстояние между насечками в направлении, перпендикулярном направлению движения потока машин (рисунок 3.16, размер  $c$ ), а параметр  $v$  влияет на расстояние между насечками в направлении движения машин (рисунок 3.16, размер  $d$ ).



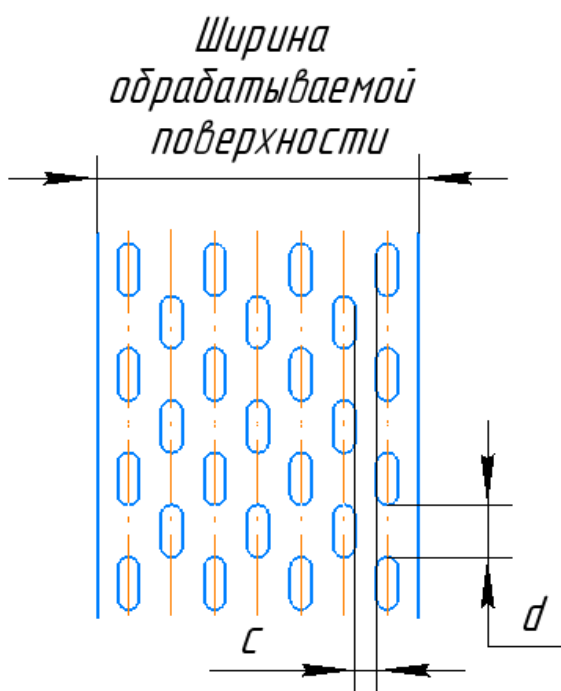
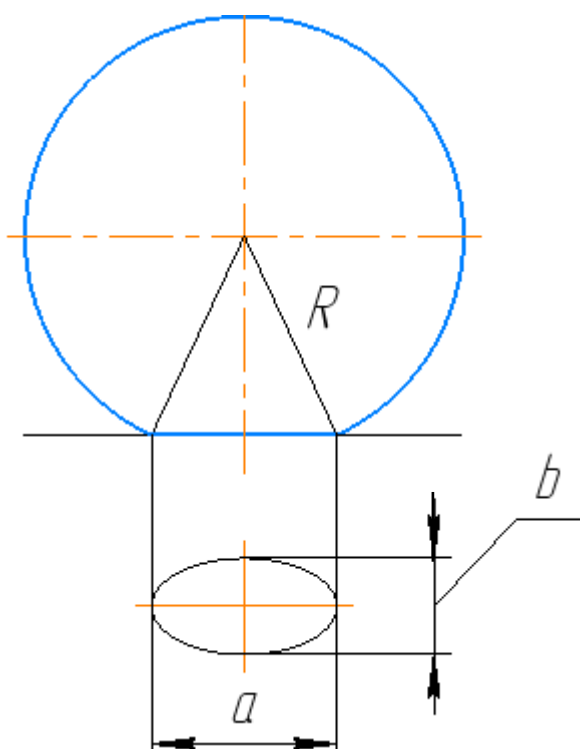


Рисунок 3.16 – Схема для определения расположения насечек

Для доведения поверхности указанного участка до уровня безопасной эксплуатации необходимо, чтобы расстояния  $d$  и  $c$  между насечками (рисунок 3.16) не превышали размеров  $a$  и  $b$  пятна контакта шины колеса автомобиля соответственно (рисунок 3.17).



$a$  – длина пятна;  $b$  – ширина пятна

Рисунок 3.17 – Пятно контакта шины колеса автомобиля с дорожным покрытием

Расстояние  $d$  между насечками следует определять исходя из длины пятна контакта:

$$a = \sqrt{\frac{P_{\text{доп.}}}{P_{\omega}}}, \quad (3.25)$$

где  $P_{\text{доп.}}$  – нагрузка на колесо, Н;  $P_{\omega}$  – давление воздуха в шине, Па.

Указанное расстояние  $d$  – функция длины пятна контакта [154]:

$$d = f(a). \quad (3.26)$$

Рассмотрим возможные варианты нанесения насечек в зависимости от скорости перемещения базовой машины и скорости вращения коленчатого вала.

В точке  $A$  (рисунок 3.18) отбойник начинает взаимодействовать с поверхностью участка зимней скользкости. Постепенно внедряясь в толщу этого участка, отбойник проделывает в нём насечку, с размерами  $h$ ,  $f$ ,  $k$ . При этом, размер  $h$  зависит от массы отбойника, его положения и прочности обрабатываемого участка.

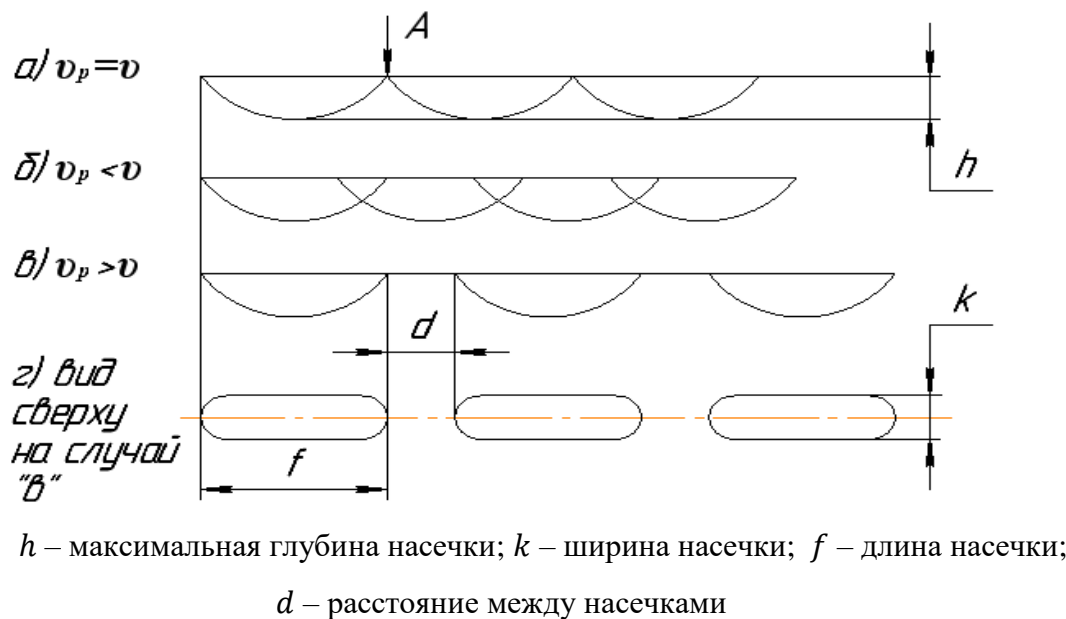
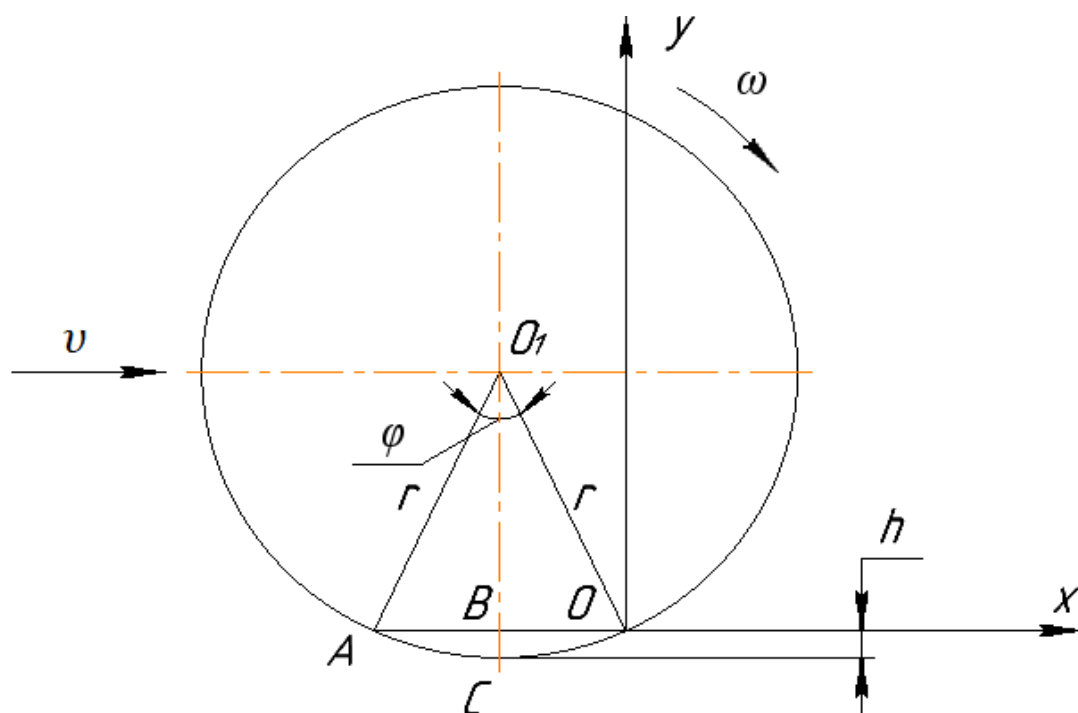


Рисунок 3.18 – Схема изменения расположения насечек

Если скорость передвижения базовой машины равна скорости вращения коленчатого вала (рисунок 3.18 а), то оставляемые отбойником следы будут представлять собой практически сплошную цепочку (при таких условиях коэффициент сцепления будет выше, чем в следующих случаях). Перекрытие насечек наблюдается в случае, приведённом на рисунке 3.18 б). Когда скорость

базовой машины выше скорости вращения коленчатого вала (рисунок 3.18 в), насечки располагаются друг от друга на расстоянии  $d$ . Вид сверху (рисунок 3.18 г) может быть и в виде практически идеального прямоугольника, если контактирующая часть отбойника выполнена в форме клина.

Исходя из схемы внедрения отбойника в толщу слоя зимней скользкости (рисунок 3.19), определим рабочие параметры коленчатого вала и отбойника.



$O_1$  – ось коленчатого вала;  $r$  – длина отбойника;  $\varphi$  – угол между начальным и конечным положением отбойника на обрабатываемой поверхности

**Рисунок 3.19 – Схема внедрения отбойника в толщу слоя зимней скользкости**

Точка  $O$  является начальной точкой контакта отбойника с обрабатываемой поверхностью, а точка  $A$  конечной. Точки  $B$  и  $C$  необходимы для определения положения коленчатого вала и выделения середины длины насечки соответственно.

Расстояние от оси коленчатого вала  $O_1$  до обрабатываемой поверхности равно:

$$O_1B = r - h. \quad (3.27)$$

Половина длины насечки определяется по формуле:

$$OB = \sqrt{r^2 - (r - h)^2} = \sqrt{r^2 - r^2 + 2rh - h^2} = \sqrt{h(2r - h)}. \quad (3.28)$$

Откуда длина насечки  $f$  равна:

$$f = 2OB = 2\sqrt{h(2r - h)}. \quad (3.29)$$

Тогда уравнение окружности, описываемой отбойником, будет иметь вид:

$$r^2 = [x + \sqrt{h(2r - h)}]^2 + [y - (r - h)]^2. \quad (3.30)$$

Диаметр траектории вращения отбойника  $d_0$  связан с расстоянием  $S$ :

$$S = \frac{\omega \cdot d_0 \cdot t}{2}, \quad (3.31)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения коленвала и отбойника,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  – время работы оборудования ударного действия и передвижения базовой машины (при остановке двигателя прекращается работа и дополнительного устройства [154]), с.

Расстояние, которое должна пройти базовая машина, определяется по формуле:

$$S = v_p \cdot t. \quad (3.32)$$

Выразив время  $t$  из формул (3.31) и (3.32), получим угловую скорость вращения коленчатого вала и расположенного на нём отбойника:

$$\omega = \frac{2v_p}{d_0} = \frac{v_p}{r_0}. \quad (3.33)$$

Рассмотренный в настоящем подразделе принцип регулирования расположения и размеров насечек следует применять для повышения сцепных качеств прочных слоёв зимней скользкости, оставшихся по окончании работ по их очистке как на дорожных, так и на «пешеходных» покрытиях. Однако расстояние между насечками не будет зависеть от размеров пятна контакта шины колеса, если данные насечки выполнены на выровненных участках зимней скользкости, оставшихся на покрытиях пешеходных пространств. В этом случае разрывы между насечками должны быть небольшими, для обеспечения зацепления с обработанной поверхностью обуви пешеходов.

### **3.10 Корректировка расчета тягового усилия модернизированной уборочной машины**

Основная цель проведения тягового расчёта любой плужно-щёточной уборочной машины – определение всех возникающих во время работы машины

видов сопротивлений [10, 165, 174], сумма которых должна быть меньше необходимого тягового усилия  $P$ :

$$P > \sum_{i=1}^n W_i, \quad (3.34)$$

где  $n$  – количество видов сопротивлений;  $W_i$  – сопротивление  $i$ -го вида.

В случае отключения щётчного оборудования, полное сопротивление, преодолеваемое тяговым усилием базовой машины (на поворотном отвале которой установлено ещё и предлагаемое устройство), складывается из семи видов сопротивлений:

$$\sum_{i=1}^n W_i = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7, \quad (3.35)$$

где  $W_1$  – сопротивление снежно-ледяных образований срезанию ножами отвала, Н;  $W_2$  – сопротивление перемещению призмы волочения, Н;  $W_3$  – сопротивление перемещению снежно-ледяных образований вверх по отвалу, Н;  $W_4$  – сопротивление перемещению снежно-ледяных образований вдоль по отвалу [174], Н;  $W_5$  – сопротивление перемещению базовой машины, Н;  $W_6$  – сопротивление снежно-ледяных образований разрушению отбойниками предлагаемого устройства, Н.  $W_7$  – сопротивление перемещению предлагаемого устройства, Н.

Слагаемые  $W_1$ - $W_5$  полного сопротивления работе плужно-щёточной уборочной машины подробно рассмотрены во многих научных источниках, в разделах по проведению расчётов такого типа. Однако, для определения полного сопротивления работе модернизированной машины, необходимо установить сумму слагаемых  $W_6$  и  $W_7$  через усилие, прилагаемое *отбойником* для разрушения этих образований [97]:

$$W_{\text{у. отб.}} = F \cdot k_0, \quad (3.36)$$

где  $F$  – площадь насечки, м<sup>2</sup>;  $k_0$  – предел прочности обрабатываемого отбойником слоя снежно-ледяных образований, Па.

В свою очередь, площадь насечки равна:

$$F = k \cdot L, \quad (3.37)$$

где  $k$  – ширина насечки, м;  $L$  – длина дуги, образующаяся после внедрения отбойника в толщу снежно-ледяных образований, м.

Из рисунка 3.19 определим длину дуги  $L$  ( $\overset{\frown}{AO}$ ):

$$L = 2r \cdot \arccos \frac{r-h}{r}. \quad (3.38)$$

Подставим полученный параметр  $L$  в формулу (3.37):

$$F = 2k \cdot r \cdot \arccos \frac{r-h}{r}. \quad (3.39)$$

Тогда усилие разрушения отбойником снежно-ледяных образований равно:

$$W_{y. \text{ отб.}} = 2k \cdot r \cdot k_0 \cdot \arccos \frac{r-h}{r}. \quad (3.40)$$

Сумму сопротивлений  $W_6$  и  $W_7$  можно рассчитать из формулы:

$$W_6 + W_7 = nW_{y. \text{ отб.}} \quad (3.41)$$

Очевидно, что тяговое усилие базовой машины должно быть достаточным для одновременного обеспечения перемещения машины и работы устройств, связанных с двигателем. Поэтому для эффективной борьбы со льдом и снегом следует выбирать такие модификации плужно-щёточных машин, для которых функционирование с предлагаемым дополнительным уборочным устройством не будет являться причиной снижения рабочей скорости перемещения [97].

### 3.11 Выводы по третьему разделу

1) Для определения условий эффективного использования дорожных и коммунальных уборочных средств ударного типа в борьбе с зимней скользкостью потребовалось провести двухэтапные исследования, цели которых – определение наиболее оптимальной конфигурации частей оборудования, которыми непосредственно производятся удары, в том числе для нанесения насечек на поверхности неразрушенных участков зимней скользкости, а также определение угла наклона этих насечек по отношению к продольной оси движения, при котором

сцепные качества обработанной ударниками поверхности будут достаточными для безопасного передвижения автомобилей.

2) На первом этапе исследований произведена оценка эффективности разрушения льда по показателю энергоёмкости этого процесса, исходя из эксперимента по разрушению льда ударниками, выбранных конфигураций. Самые малые значения энергоёмкости разрушения получены от использования клина и шара. Сравнение этих вариантов ударников показывает, что при контакте шара со льдом, помимо следа от внедрения, ещё образуются и трещины, ведущие к снижению прочности льда, а после сбрасывания клина остаётся только лунка, но больших размеров, чем от ударника в форме шара. Поэтому непосредственно контактирующие с плотными слоями зимней скользкости части ударного уборочного оборудования лучше всего выполнять в форме шара или клина.

3) Исключение возможности повреждения очищаемых покрытий при устранении зимней скользкости ударниками оптимальных конфигураций, может быть обеспечено за счёт установления массы этого оборудования для текущих погодных условий, исходя из полученных зависимостей изменения энергоёмкости разрушения льда от температуры.

4) На втором этапе исследований определено условие повышения сцепных качеств поверхности выровненных участков зимней скользкости, состоящее в нанесении на обрабатываемом покрытии насечек под углом в  $45^\circ$  к направлению движения машин.

5) Разработанное устройство ударного действия (размещаемое на тыльной поверхности отвала) является дополнительным уборочным оборудованием для плужно-щёточных машин. Если на очищаемом покрытии отсутствуют особо прочные участки зимней скользкости, то результатом последовательного использования отвала, предлагаемого и щёточного оборудования может быть практически полное удаление льда и снега. В случае наличия прочных участков, на их выровненной отвалом поверхности, отбойниками предлагаемого устройства наносятся насечки, из-за которых происходит значительное повышение сцепных качеств указанной поверхности.

6) Изучено влияние факторов на изменение расположения и размеров насечек. Кроме того, оценена траектория вращения отбойника и приведены зависимости для определения основных его параметров.

7) Для функционирования разработанного коленчато-ударного устройства в составе уборочного оборудования плужно-щёточной машины, осуществлено изменение привода, при котором выполняется условие отбора мощности от базовой силовой установки машины, с учётом того, что такое изменение производится с минимальными затратами.

8) Выполнена корректировка тягового расчёта для плужно-щёточной машины, на отвале которой установлено предлагаемое уборочное оборудование ударного действия.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) На основании выполненного анализа современного оборудования для очистки покрытий проезжих частей и пешеходных пространств в зимний период, выявлены два наиболее подходящих вида уборочной техники для совместного использования – плужно-щёточные машины и устройства ударного действия. Сочетание базового оборудования плужно-щёточных машин с рабочими органами ударного типа необходимо для разрушения и удаления с покрытий прочных и многослойных участков зимней скользкости.

2) Большая часть моделей описания и расчёта непосредственного взаимодействия тел со льдом не адаптирована для прогнозирования разрушения льда, уплотнённых снежных и снежно-ледяных образований на дорожных и «пешеходных» покрытиях, а важное направление моделирования разрушения участков зимней скользкости воздействиями ударного типа, на сегодняшний день практически не исследуется. В целях развития этого направления и определения значений разрушающего воздействия для ведения эффективной борьбы с зимней скользкостью, разработана модель разрушения пластины изо льда на дорожном покрытии за счёт применения воздействия ударного типа, учитывающая вероятностные и случайные аспекты изменения характеристик образца и условий воздействия на него. Кроме того, разработана имитационная модель НДС льда, расположенного на дорожном покрытии, с целью прогнозирования изменения значений факторов, действующих на такое состояние образца при использовании ударной нагрузки.

3) Изложены результаты эксперимента для оценки всех заданных факторов модели НДС льда и подтверждения правильности этой модели, включая расчёты по составлению уравнения регрессионной зависимости прогиба образца, при помощи которого установлены значимые факторы, оказывающие значительное влияние на НДС модели, а также выполнено построение графиков полученного уравнения регрессии, сравнение которых с графиками модели доказывает её достоверность. Дополнительно приведён соответствующий пример расчёта по

определению минимального значения деформации, приводящей к разрушения выровненного ледяного массива на дорожном покрытии.

4) Разработана методика для определения и оценки показателей энергоёмкости разрушения ровной поверхности льда ударными рабочими органами любых конфигураций. Сравнение полученных значений объёмов зон разрушения от выбранных конфигураций образцов необходимо для установления вариантов инструментов ударного типа, при использовании которых устранение участков зимней скользкости осуществляется с минимальной энергоёмкостью.

5) На основе предложенной методики, выявлены наиболее рациональные конфигурации для частей ударных рабочих органов, непосредственно взаимодействующих с участками зимней скользкости.

6) Получены выражения изменения энергоёмкости разрушения льда ударниками наиболее рациональных форм в зависимости от температуры, позволяющие установить массы ударников применительно к текущей температуре окружающей среды, для исключения повреждения покрытий при их очистке.

7) Разработано устройство ударного типа для плужно-щёточных уборочных машин, размещаемое на тыльной стороне отвалов. Предлагаемое устройство предназначено для устранения зимней скользкости посредством нанесения ударов по выровненной отвалом поверхности таких образований набором отбойников, установленных в специальных узлах, закреплённых на коленчатом валу, приводящегося во вращение от двигателя базовой машины через боковой вал отбора мощности и цепную передачу. После прохода отвала, отбойниками либо осуществляется разрушение участков зимней скользкости, с дальнейшим удалением раздробленной массы щётками, либо производится нанесение насечек для увеличения коэффициента сцепления шин колёс автомобилей или обуви пешеходов с поверхностью данных участков до значений, соответствующих требованиям действующих нормативных документов, регламентирующих содержание дорожных и «пешеходных» покрытий в зимний период. При этом, предусмотрена конструктивная возможность регулирования как положения

отбойников относительно поверхности обрабатываемых участков, так и траектории их вращения.

8) Проведены исследования по определению наиболее выгодных условий нанесения насечек ударным уборочным оборудованием рекомендуемых конфигураций на выровненную поверхность прочных участков зимней скользкости. Установлено, что насечки должны быть размещены на поверхности этих участков под углом наклона в  $45^\circ$ . Также выполнен анализ сценариев изменения расположения насечек на обрабатываемых участках в зависимости от скорости перемещения уборочной машины и скорости вращения коленчатого вала с отбойниками, при помощи которого выявлен самый эффективный режим функционирования базового оборудования совместно с разработанным. Использование полученных результатов этих исследований на практике может привести к повышению сцепных качеств таких участков до уровня их безопасной эксплуатации.

9) Предложен порядок установления суммы сопротивлений, оказывающих противодействие работе предлагаемого уборочного оборудования ударного действия и выбран рациональный вариант привода для осуществления функционирования усовершенствованной машины.

## Словарь терминов

В мире постоянно совершенствуются действующие и разрабатываются новые способы и средства борьбы с зимней скользкостью. Такая деятельность безусловно приводит к появлению новых терминов. Применительно же к настоящему исследованию, ниже приведены термины из нескольких научных отраслей, чтобы, тем самым, придать чёткость его трактовке.

**зимнее содержание автомобильных дорог:** Комплекс мероприятий по обеспечению безопасного и бесперебойного движения на автомобильных дорогах в зимний период года, включающий предупреждение образования и ликвидацию зимней скользкости.

**зимний период:** Период времени года с отрицательными среднесуточными температурами наружного воздуха.

**зимняя скользкость:** Все виды снежных, ледяных и снежно-ледяных образований на проезжих частях, укреплённых обочинах, площадках отдыха, остановках маршрутного транспорта, тротуарах и пешеходных (велосипедных) дорожках, приводящие к снижению сцепных свойств поверхности покрытия.

**коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью:** Отношение результирующей продольной и поперечной сил реакций опорной поверхности, действующих в контакте колеса с опорной поверхностью, к величине нормальной реакции опорной поверхности на колесо.

**пешеходные пространства:** Территории, предназначенные для пешеходного движения, на которых запрещено передвижение моторизованных транспортных средств, за исключением автомобилей специальных служб, коммунальной техники, транспортных средств для инвалидов, а также автомобилей для обслуживания магазинов, ресторанов, кафе (при отсутствии альтернативного маршрута).

**противогололедные материалы:** Твёрдые, кристаллические или жидкие материалы, либо их смеси, распределяемые по покрытиям проезжих частей и

пешеходных пространств для предупреждения или ликвидации зимней скользкости.

**с-ось:** Главная ось симметрии кристалла льда.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абаев, М. Топливо для полета, или чего боится бензин / М. Абаев // Наука и жизнь. – 2018. – № 12. – С. 18-21.
2. Автомобильные дороги и мосты. Противогололедные материалы для борьбы с зимней скользкостью на автомобильных дорогах и городских улицах. Обзорная информация – М. : ФГУП Информавтодор, 2006. – вып. 4. – 32 с.
3. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – М. : Металлургия, 1969. – 155 с.
4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
5. Аксютин, Л. Р. Обледенение судов / Л. Р. Аксютин. – Л. : Судостроение, 1979. – 127 с.
6. Анализ уровня зимнего содержания автомобильных дорог и тротуаров в г. Москве с 2008 по 2015 год. – М. : РусИнфоСервис, 2015. – 28 с.
7. Антрушин, Н. Авиационно-химические способы ускорения таяния льда / Н. Антрушин // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – М., 1965. – вып. 17. – С. 219-223.
8. Апестина, В. П. Гражданские аэродромы / В. П. Апестина [и др.]; под общ. ред. В. Н. Иванова. – М. : Воздушный транспорт, 2005. – 277 с.
9. Арбатский, А. В. Ручные виброударные инструменты для производства выморозочных работ / А. В. Арбатский, В. Г. Войнич, Р. Г. Соломин // Труды Новосибирского института инженеров водного транспорта. – 1977. – вып. 126. – С. 57-62.
10. Артемьев, К. А. Дорожные машины: в 2-х частях. Ч. 2. Машины для устройства дорожных покрытий: Учебник / К. А. Артемьев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1982. – 396 с.
11. Арушанян, О. Б. Решение линейной краевой задачи для систем обыкновенных дифференциальных уравнений методом ортогональной прогонки

С.К. Годунова / О. Б. Арушанян, С. Ф. Залеткин // Вычислительные методы и программирование. – 2001. – Т. 2, вып. 3. – С. 41-48.

12. А. с. 195910 СССР, МПК В 63b. Устройство для очистки от льда подводной части судна / В. С. Печковский, П. М. Вахмистров (СССР). – № 1041228/27-11 ; заявл. 06.12.65 ; опубл. 04.05.67, Бюл. № 10. – 2 с. : ил.

13. А. с. 217979 СССР, МПК В 63b. Устройство для снятия ледяной чаши, образовавшейся под днищем судна / И. Л. Рабей, А. И. Боровский, С. А. Талипов, О. В. Кортнев (СССР). – № 1127471/27-11 ; заявл. 16.01.67 ; опубл. 07.05.69, Бюл. № 16. – 2 с. : ил.

14. А. с. 280250 СССР, МПК В 63b. Устройство для предотвращения обледенения морских судов / Н. Ф. Буянов, Н. В. Музалевский (СССР). – № 1320066/27-11 ; заявл. 24.03.69 ; опубл. 30.12.70, Бюл. № 27. – 3 с. : ил.

15. А. с. 287532 СССР, МПК В 63b. Толкаемая ледокольно-ледоочистительная приставка с вибрационным устройством / В. В. Расторгуев [и др.] (СССР). – № 1025675/27-11 ; заявл. 07.08.65 ; опубл. 19.11.70, Бюл. № 25. – 2 с. : ил.

16. А. с. 300378 СССР, МПК В 63b 59/00. Способ предотвращения обледенения морских судов / Н. Ф. Буянов, Н. В. Музалевский (СССР). – № 1370357/27-11 ; заявл. 20.09.69 ; опубл. 07.04.71, Бюл. № 13. – 2 с.

17. А. с. 351977 СССР, МПК Е 02 f 5/30. Навесное устройство для разработки мерзлого грунта / П. З. Петухов, Б. Н. Абрамов, М. А. Гурин (СССР). – № 1088071/29-14 ; заявл. 04.08.66 ; опубл. 21.09.72, Бюл. № 28. – 3 с. : ил.

18. А. с. 357114 СССР, МПК В 63с 1/02 В 60s 3/02. Устройство для удаления битого льда из-под днища судна / Н. Д. Андреев (СССР). – № 1614674/27-11 ; заявл. 18.01.71 ; опубл. 31.10.72, Бюл. № 33. – 2 с. : ил.

19. А. с. 442108 СССР, МПК В 63b 35/08. Установка для разрушения ледяного покрова акваторий / В. В. Богородский [и др.] (СССР). – № 1725561/27-11 ; заявл. 16.12.71 ; опубл. 05.09.74, Бюл. № 33. – 3 с. : ил.

20. А. с. 481495 СССР, МПК В 63b 35/12. Устройство для резки льда / И. В. Загрядский, Б. А. Мялкин, Ю. Д. Кравчук (СССР). – № 1759114/27-11 ; заявл. 14.03.72 ; опубл. 25.08.75, Бюл. № 31. – 2 с. : ил.

21. А. с. 554401 СССР, МПК Е 21С 1/00 Е 21С 37/20 Е 21В 7/18. Способ вращательного бурения Э. А. Игнатенко / Э. А. Игнатенко (СССР). – № 1666139/03 ; заявл. 03.06.71 ; опубл. 15.04.77, Бюл. № 14. – 2 с. : ил.

22. А. с. 675132 СССР, МПК Е 02 D 5/30 В 63 В 35/08. Ударное устройство с камерой сгорания для разрушения льда / В. Н. Пикуль (СССР). – № 2501615/29-33 ; заявл. 19.12.77 ; опубл. 25.07.79, Бюл. № 27. – 2 с. : ил.

23. А. с. 1559034 СССР, МПК Е 01 Н 5/12. Рабочий орган для разрушения льда на автодорогах / А. Б. Ермилов, И. А. Стригин, И. П. Басанцев (СССР). – № 4465726/31-11 ; заявл. 20.07.88 ; опубл. 23.04.90, Бюл. № 15. – 3 с. : ил.

24. Афанасьев, И. А. Зимнее содержание территориальных автомобильных дорог Пермского края / И. А. Афанасьев, С. А. Вагнер, В. Ю. Задворнов, Е. С. Краснов. – Пермь : Изд-во ПГТУ, 2006. – 148 с.

25. Афанасьев, И. А. Зимнее содержание улиц и дорог населенных мест Западного Урала / И. А. Афанасьев, А. В. Эдельман, Л. И. Афанасьева. – Пермь : Изд-во ПГТУ, 2006. – 73 с.

26. Афанасьев, Л. Л. Справочник автомобильного механика / Л. Л. Афанасьев, В. А. Иларионов, Н. Э. Струве, К. С. Шестопапов : Под общ. ред. Л. Л. Афанасьева. – М. : Машгиз, 1952. – 628 с.

27. Бажев, А. В. Закономерности таяния искусственно запыленной поверхности ледника / А. В. Бажев // Материалы гляциологических исследований. Хроника, обсуждения. – М. : Изд-во Ин-та географии АН СССР, 1973. – вып. 21. – С. 124-135.

28. Баланин, В. В. Использование тепла глубинных вод водоемов / В. В. Баланин, Б. С. Бородкин, Г. И. Мелконян. – М. : Транспорт, 1964. – 274 с.

29. Бартенев, В. Н. Ледорезная машина для тяжелых льдов / В. Н. Бартенев // Труды Новосибирского института инженеров водного транспорта. – 1977. – вып. 126. – С. 44-49.



30. Басс, Б. Д. Состояние и возможности совершенствования оборудования для образования майн во льдах при раннем весеннем запуске земснарядов / Б. Д. Басс // Труды Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта. – 1978. – вып. 135. – С. 67-84.

31. Богородский, В. В. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии / В. В. Богородский, В. П. Гаврило. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 384 с.

32. Богородский, В. В. Разрушение льда. Методы, технические средства / В. В. Богородский, В. П. Гаврило, О. А. Недошивин. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 232 с.

33. Большая энциклопедия транспорта: в 8 т. Т. 4. Железнодорожный транспорт / Гл. ред. Н. С. Конарев. – М. : Большая Российская энциклопедия, 2003. – 1039 с.

34. Бордонский, Г. С. Акустоэлектрический эффект в пресном льду / Г. С. Бордонский, С. В. Цыренжанов, Ю. В. Харин // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 162-167.

35. Борьба с обледенением кровель / Экспресс-информация ЦБНТИ Ленжилкоммунхоза РСФСР. Серия Жилищное хозяйство. – 1976. – № 28. – 11 с.

36. Бубликова, Ю. И. Интенсивность стаивания ледяного покрова в естественных условиях и при его зачернении // Ю. И. Бубликова, А. Ф. Камынина, М. В. Кунявская // Труды Новосибирского регионального гидрометеорологического центра. – 1969. – вып. 2. – С. 138-143.

37. Васильев, А. П. Анализ современного зарубежного опыта зимнего содержания дорог и разработка предложений по его использованию в условиях России / А. П. Васильев, В. В. Ушаков. – М. : ФГУП Инфрмавтодор, 2003. – 60 с.

38. Вальковский, Л. В. Применение двухбаровой машины на ледорезных и взрывных работах / Л. В. Вальковский, С. И. Левин, А. И. Сезин // Строительство трубопроводов. – 1970. – № 7. – С. 28-29.

39. Войтковский, К. Ф. Механические свойства льда / К. Ф. Войтковский. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 100 с.

40. Войтковский, К. Ф. Основы гляциологии / К. Ф. Войтковский. – М. : Наука, 1999. – 255 с.
41. Воскресенский, Г. Г. Выбор параметров виброскалывателя уплотненного снега / Г. Г. Воскресенский // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2009. – № 3. – С. 38-41.
42. Воскресенский, Г. Г. Исследования процесса резания уплотненного снега на автодорогах / Г. Г. Воскресенский // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 12. – С. 45-48.
43. Воскресенский, Г. Г. Научные основы проектирования рабочего оборудования для разрушения уплотненного снега на автомобильных дорогах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / Геннадий Гаврилович Воскресенский. – Тихоокеан. гос. ун-т. – Хабаровск, 2011. – 38 с.
44. Воскресенский, Г. Г. Основы механики разрушения уплотненного снега на автомобильных дорогах / Г. Г. Воскресенский. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2008. – 250 с.
45. Воскресенский, Г. Г. Энергоемкость процесса резания уплотненного снега / Г. Г. Воскресенский // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 2. – С. 33-35.
46. ВСН 24-88. Технические правила ремонта и содержания автомобильных дорог [Текст]. – Взамен ВСН 24-74. – Введ. 01.01.89. – М. : Транспорт, 1989. – 74 с. – (Ведомственные строительные нормы).
47. ВСН 33-87 Указания по производству изысканий и проектированию лесонасаждений вдоль автомобильных дорог [Текст]. – Взамен ВСН 33-66. – Введ. 01.01.89. – М. : Транспорт, 1988. – 45 с.
48. Ганжа, В. А. Обоснование конструкции и основных параметров дискового режущего инструмента для разрушения снежно-ледяных образований : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Владимир Александрович Ганжа. – Красноярск : Ин-т горного дела СО РАН, 2011. – 23 с.

49. Ганжа, В. А. Разрушение снежно-ледяных образований механическим способом : монография / В. А. Ганжа. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. – 192 с.

50. Гильфанов, Р. Х. Двухфазные антигололедные реагенты – новое слово в зимней уборке в России [Электронный ресурс] / Р. Х. Гильфанов. – Режим доступа: <https://roszimdor.ru/press-tsentr/gilfanov-rustam-khalefovich-publikacii-priglashennykh-ehkspertov/novyyu-bionord-dvukhfaznyu-reagent/> (дата обращения: 20.08.2021).

51. Гильфанов, Р. Х. Противогололедный материал Бионорд – мифы и реальность [Электронный ресурс] / Р. Х. Гильфанов. – Режим доступа: <https://roszimdor.ru/press-tsentr/gilfanov-rustam-khalefovich-publikacii-priglashennykh-ehkspertov/protivogololyednyu-material-bionord-mify-i-realnost/> (дата обращения: 20.08.2021).

52. Гноевой, А. В. Основы теории течений бингамовских сред / А. В. Гноевой, Д. М. Климов, В. М. Чесноков. – М. : Физматлит, 2004. – 272 с.

53. Гольдштейн, Р. В. О модели разрушения льда при большой площади контакта / Р. В. Гольдштейн, Н. М. Осипенко // Механика твердого тела. – 2011. – №1 – С. 137-153.

54. ГОСТ 9420-79 Автогрейдеры. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 9420-69. – Введ. 01.01.80. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 13 с.

55. ГОСТ 33181-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Требования к уровню зимнего содержания [Текст]. – Введен впервые. – Введ. 01.12.15. – М. : Стандартиформ, 2016. – 9 с.

56. ГОСТ 33387-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Противогололедные материалы [Текст]. – Введен впервые. – Введ. 08.09.16. – М. : Стандартиформ, 2016. – 11 с.

57. ГОСТ Р 50597-2017 Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля [Текст]. – Взамен ГОСТ Р 50597-93. – Введ. 01.06.18. – М. : Стандартиформ, 2017. – 31 с.

58. ГСН 81-05-02-2007 Сборник сметных норм дополнительных затрат при производстве строительно-монтажных работ в зимнее время [Текст]. – Взамен ГСН 81-05-02-2001. – Рекомен. к примен. 28.03.07. – М. : Росстрой, 2007. – 66 с. – (Государственные сметные нормы).

59. Долгушевский, Ф. Г. Общая теория статистики: Учебник / Ф. Г. Долгушевский, В. С. Козлов, П. И. Полушин, Я. М. Эрлих. – М. : Статистика, 1967. – 384 с.

60. Дорожные машины: отраслевой каталог / Министерство строительного, дорожного и коммунального машиностроения СССР; Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по строительному, дорожному и коммунальному машиностроению; Сост. Е. Е. Вислобокова [и др.]. – М. : Изд-во ЦНИИТЭстроймаш, 1987. – 510 с.

61. Доронин, Ю. П. Морской лед / Ю. П. Доронин, Д. Е. Хейсин. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 318 с.

62. Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин: Учеб. пособие / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – М. : Академия, 2009. – 496 с.

63. Евтюков, С. А. Влияние факторов на сцепные качества покрытий автомобильных дорог [Электронный ресурс] / С. А. Евтюков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6099> (дата обращения: 20.08.2021).

64. Единые правила безопасности при взрывных работах [Текст] : ПБ 13-407-01: утв. постановл. Госгортехнадзора России 30.01.01 : ввод. в действие с 01.03.02. – М. : Изд-во НПО ОБТ, 2002. – 190 с.

65. Епифанов, В. П. Акустические методы в механике деформирования и разрушения пресноводного поликристаллического льда : дис. ... д-ра тех. наук: 01.02.04 / Виктор Павлович Епифанов. – М. : Ин-т проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, 2018. – 211 с.

66. Естифеев, А. М. Зачернение поверхности ледяного покрова как метод ускорения весеннего таяния льда / А. М. Естифеев, А. Н. Пехович,

С. М. Алейников // Известия Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидротехники. – Л. : ВНИИГ, 1960. – Т. 65. – С. 139-148.

67. Железнодорожный транспорт : Энциклопедия / Гл. ред. Н. С. Конарев. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1995. – 559 с.

68. Желудкевич, Р. Б. Машины и агрегаты для содержания аэродромов: Учеб. пособие / Р. Б. Желудкевич, В. Н. Подвезенный, Ю. Н. Безбородов, Ю. Ф. Кайзер. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 316 с.

69. Забегалов, Г. В. Бульдозеры, скреперы, грейдеры / Г. В. Забегалов, Э. Г. Ронинсон. – М. : Высш. шк., 1991. – 334 с.

70. Загрядский, И. В. Методы разрушения ледяного покрова при создании и длительном поддержании майн в морских замерзающих портах / И. В. Загрядский, Ю. Д. Кравчук // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Л. : Энергия, 1973. – вып. 81. – С. 62-64.

71. Иванов, Л. В. Зимняя эксплуатация объектов водного транспорта / Л. В. Иванов. – М. : Транспорт, 1978. – 211 с.

72. Иванов, Л. В. Искусственный обогрев акваторий / Л. В. Иванов // Судостроение. – 1969. – № 5. – С. 55-59.

73. Инженерная гляциология / Под ред. Г. К. Тушинского. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1971. – 208 с.

74. Инструкция по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы на железных дорогах, в других филиалах и структурных подразделениях ОАО «РЖД», а также его дочерних и зависимых обществах [Текст]: утв. распоряж. ОАО «РЖД» 22.10.13. – М. : Открытое акционерное общество «Российские железные дороги», 2013. – 158 с.

75. Инструкция по снегоборьбе на железных дорогах Российской Федерации [Текст]: утв. МПС РФ 25.04.00. – М. : Транспорт, 2000. – 95 с.

76. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути [Текст]: утв. распоряж. ОАО «РЖД» 14.11.16. – М. : Открытое акционерное общество «Российские железные дороги», 2016. – 286 с.

77. Ишлинский, А. Ю. Математическая теория пластичности / А. Ю. Ишлинский, Д. Д. Ивлев. – М. : Физматлит, 2003. – 701 с.
78. Карапетьянц, М. Х. Общая и неорганическая химия: Учеб. пособие / М. Х. Карапетьянц, С. И. Дракин. – М. : Химия, 1981. – 632 с.
79. Кириленко, А. Л. Кинематические расчёты приводов машин: методические указания для самостоятельной подготовки студентов к выполнению курсового проекта / А. Л. Кириленко, А. Б. Коновалов, М. В. Авакумов. – СПб. : СПбГТУРП, 2011. – 29 с.
80. Климентова, А. Ю. В России ужесточают требования к содержанию дорог [Электронный ресурс] / А. Ю. Климентова. – Режим доступа: <https://roszimdor.ru/press-tsentr/publikacii-ehkspertov/v-rossii-uzhestochayut-trebovaniya-k-soderzhaniyu-dorog/> (дата обращения: 20.08.2021).
81. Ковалев, С. М. Механические свойства морского льда / С. М. Ковалев, Г. А. Лебедев, О. А. Недошивин, К. К. Сухоруков. – СПб. : Гидрометеиздат, 2001. – 76 с.
82. Козин, В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова : автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 01.02.04 / Виктор Михайлович Козин. – Владивосток : Ин-т машиноведения и металлургии, 1993. – 44 с.
83. Козин, В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты / В. М. Козин. – М. : Акад. Естествознания, 2007. – 355 с.
84. Козловская, Р. Т. Исследование эффективности импульсного разрушения льда / Р. Т. Козловская, А. В. Панюшкин // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Л. : Энергия, 1976. – вып. 11. – С. 170-175.
85. Колосов, А. П. Изменение прочностных свойств пресноводного льда физико-химическим методом / А. П. Колосов, А. В. Панюшкин // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Л. : Энергия, 1976. – вып. 11. – С. 199-204.
86. Комаров, С. М. Ледяные узоры высокого давления / С. М. Комаров // Химия и жизнь. – 2007. – № 2. – С. 48-51

87. Коновалов, И. М. Электротепловая резка льда. – М. : Наркомречфлот, 1946. – 284 с.
88. Кореньков, В. А. Опыт использования ледорезно-фрезерных машин для предупреждения ледообразования / В. А. Кореньков, Г. А. Морозов, А. Ф. Николаев, А. И. Шкода // Гидротехническое строительство. – 1975. – № 2. – С. 42-45.
89. Коржавин, К. Н. Влияние угла наклона ледорезной грани опоры моста на величину давления льда / К. Н. Коржавин // Труды Транспортно-энергетического института Западно-Сибирского филиала АН СССР. – Новосибирск : ТЭИ ЗСФ АН СССР, 1955. – вып. V.
90. Коржавин, К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения / К. Н. Коржавин. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения АН СССР, 1962. – 205 с.
91. Коржавин, К. Н. Воздействие льда на опоры мостов и гидротехнических сооружений / К. Н. Коржавин // Труды Транспортно-энергетического института Западно-Сибирского филиала АН СССР. – Новосибирск : ТЭИ ЗСФ АН СССР, 1955. – вып. V.
92. Котляков, В. М. Гляциологический словарь / В. М. Котляков [и др.]; под ред. В. М. Котлякова. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 527 с.
93. Краткий справочник физико-химических величин / [сост. Н. М. Барон, А. М. Пономарева, А. А. Равдель, З. Н. Тимофеева] ; под ред. А. А. Равделя, А. М. Пономаревой. – СПб. : Специальная литература, 1999. – 232 с.
94. Крылов, А. Н. О расчете балок, лежащих на упругом основании / А. Н. Курылов. – Л. : Изд-во АН СССР, 1930. – 127 с.
95. Кудряшов, Б. Б. Анализ и пути совершенствования процесса бурения-протаивания во льдах Антарктиды / Б. Б. Кудряшов, В. Ф. Фисенко // Труды Советской антарктической экспедиции. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – Т. 60. – С. 129-143.
96. Кузнецов, А. В. Анализ способов определения прочностных характеристик льда естественного залегания / А. В. Кузнецов, Л. А. Сладкова //

Материалы XX Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». – М.: МГАВТ, 2016. – С. 168-169.

97. Кузнецов, А. В. К вопросу проведения тягового расчета для плужно-щеточных машин, дополнительно оснащенных уборочным оборудованием ударного действия / А. В. Кузнецов, Л. А. Сладкова // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 2. – С. 34-36.

98. Кузнецов, А. В. Конструкционные особенности устройства ударного действия, предназначенного для борьбы с зимней скользкостью / А. В. Кузнецов, Л. А. Сладкова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 260-267.

99. Кузнецов, А. В. Способ повышения сцепных качеств покрытий автомобильных дорог и пешеходных пространств в зимний период / А. В. Кузнецов, Л. А. Сладкова // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. – № 3. – С. 43-47.

100. Кузнецов, В. В. Физическая и коллоидная химия: Учебник / В. В. Кузнецов. – М.: Высш. школа, 1968. – 390 с.

101. Куляшов, А. П. Зимнее содержание дорог / А. П. Куляшов, Ю. И. Молев, В. А. Шапкин. – Н. Новгород: НГТУ, 2012. – 369 с.

102. Куляшов, А. П. Современные методы разрушения льда / А. П. Куляшов [и др.]. – М.: Спутник, 2005. – 134 с.

103. Курдюмов, В. А., Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед / В. А. Курдюмов, Д. Е. Хейсин // Прикладная механика. – 1976. – Т. XII. – № 10. – С. 103-109.

104. Левин, И. Противообледенительный импульс / И. Левин // Изобретатель и рационализатор. – 1971. – № 2. – С. 7-8.

105. Левицкий, В. М. Средства для разрушения льда / В. М. Левицкий // Передовой опыт и новая техника. – 1979. – вып. 4. – С. 57-69.



106. Лезин Д. Л. Ледокольные приставки / Д. Л. Лезин // Труды Новосибирского института инженеров водного транспорта. – 1977. – вып. 126. – С. 3-15.

107. Ли Лян Ледовая нагрузка на гидротехнические сооружения с наклонной призмой : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.07 / Ли Лян. – СПб. : Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т, 2014. – 136 с.

108. Ли Лян Предельная несущая способность ледяных балок / Ли Лян, К. Н. Шхинек // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 1. – С. 65-74.

109. Лобанов, В. А. Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой / В. А. Лобанов // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2008. – № 4. – С. 19-29.

110. Маэно, Н. Наука о льде / Н. Маэно; Пер. с яп. А. И. Леонова; под ред. В. Ф. Петренко. – М. : Мир, 1988. – 229 с.

111. Методические рекомендации для органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации по организации и подготовки к паводкоопасному периоду [Текст]: утв. МЧС России 04.12.14. – М. : Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2014. – 54 с.

112. Моисеев, В. И. Модель взаимодействия слоя гололеда с асфальторезиновым дорожным покрытием [Электронный ресурс] / В. И. Моисеев, Козинов Г. Л., Старостин Г. И. // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=5938> (дата обращения: 20.08.2021).

113. Молев, Ю. И. Обеспечение дорожной безопасности автомобильного транспорта в зимний период : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.10 / Юрий Игоревич Молев. – Владимир : Владимир. гос. ун-т, 2007. – 30 с.

114. Морев, В. А. Об эффективности и экономичности электротермобуровых снарядов при бурении материкового льда / В. А. Морев // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. – Л. : Гидрометеоиздат, 1972. – Т. 255. – С. 158-165.

115. Морев, В. А. Экспериментальное бурение ледникового покрова / В. А. Морев, В. А. Шамонтьев // Информационный бюллетень Советской антарктической экспедиции. – 1970. – № 78. – С. 102-104.

116. Морев, В. А. Электротермобуры для бурения скважин в ледниковом покрове / В. А. Морев // Материалы гляциологических исследований. – М. : Изд-во Ин-та географии АН СССР, 1976. – вып. 28. – С. 118-120.

117. Наместников, В. Д. Механизация околки судов и караванов / В. Д. Наместников, Н. П. Моизырев, Л. Я. Чураков // Труды Новосибирского института инженеров водного транспорта. – 1976. – вып. 119. – С. 35-39.

118. Никифорович, А. К. Влияние физико-механических свойств дорожного покрытия на коэффициент сцепления с колесом / А. К. Никифорович, В. А. Понуровский / Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 8-2. – С. 321-324.

119. Николаев, А. Ф. Новые ледорезные машины / А. Ф. Николаев, А. О. Ваганов, Ю. Б. Галкин, А. П. Куляшов // Речной транспорт. – 1974. – № 12. – С. 50-51.

120. Николаев, А. Ф. Плавучие ледорезные машины / А. Ф. Николаев, А. А. Назаровский // НТО СССР. – 1969. – № 7. – С. 16.

121. ОДМ 218.3.090-2017 Методические рекомендации по оценке экономической эффективности, технологии и качества работ при содержании автомобильных дорог общего пользования с асфальтобетонным покрытием под уплотненным снежным покровом с учетом условий эксплуатации [Текст]. – Разраб. впервые. – Введ. 24.04.17. – М. : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2017. – 93 с. – (Отраслевой дорожный методический документ).

122. ОДМ 218.5.001-2008 Методические рекомендации по защите и очистке автомобильных дорог от снега [Текст]. – Взамен ВСН 4-69. – Рекомен. к исползн. с 01.03.08. – М. : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2008. – 84 с.

123. ОДН 218.2.027-2003 Требования к противогололедным материалам [Текст]. – Введен впервые. – Введ. 16.03.03. – М. : Росавтодор Минтранса РФ, 2003. – 9 с. – (Отраслевые дорожные нормы).

124. Организация работ по безопасному пропуску весеннего половодья [Текст]. – Челябинск : Управление гражданской защиты ГУ МЧС России по Челябинской области, 2013. – 50 с.

125. Орлов, Ю. Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование процессов динамического нагружения поликристаллического льда / Ю. Н. Орлов, М. Ю. Орлов // Проблемы Арктики Антарктики. – 2016. – № 1. – С. 28-38.

126. Отраслевой дорожный методический документ. Руководство по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах [Текст]. Взамен ВСН 20-87. – Введ. 16.03.03. – М. : Росавтодор Минтранса РФ, 2003. – 59 с.

127. Павлов, В. В. Защитим железнодорожный путь от снега / В. В. Павлов. – М. : Трансжелдориздат, 1933. – 12 с.

128. Павловская, С. С. Обзору существующих средств оценки состояния дорожного покрытия после применения реагентов и способов борьбы с зимней скользкостью / С. С. Павловская // Материалы III Международной научной конференции «Актуальные вопросы технических наук». – Пермь : Меркурий, 2015. – С. 125-127.

129. Палыгина, А. В. Резонансный метод разрушения ледяного покрова / А. В. Палыгина // Физика в школе. – 2009. – № 7. – С. 48-50.

130. Панов, В. В. Обледенение судов : монография / В. В. Панов // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – Т. 334. – 264 с.

131. Паспорт Оборудование уборочное дорожное универсальное УМДУ-80/82 [Текст]. – М. : ООО ПКФ Беловеж, 2011. – 9 с.

132. Пат. 2100524 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> E01 H 5/12. Устройство для скалывания льда и уплотненного снега / Погорельский С. В. ; заявитель и патентообладатель Погорельский С. В. – № 5018185/28 ; заявл. 26.12.91 ; опубл. 27.12.97. – 6 с. : ил.

133. Пат. 2195527 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> E 01 H5/12. Способ скалывания льда и уплотненного снега и устройство для его осуществления / Кромский Е. И., Агальцов А. И., Никитенков В. В. ; заявители и патентообладатели

Кромский Е. И., Агальцов А. И., Никитенков В. В. – № 2001119712/28 ; завл. 16.07.01 ; опубл. 27.12.02. – 8 с. : ил.

134. Пат. 2413815 Российская Федерация, МПК Е 01 Н5/12. Устройство для работы со льдом, уплотненным снегом и/или почвой / Погорельский С. В., Радченко Е. С., Денисова Ю. С. ; заявители и патентообладатели Погорельский С. В., Радченко Е. С., Денисова Ю. С. – № 2007128590/11 ; заявл. 26.07.07 ; опубл. 10.03.11, Бюл. № 7. – 15 с. : ил.

135. Пат. 2446247 Российская Федерация, МПК МПК Е 01 Н5/12. Очиститель гололеда / Семенов В. И., Рудакова В. В. ; заявители и патентообладатели Семенов В. И., Рудакова В. В. – № 2010106984/13 ; заявл. 24.02.10 ; опубл. 27.03.12, Бюл. № 9. – 5 с. : ил.

136. Пат. на полезную модель 72237 Российская Федерация, МПК Е 01 Н5/12. Устройство для очистки дорог ото льда и снега / Боровских А. М., Булдаков С. И., Силуков Ю. Д. ; патентообладатель Уральский гос. лесотехнический ун-т. – № 2007143851/22 ; заявл. 26.11.07 ; опубл. 10.04.08. – 7 с. : ил.

137. Паундер, Э. Физика льда / Э. Паундер; Пер. с англ. Г. Г. Шинкар; под ред. Б. А. Савельева. – М. : Мир, 1967. – 190 с.

138. Песчанский, И. С. Ледоведение и ледотехника / И. С. Песчанский. – Л. : Гидрометеиздат, 1967. – 459 с.

139. Петров, И. Г. Использование тепла глубинных вод для создания незамерзающих акваторий / И. Г. Петров // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. – Л. : Гидрометеиздат, 1964. – Т. 267. – С. 81-88.

140. Петров, И. Г. Применение пара для образования майн в ледяном покрове/ И. Г. Петров // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. – Л. : Гидрометеиздат, 1964. – Т. 267. – С. 100-104.

141. Плотность льда и снега, теплопроводность, теплоемкость льда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/plotnost-lda-i-snega-teploprovodnost-teploemkost-lda> (дата обращения: 20.08.2021).

142. Полевой, В. В. Физиология растений: Учебник / В. В. Полевой. – М. : Высш. шк., 1989. – 464 с.

143. Политько, В. А. Ледовые нагрузки на морские гидротехнические сооружения: Учеб. пособие / В. А. Политько, И. Г. Кантаржи, К. П. Мордвинцев. – М. : Изд-во Моск. гос. строит. ун-та, 2016. – 88 с.

144. Полосин, М. Д. Техническое обслуживание и ремонт дорожно-строительных машин: Учеб. пособие / М. Д. Полосин, Э. Г. Ронинсон. – М. : Академия, 2005. – 352 с.

145. Пуртов, А. Р. Выбор конструктивных параметров рабочего органа для удаления снежных накатов и льда с бетонных покрытий : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Андрей Робертович Пуртов. – Н. Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т, 2002. – 236 с.

146. Распоряжение № 05-14-650/1 Об утверждении Технологии зимней уборки проезжей части магистралей, улиц, проездов и площадей (объектов дорожного хозяйства г. Москвы) с применением противогололедных реагентов и гранитного щебня фракции 2-5 мм (на зимние периоды с 2010-2011 гг. и далее) [Текст]: утв. Департаментом жилищно-коммунального хозяйства и благоустройства города Москвы 28.09.11. – М. : ДЖКХиБ, 2011. – 50 с.

147. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2008612100 Российская Федерация. Программа моделирования процесса деформации льда / Сладкова Л. А., Мужжухин Д. Б. ; правообладатели Мужжухин Д. Б., Сладкова Л. А. – № 2008610980 ; поступ. 13.03.08 ; зарег. 28.04.08. – 1 с.

148. Сладкова, Л. А. Анализ способов борьбы с льдообразованием / Л. А. Сладкова, А. Н. Неклюдов, А. Н. Кузнецов // Мир транспорта. – 2019. – Том 17. – № 1. – С. 180-191.

149. Сладкова, Л. А. Инженерные решения борьбы с льдообразованиями / Л. А. Сладкова, А. В. Кузнецов // сборник статей XIV Междунар. науч.- практич. конф. «Инновационные научные исследования: теория, методология, практика». – Пенза : МЦНС «Наука и просвещение», 2018. – С. 72-76.

150. Сладкова, Л. А. Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин: Учеб. пособие / Л. А. Сладкова. – М. : МГУПС (МИИТ), 2016. – 275 с.

151. Сладкова, Л. А. Лед как объект разрушения и способы его разрушения / Л. А. Сладкова, А. В. Кузнецов // Гуманитарный вестник ВА РВСН. – 2016. – № 4. – С. 157-164.

152. Сладкова, Л. А. Моделирование процессов разрушения льда / Л. А. Сладкова, А. В. Кузнецов // Гуманитарный вестник ВА РВСН. – 2017. – № 1. – С. 168-174.

153. Сладкова Л. А. Моделирование физического состояния льда / Л. А. Сладкова, А. В. Чемусов, А. В. Кузнецов // Материалы XXXVI Всеросс. конф., посвященной памяти референта МСНТ Н. Н. Ершовой. – Т. 2. – М. : Изд-во РАН, 2016. – С. 53-62.

154. Сладкова, Л. А. Устройство для борьбы с гололедицей / Л. А. Сладкова, А. В. Кузнецов // Механизация строительства. – 2017. – Т. 78, № 5. – С. 52-56.

155. Соколов, А. М. Повышение эффективности эксплуатации снегоуборочной техники с учетом слоистости снежного покрова : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Анатолий Михайлович Соколов. – Н. Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т, 2007. – 19 с.

156. Соломатин, В. И. Геокриология: подземные льды: Учеб. пособие / В. И. Соломатин. – М. : Изд-во Юрайт, 2018. – 411 с.

157. Спецов, Ф. А. Ослабление льда в весенний период зачернением его поверхности / Ф. А. Спецов // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Л. : Энергия, 1965. – вып. 17. – С. 225-235.

158. Строганова, О. С. Моделирование механизмов взаимодействия конструкций и сред со сложной реологией : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.04 / Ольга Сергеевна Строганова. – СПб. : Санкт-Петербургский гос. морской техн. ун-т, 2015. – 153 с.

159. Теплопроводность, теплоемкость и плотность льда в зависимости от температуры от 0 до  $-100^{\circ}\text{C}$  при атмосферном давлении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatConductivity/IceThermalProperties/> (дата обращения: 20.08.2021).

160. Трунов, О. К. Обледенение самолетов и средства борьбы с ним / О. К. Трунов. – М. : Машиностроение, 1965. – 247 с.

161. Тышко, К.П. Кристаллическое строение морского ледяного покрова / К. П. Тышко, Н. В. Черепанов, В. И. Федотов. – СПб. : Гидрометеиздат, 2000. – 67 с.

162. Указания по изысканию и проектированию защитных лесонасаждений вдоль линий железных дорог СССР [Текст]: утв. 13.10.1972 / М-во путей сообщ. СССР. Гл. упр. пути. – М. : Транспорт, 1974. – 113 с.

163. Файко, Л. И. Новый способ искусственного уменьшения механической прочности и теплопроводности ледяного покрова водоемов / Л. И. Файко // Материалы гляциологических исследований. Хроника, обсуждения. – М. : Изд-во Ин-та географии АН СССР, 1973. – вып. 21. – С. 151-163.

164. Фокеев, В. Разрушение льда для целей судоходства / В. Фокеев // Речной транспорт. – 1969. – № 4. – С. 45-46.

165. Хархута, Н.Я. Дорожные машины. Теория, конструкция и расчет: Учебник / Н. Я. Хархута, М. И. Капустин, В. П. Семенов, И. М. Эвентов. – Л. : Машиностроение, 1976. – 472 с.

166. Хейсин, Д. Е. Определение удельной энергии разрушения и контактных давлений при ударе твердого тела о лед / Д. Е. Хейсин, В. А. Лихоманов, В. А. Курдюмов // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – Т. 326. – С. 210-218.

167. Хименков, А. Н. Введение в структурную криологию / А. Н. Хименков, А. В. Брушков. – М. : Наука, 2006. – 278 с.

168. Цыкин, Е. Н. Метод разрушения льда «крупным сколом» и его место в системе противозаторных мероприятий / Е. Н. Цыкин // Материалы

гляциологических исследований. – М. : Изд-во Ин-та географии АН СССР, 1970. – вып. 17. – С. 309-316.

169. Цыкин, Е. Н. Применение ледовых стругов для предотвращения ледовых заторов / Е. Н. Цыкин // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. – 1970. – № 3. – С. 61-66.

170. Цыкин, Е. Н. Результаты лабораторных экспериментов по искусственному усилению таяния льда методом зачернения / Е. Н. Цыкин, Г. А. Цыкина // Материалы гляциологических исследований. – М. : Изд-во Ин-та географии АН СССР, 1968. – вып. 14. – С. 167-179.

171. Цыкина, Г. А. Искусственное усиление таяния ледяного покрова водоемов / Г. А. Цыкина // Материалы гляциологических исследований. – М. : Изд-во Ин-та географии АН СССР, 1971. – вып. 18. – С. 68-72.

172. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М. : Наука, 1974. – 640 с.

173. Швайштейн, З. И. Резание льда непрерывными струями высокого давления / З. И. Швайштейн // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – Т. 300. – С. 168-176.

174. Шемякин, С. А. Расчет землеройно-транспортных машин: Учеб. пособие / С. А. Шемякин, А. В. Лещинский. – Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2014. – 75 с.

175. Шестопалов, К. К. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование: Учебник / К. К. Шестопалов. – М. : Академия, 2019. – 320 с.

176. Эйзенберг, Д. Структура и свойство воды / Д. Эйзенберг; Пер. с англ. А. К. Шемелина; под ред. В. В. Богородского. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 281 с.

177. ANSYS Theory Reference [Text]. – Canonsburg : ANSYS Inc, 2012. – 1546 p.



178. Boyle, R. W. Velocity of longitudinal vibration in solid rods (ultrasonic method) with special reference to the elasticity of ice / R. W. Boyle, D. O. Sproule // Canadian Journal of Research. – 1931. – Vol. 5, No. 6. – pp. 601-618.
179. Clark, A. F. Ability of CO<sub>2</sub> laser to assist ice breakers / A. F. Clark, J. C. Moulder, R. P. Reed // Applied Optics. – 1973. – Vol. 12, No. 6. – pp. 1103-1104.
180. Crosby, L. Ice engineering research at CRREL / L. Crosby // Arctic Bulletin. – 1977. – Vol. 2, No. 10. – pp. 177-181.
181. Daley, C. G. Conceptual Framework for an Ice Load Model / C. G. Daley, K. Riska. – Calgary : National Energy Board, 1995. – 41 p.
182. Daley, C. G. Ice Edge Contact – A Brittle Failure Process Model / C. G. Daley // Acta Polytechnica Scandinavica. Mechanical Engineering Series. – Helsinki : Finnish Academy of Technology, 1991. – 92 p.
183. Daley, C. G. Ice Edge Contact – An Iterative Failure Process Model / C. G. Daley // Report No. M-103 by the Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering. – Espoo : Helsinki University of Technology, 1990 – 65 p.
184. Falenty, A. Formation and properties of ice XVI obtained by emptying a type sll clathrate hydrate / A. Falenty, T. C. Hansen, W. F. Kuhs // Nature. – 2014. – Vol. 516, No. 7530. – pp. 231-233.
185. Fish, A. M. Creep and yield model of ice under combined stress. Special Report 91-31 / A. M. Fish. – USA : CRREL, 1991. – 15 p.
186. Fish, A. M. Kortetic nature of the long-term strength of frozen soils / A. M. Fish // Proceedings 2-nd International Symposium on Ground Freezing, 24-26 June 1980. – Trondheim : Norwegian Institute of Technology, 1980. – pp. 95-108.
187. Fish, A. M. Thermodynamic model of creep at constant stress and constant strain rate / A. M. Fish // Cold Regions Science and Technology. – 1984. – № 9. – pp. 143-161.
188. Fransson, L. Ice handbook for engineers / L. Fransson. – Luleå : Luleå University of Technology, 2009. – 32 p.
189. Joensuu, A. Jään ja Rakenteen Välinen Kosketus / A. Joensuu, K. Riska. – Otaniemi : Helsinki Teknillinen korkeakoulu, 1988. – 211 p.

190. Kärnä, T. Finite ice failure depth in penetration of a vertical indenter into an ice edge / T. Kärnä // *Annals of Glaciology*. – 1994. – Vol. 19. – pp. 114-120.
191. Kolari, K. Ice failure simulation – softening material model / K. Kolari, R. Kouhia, T. Kärnä // *Proceedings of the 16-th IAHR International Symposium on Ice «Ice in the Environment»*. – Dunedin : International Association of Hydraulic Engineering and Research, 2002. – pp. 154-159.
192. Kolari, K. Ice Failure Analysis using Strain-softening Viscoplastic Material Model [Electronic resource] / K. Kolari, R. Kouhia, T. Kärnä. – Acces mode: <http://www.mit.jyu.fi/eccomas2004/proceedings/pdf/319.pdf> (date of appeal: 20.08.2021).
193. Kujala, P. A Ship in compressive ice, analysis of the ice failure process / P. Kujala, P. Varsta, R. Goldstein, R. Osipenko [and others] // *The Hamburg Ship Model Basin* – 1993. – pp. 810-823.
194. Kujala, P. Modelling of the ice-edge failure process with curved failure surfaces / P. Kujala // *Annals of Glaciology*. – Vol. 19. – pp. 158-164.
195. Lainey, L. The importance of transverse anisotropy for the bearing capacity of ice covers / L. Lainey, R. Tinawi // *Proceedings of port., and ocean eng. under Arctic cond. Conference*. – Helsinki, 1983. – pp. 119-127.
196. Lane, J. Deicing using laser / J. Lane, S. Marshall // *Meteorological and Geostrophysical Abstracts*. – 1977. – No. 8. – p. 1483.
197. Matlock, H. A model for the prediction of ice-structure interaction / H. Matlock, W. P. Dawkins, J. J. Panak // *Proceedings first Offshore Technology Conference*. – Vol. I. – Houston : OTC, 1969. – pp. 687-694.
198. Matlock, H. Analytical model for ice-structure interaction / H. Matlock, W. P. Dawkins, J. J. Panak // *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*. – 1971. – Vol. 97, No. 4. – pp. 1083-1092.
199. Mellor, M. Cutting ice with continuous jets / M. Mellor // *Proceedings of Second International Symposium on Jet Cutting Technology*. – Granfield : BHRA Fluid Engineering center, 1974.
200. Palmer, A. Arctic offshore engineering / A. Palmer, K. Croasdale. – Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2013. – pp. 357.

201. Paterson, W. S. B. Thermal core drilling in ice caps in Arctic Canada / W. S. B. Paterson // Proceedings Conference University of Nebraska in 1976. – Lincoln : University of Nebraska Press, 1976. – pp. 113-116.

202. Peyton, H. R. Sea ice strength / H. R. Peyton. – Fairbanks : Geophysical Institute, University of Alaska, 1966. – 276 p.

203. Riska, K. Failure process of ice edge caused by impact with ships side / K. Riska, P. Varsta // Proceedings Symposium in connection with 100 years Celebration of Finnish winter navigation. – Helsinki : Board of Navigation, 1979. – pp. 235-262.

204. Riska, K. Ice load penetration modelling / K. Riska, R. Frederking // Proceedings of the Ninth Port and Ocean Engineering Under Arctic Condition Conference (POAC-87). – Fairbanks : Geophysical Institute, University of Alaska, 1987. – Vol. I. – pp. 317-327.

205. Salzmann, C. G. Ice XV: a new thermodynamically stable phase of ice [Electronic resource] / C. G. Salzmann, Radaelli P. G., E. Mayer, J. L. Finney – Acces mode: [http://www.arxiv.org/PS\\_cache/arxiv/pdf/0906/0906.2489v1.pdf](http://www.arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0906/0906.2489v1.pdf) (date of appeal: 20.08.2021).

206. Schulson, E. M. The structure and mechanical behavior of ice / E. M. Schulson // Journal of the Minerals Metals and Materials Society (JOM). – 1999. – Vol. 51, No. 2. – pp. 21-27.

207. Tabata, T. Studies of the mechanical properties of sea ice / T. Tabata // Contr. Inst. Low Temperature Sci. –1960. – No. 119. – pp. 187-201.

208. Timco, G. W. Indentation and Penetration of Edge-Loaded Freshwater Ice Sheets in the Brittle Range / G. W. Timco // Proceedings Fifth Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE). – New York : American Society of Mechanical Engineers, 1986. – Vol. 4. – pp. 444-452.

209. Varsta, P. On the mechanics of ice load on ships in level ice in the Baltic Sea / P. Varsta. – Espoo : Technical Research Centre of Finland, 1983. – 91 p.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А****Справка об ошибочном напечатании отчества автора публикации «Анализ способов борьбы с льдообразованием»**

По месту требования

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**РОССИЙСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА  
РУТ (МИИТ)**

ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, ГСП-4, 127994  
Тел./факс: (495) 681-13-40, e-mail: info@rut-miit.ru  
ИНН/КПП 7715027733/771501001  
ОГРН 1027739733922

25.10.2019 № 014/13306

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Настоящим подтверждаем, что одним из авторов статьи «Анализ способов борьбы с льдообразованием», опубликованной в журнале «Мир транспорта» № 1 (2019 год) на страницах 180-191, является Кузнецов Андрей Владимирович. Отчество «Николаевич» было напечатано ошибочно.

Руководитель редакции  
журнала «Мир транспорта»

**ЖУРНАЛ МИР  
ТРАНСПОРТА**

Шелихова Э. К.

Олейник Н. К. (495) 684-2877

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «ИМЭДЖИН ЛАБ»

## Общество с ограниченной ответственностью

### «ИМЭДЖИН ЛАБ»

ОГРН: 1145031005008 ИНН 5031113540 КПП 503101001

142400, Московская обл., Ногинский р-н, г. Ногинск, Рабочая, д.46А офис 15

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель генерального директора  
ООО «ИМЭДЖИН ЛАБ»  
И.Р. Шамсутдинов  
«10» февраля 2020 г.



#### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
Кузнецова Андрея Владимировича на тему  
«Интенсификация механических способов разрушения льда в борьбе с зимней  
скользкостью на покрытиях проезжих частей и пешеходных пространствах»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы А.В. Кузнецова были использованы ООО «ИМЭДЖИН ЛАБ» и послужили основой для компьютерного моделирования при планировании мероприятий, направленных на снижение негативных последствий от образования зимней скользкости, а именно для регулирования основных параметров базового уборочного оборудования плужно-щеточных машин и предложенного А.В. Кузнецовым дополнительного устройства ударного действия.

Разработанные А.В. Кузнецовым модели разрушения льда воздействием ударного типа на дорожном покрытии и методика для определения значения энергоемкости разрушения льда ударными рабочими органами различных форм были использованы при прогнозировании условий, исключающих повреждение очищаемых покрытий.

Достоинством разработок является возможность их применения для значительного повышения сцепных качеств покрытий проезжих частей и пешеходных пространств, вне зависимости от толщины и прочности расположенных на них слоев зимней скользкости.

Председатель комиссии  
Генеральный директор

Д.А. Рябов

Члены комиссии  
Заместитель генерального директора  
Главный инженер

И.Р. Шамсутдинов

В.А. Сазонова

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Основная функция программы для оценки параметров имитационной модели  
НДС льда

```

Y(Q, h1, h2, c1, c2, H, H1, E) :=
  I ←  $\frac{b \cdot H_1^3}{12}$ 
  k(x) ←  $\text{sign} \left( \cos \left( \frac{2\pi x}{h_1 + h_2} \right) + \cos \left( \frac{\pi h_1}{h_1 + h_2} \right) \right) \cdot \frac{c_1 - c_2}{2H} + \frac{c_1 + c_2}{2H}$ 
  D(x, y) ←  $\begin{bmatrix} y_1 & y_2 & (E \cdot I)^{-1} y_3 & -k(x) \cdot y_0 \end{bmatrix}^T$ 
  Sx ← for ni ∈ 0.. iter - 1
        for nj ∈ 0.. itlen
          Sxnj, ni ← xni-itlen+nj
  z0 ← (1 0 0 0)
  z1 ← (0 0 1 0)
  z2 ← (0 0 0 P)
  for ni ∈ 0.. iter - 1
    for ii ∈ 0.. 2
      Sii, ni ← rdkfixed(ziiT, Sx0, ni, Sxitlen, ni, itlen, D)
      yii ← submatrix(Sii, ni, itlen, itlen, 1, 4)
      ω11 ←  $\sqrt{y_0 \cdot y_0^T}$ 
      z0 ← ω11-1 · y0
      ω12 ← z0 · y1T
      ω22 ←  $\sqrt{y_1 \cdot y_1^T - \omega_{12}^2}$ 
      z1 ← ω22-1 · (y1 - z0 · ω12)
      ω10 ← z0 · y2T
      ω20 ← z1 · y2T
      z2 ← y2 - z0 · ω10 - z1 · ω20
      Ωni ←  $\begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{10} \\ 0 & \omega_{22} & \omega_{20} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 
      AA ←  $\begin{bmatrix} (y_0)_{0,2} & (y_1)_{0,2} \\ (y_0)_{0,3} & (y_1)_{0,3} \end{bmatrix}$ 
      BB ←  $\begin{bmatrix} (y_2)_{0,2} & (y_2)_{0,3} \end{bmatrix}^T$ 
      CC ← -(AA-1 · BB)
      CC2 ← 1
    for ni ∈ iter - 1.. 0
      YYni ← S0, ni · CC0 + S1, ni · CC1 + S2, ni
      CC ← (Ωni-1)-1 · CC if ni > 0
    for ni ∈ 0.. iter - 1
      for nx ∈ 0.. itlen
        for ny ∈ 1.. 4
          Ynx+ni-itlen, ny-1 ← (YYni)nx, ny

```

### Построение матрицы планирования

$$M := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 0..N-1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} T \leftarrow j \\ \text{for } i \in p-1..0 \\ \quad \left| \begin{array}{l} z_{j,i} \leftarrow 0 \\ \text{if } T > 2^i \\ \quad \left| \begin{array}{l} T \leftarrow T - 2^i \\ z_{j,i} \leftarrow 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \\ z \end{array} \right.$$

### Цикл получения результатов

$$\text{Res} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..N-1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} R_{i,0} \leftarrow xX1 M_{i,0} \\ R_{i,1} \leftarrow xX2 M_{i,1} \\ R_{i,2} \leftarrow xX3 M_{i,2} \\ R_{i,3} \leftarrow xX4 M_{i,3} \\ R_{i,4} \leftarrow xX5 M_{i,4} \\ R_{i,5} \leftarrow xX6 M_{i,5} \\ R_{i,6} \leftarrow E \\ R_{i,7} \leftarrow \left( Y(R_{i,0}, R_{i,1}, R_{i,2}, R_{i,3}, R_{i,4}, R_{i,5}, R_{i,6})^{(0)} \right)_0 \end{array} \right. \\ R \end{array} \right.$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Журнал наблюдений

Температура воздуха 0 °С

Дата проведения эксперимента: 11 февраля 2016 года

Время проведения эксперимента: начало 11-00, окончание 13-00

Температура поверхности льда: минус 1 °С

**Таблица В 3.1.1 – Результаты измерений объёмов зон разрушения льда при температуре воздуха 0 °С**

Номер опыта, <i>k</i>	Номер ударника				
	1	2	3	4	5
	Объём зоны разрушения льда, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$				
1	215	146	196	241	240
2	210	143	193	244	242
3	219	142	197	240	244

Температура воздуха минус 3 °С

Дата проведения эксперимента: 19 февраля 2016 года

Время проведения эксперимента: начало 11-00, окончание 13-00

Температура поверхности льда: минус 3 °С

**Таблица В 3.1.2 – Результаты измерений объёмов зон разрушения льда при температуре воздуха минус 3 °С**

Номер опыта, <i>k</i>	Номер ударника				
	1	2	3	4	5
	Объём зоны разрушения льда, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$				
1	199	135	190	236	236
2	201	138	189	241	232
3	208	140	187	238	228



Температура воздуха минус 6 °С

Дата проведения эксперимента: 13 января 2016 года

Время проведения эксперимента: начало 11-00, окончание 13-00

Температура поверхности льда: минус 6,2 °С

**Таблица В 3.1.3 – Результаты измерений объёмов зон разрушения льда при температуре воздуха минус 6 °С**

Номер опыта, <i>k</i>	Номер ударника				
	1	2	3	4	5
	Объём зоны разрушения льда, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$				
1	191	126	181	231	218
2	189	126	182	234	218
3	194	128	181	230	225

Температура воздуха минус 10 °С

Дата проведения эксперимента: 15 января 2016 года

Время проведения эксперимента: начало 11-00, окончание 13-00

Температура поверхности льда: минус 10 °С

**Таблица В 3.1.4 – Результаты измерений объёмов зон разрушения льда при температуре воздуха минус 10 °С**

Номер опыта, <i>k</i>	Номер ударника				
	1	2	3	4	5
	Объём зоны разрушения льда, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$				
1	164	130	168	225	213
2	182	118	172	226	208
3	186	122	170	216	215

Температура воздуха минус 12 °С

Дата проведения эксперимента: 8 января 2016 года

Время проведения эксперимента: начало 11-00, окончание 13-00

Температура поверхности льда: минус 12 °С

**Таблица В 3.1.5 – Результаты измерений объёмов зон разрушения льда при температуре воздуха минус 12 °С**

Номер опыта, <i>k</i>	Номер ударника				
	1	2	3	4	5
	Объём зоны разрушения льда, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$				
1	169	130	162	208	206
2	170	124	162	216	208
3	163	121	168	210	211

Температура воздуха минус 15 °С

Дата проведения эксперимента: 2 января 2016 года

Время проведения эксперимента: начало 11-00, окончание 13-00

Температура поверхности льда: минус 15 °С

**Таблица В 3.1.6 – Результаты измерений объёмов зон разрушения льда при температуре воздуха минус 15 °С**

Номер опыта, <i>k</i>	Номер ударника				
	1	2	3	4	5
	Объём зоны разрушения льда, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$				
1	169	124	151	206	203
2	163	110	156	202	200
3	171	120	153	206	197

**Оценка воспроизводимости эксперимента для профилей, выбранных в  
качестве ударников**

**Таблица В 3.2.1 – Оценка воспроизводимости эксперимента для профиля №1**

Номер опыта, <i>k</i>	Температура воздуха, °С	Крестообразный остроконечный				
		Y	Средняя величина	у-ус	Дисперсия (у-ус) <sup>2</sup>	Критерий Кохрена <i>G<sub>p</sub></i>
1	-15	169		1,33	1,77	
2		163		-4,67	21,81	
3		171		3,33	11,09	
<b>Сумма</b>		<b>503</b>	<b>167,67</b>		<b>34,67</b>	<b>0,629</b>
1	-12	169		1,67	2,79	
2		170		2,67	7,13	
3		163		4,33	18,75	
<b>Сумма</b>		<b>502</b>	<b>167,33</b>		<b>28,67</b>	<b>0,654</b>
1	-10	164		13,33	177,69	
2		182		4,67	21,81	
3		186		8,67	75,17	
<b>Сумма</b>		<b>532</b>	<b>177,33</b>		<b>274,67</b>	<b>0,647</b>
1	-6	191		0,33	0,11	
2		189		2,33	5,43	
3		194		2,67	7,13	
<b>Сумма</b>		<b>574</b>	<b>191,33</b>		<b>12,67</b>	<b>0,563</b>
1	-3	199		3,67	13,47	
2		201		1,67	2,79	
3		208		5,33	28,41	
<b>Сумма</b>		<b>608</b>	<b>202,67</b>		<b>44,67</b>	<b>0,636</b>
1	0	215		0,33	0,11	
2		210		4,67	21,81	
3		219		4,33	18,75	
<b>Сумма</b>		<b>644</b>	<b>214,67</b>		<b>40,67</b>	<b>0,536</b>

Таблица В 3.2.2 – Оценка воспроизводимости эксперимента для профиля №2

Номер опыта, $k$	Температура воздуха, °С	Шестигранная призма				
		Y	Средняя величина	у-ус	Дисперсия (у-ус) <sup>2</sup>	Критерий Кохрена $G_p$
1	-15	124		6,00	36,00	
2		110		-8,00	64,00	
3		120		2,00	4,00	
<b>Сумма</b>		<b>354</b>	<b>118,00</b>		<b>104,00</b>	<b>0,615</b>
1	-12	130		5,00	25,00	
2		124		1,00	1,00	
3		121		4,00	16,00	
<b>Сумма</b>		<b>375</b>	<b>125,00</b>		<b>42,00</b>	<b>0,595</b>
1	-10	130		6,67	44,49	
2		118		5,33	28,41	
3		122		1,33	1,77	
<b>Сумма</b>		<b>370</b>	<b>123,33</b>		<b>74,67</b>	<b>0,596</b>
1	-6	126		0,67	0,45	
2		126		0,67	0,45	
3		128		1,33	1,77	
<b>Сумма</b>		<b>380</b>	<b>126,67</b>		<b>2,67</b>	<b>0,663</b>
1	-3	135		2,67	7,13	
2		138		0,33	0,11	
3		140		2,33	5,43	
<b>Сумма</b>		<b>413</b>	<b>137,67</b>		<b>12,67</b>	<b>0,563</b>
1	0	146		2,33	5,43	
2		143		0,67	0,45	
3		142		1,67	2,79	
<b>Сумма</b>		<b>431</b>	<b>143,67</b>		<b>8,67</b>	<b>0,626</b>

Таблица В 3.2.3 – Оценка воспроизводимости эксперимента для профиля №3

Номер опыта, <i>k</i>	Температура воздуха, °С	Крестообразный тупоконечный				
		Y	Средняя величина	у-ус	Дисперсия (у-ус) <sup>2</sup>	Критерий Кохрена G <sub>p</sub>
1	-15	151		-2,33	5,43	
2		156		2,67	7,13	
3		153		-0,33	0,11	
<b>Сумма</b>		<b>460</b>	<b>153,33</b>		<b>12,67</b>	<b>0,563</b>
1	-12	162		2,00	4,00	
2		162		2,00	4,00	
3		168		4,00	16,00	
<b>Сумма</b>		<b>492</b>	<b>164,00</b>		<b>24,00</b>	<b>0,667</b>
1	-10	168		2,00	4,00	
2		172		2,00	4,00	
3		170		0,00	0,00	
<b>Сумма</b>		<b>510</b>	<b>170,00</b>		<b>8,00</b>	<b>0,5</b>
1	-6	181		0,33	0,11	
2		182		0,67	0,45	
3		181		0,33	0,11	
<b>Сумма</b>		<b>544</b>	<b>181,33</b>		<b>0,67</b>	<b>0,672</b>
1	-3	190		1,33	1,77	
2		189		0,33	0,11	
3		187		1,67	2,79	
<b>Сумма</b>		<b>566</b>	<b>188,67</b>		<b>4,67</b>	<b>0,597</b>
1	0	196		0,67	0,45	
2		193		2,33	5,43	
3		197		1,67	2,79	
<b>Сумма</b>		<b>586</b>	<b>195,33</b>		<b>8,67</b>	<b>0,626</b>

Таблица В 3.2.4 – Оценка воспроизводимости эксперимента для профиля №4

Номер опыта, $k$	Температура воздуха, °С	Клиновидный				
		Y	Средняя величина	y-yc	Дисперсия (y-yc) <sup>2</sup>	Критерий Кохрена $G_p$
1	-15	206		1,33	1,77	
2		202		-2,67	7,13	
3		206		1,33	1,77	
<b>Сумма</b>		<b>614</b>	<b>204,67</b>		<b>10,67</b>	<b>0,668</b>
1	-12	208		3,33	11,09	
2		216		4,67	21,81	
3		210		1,33	1,77	
<b>Сумма</b>		<b>634</b>	<b>211,33</b>		<b>34,67</b>	<b>0,629</b>
1	-10	225		2,67	7,13	
2		226		3,67	13,47	
3		216		6,33	40,07	
<b>Сумма</b>		<b>667</b>	<b>222,33</b>		<b>60,67</b>	<b>0,661</b>
1	-6	231		0,67	0,45	
2		234		2,33	5,43	
3		230		1,67	2,79	
<b>Сумма</b>		<b>695</b>	<b>231,67</b>		<b>8,67</b>	<b>0,626</b>
1	-3	236		2,33	5,43	
2		241		2,67	7,13	
3		238		0,33	0,11	
<b>Сумма</b>		<b>715</b>	<b>238,33</b>		<b>12,67</b>	<b>0,563</b>
1	0	241		0,67	0,45	
2		244		2,33	5,43	
3		240		1,67	2,79	
<b>Сумма</b>		<b>725</b>	<b>241,67</b>		<b>8,67</b>	<b>0,626</b>

Таблица В 3.2.5 – Оценка воспроизводимости эксперимента для профиля №5

Номер опыта, $k$	Температура воздуха, °С	Шар				
		Y	Средняя величина	y-ус	Дисперсия (y-ус) <sup>2</sup>	Критерий Кохрена $G_p$
1	-15	203		3,00	9,00	
2		200		0,00	0,00	
3		197		-3,00	9,00	
<b>Сумма</b>		<b>600</b>	<b>200,00</b>		<b>18,00</b>	<b>0,5</b>
1	-12	206		2,33	5,43	
2		208		0,33	0,11	
3		211		2,67	7,13	
<b>Сумма</b>		<b>625</b>	<b>208,33</b>		<b>12,67</b>	<b>0,563</b>
1	-10	213		1,00	1,00	
2		208		4,00	16,00	
3		215		3,00	9,00	
<b>Сумма</b>		<b>636</b>	<b>212,00</b>		<b>26,00</b>	<b>0,615</b>
1	-6	218		2,33	5,43	
2		218		2,33	5,43	
3		225		4,67	21,81	
<b>Сумма</b>		<b>661</b>	<b>220,33</b>		<b>32,67</b>	<b>0,668</b>
1	-3	236		4,00	16,00	
2		232		0,00	0,00	
3		228		4,00	16,00	
<b>Сумма</b>		<b>696</b>	<b>232,00</b>		<b>32,00</b>	<b>0,5</b>
1	0	240		2,00	4,00	
2		242		0,00	0,00	
3		244		2,00	4,00	
<b>Сумма</b>		<b>726</b>	<b>242,00</b>		<b>8,00</b>	<b>0,5</b>

**Результаты вычислений экспериментальных значений коэффициента трения  $\mu$  в зависимости от угла наклона насечек**

**Таблица В 3.3.1 – Полученные значения коэффициента трения  $\mu$**

Угол насечки	Номер опыта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значения коэффициента трения										
90	0,285	0,282	0,288	0,285	0,290	0,285	0,279	0,285	0,290	0,288
75	0,293	0,296	0,299	0,290	0,293	0,296	0,299	0,296	0,293	0,290
60	0,311	0,314	0,311	0,321	0,308	0,314	0,318	0,305	0,311	0,314
45	0,308	0,327	0,321	0,327	0,324	0,327	0,314	0,321	0,324	0,324
30	0,318	0,321	0,314	0,314	0,311	0,321	0,308	0,314	0,311	0,321
15	0,296	0,290	0,299	0,290	0,296	0,293	0,290	0,288	0,293	0,299
0	0,288	0,282	0,290	0,290	0,293	0,279	0,282	0,285	0,285	0,288
Угол насечки	Номер опыта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Значения коэффициента трения										
90	0,285	0,282	0,288	0,290	0,290	0,285	0,288	0,288	0,285	0,290
75	0,290	0,293	0,296	0,293	0,296	0,296	0,299	0,293	0,296	0,290
60	0,321	0,314	0,308	0,314	0,314	0,321	0,314	0,311	0,318	0,314
45	0,321	0,324	0,314	0,321	0,318	0,324	0,327	0,314	0,318	0,327
30	0,311	0,314	0,308	0,321	0,314	0,311	0,321	0,318	0,318	0,311
15	0,290	0,299	0,293	0,288	0,290	0,290	0,296	0,293	0,299	0,288
0	0,293	0,285	0,282	0,290	0,279	0,288	0,290	0,282	0,293	0,285



## Проверка воспроизводимости опытов по критерию Кохрена

**Таблица В 3.4.1 – Значения необходимые для определения максимальной из оценок дисперсий и суммы оценок дисперсий каждого из опытов**

Номер $i$ -го опыта	1	2	3	4	5	6	7	Накопленная сумма
Значение $\mu$ при $j$ -ом опыте, $y_{ij}$	Угол насечки							
	0	15	30	45	60	75	90	
1	0,285	0,293	0,311	0,308	0,318	0,296	0,288	
2	0,282	0,296	0,314	0,327	0,321	0,290	0,282	
3	0,288	0,299	0,311	0,321	0,314	0,299	0,290	
4	0,285	0,290	0,321	0,327	0,314	0,290	0,290	
5	0,290	0,293	0,308	0,324	0,311	0,296	0,293	
6	0,285	0,296	0,314	0,327	0,321	0,293	0,279	
7	0,279	0,299	0,318	0,314	0,308	0,290	0,282	
8	0,285	0,296	0,305	0,321	0,314	0,288	0,285	
9	0,290	0,293	0,311	0,324	0,311	0,293	0,285	
10	0,288	0,290	0,314	0,324	0,321	0,299	0,288	
11	0,285	0,290	0,321	0,321	0,311	0,290	0,293	
12	0,282	0,293	0,314	0,324	0,314	0,299	0,285	
13	0,288	0,296	0,308	0,314	0,308	0,293	0,282	
14	0,290	0,293	0,314	0,321	0,321	0,288	0,290	
15	0,290	0,296	0,314	0,318	0,314	0,290	0,279	
16	0,285	0,296	0,321	0,324	0,311	0,290	0,288	
17	0,288	0,299	0,314	0,327	0,321	0,296	0,290	
18	0,288	0,293	0,311	0,314	0,318	0,293	0,282	
19	0,285	0,296	0,318	0,318	0,318	0,299	0,293	
20	0,290	0,290	0,314	0,327	0,311	0,288	0,285	
Среднее значение $\bar{y}$	0,2864	0,2943	0,3138	0,3212	0,315	0,293	0,2864	2,0801
Дисперсия $S^2_j$	0,0000097263	0,0000089763	0,0000193263	0,0000293553	0,0000205263	0,0000157895	0,0000202605	0,0001

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Расчет технико-экономических показателей базовой и модернизированной уборочной машины

Помимо очевидных технических преимуществ разработанного устройства, необходимо учитывать и его экономическую эффективность.

Для уборочной машины с базовым и разработанным оборудованием величина финансовых затрат будет больше, чем от эксплуатации обычной модификации [98]. И всё же, эффективность применения модернизированной машины обоснована результатами, представленного ниже расчёта.

Знаком « $\wedge$ » в расчёте обозначены параметры базовой техники, а знаком « $\grave{\wedge}$ » – модернизированной. Стоимость базовой модификации плужно-щёточной машины, затраты на покупку стальных заготовок для изготовления из них предлагаемого устройства ударного действия, стоимость топлива и тарифные ставки рабочих в расчёте приведены по состоянию на ноябрь 2019 года.

Размер капитальных вложений определяется по всем вариантам внедрения модернизированной техники и механизмов.

Капитальные вложения (K) рассчитаем по формуле:

$$K = C_{\wedge} + K_{\grave{\wedge}}, \quad (Г1)$$

где  $C_{\wedge}$  – расчётно-балансовая стоимость уборочной машины, руб.;  $K_{\grave{\wedge}}$  – дополнительные затраты, связанные с вложениями в основные производственные фонды, руб.

Величина дополнительных затрат принимается равной 6-8 % от расчётно-балансовой стоимости техники.

Тогда расчётно-балансовую стоимость машины (бульдозер колёсный, модели ДЗ-82 на базе трактора МТЗ 82.1 с отвалом и щётчным оборудованием) вычислим по формуле:

$$C_{\wedge} = C \cdot k, \quad (Г2)$$

где  $C$  – отпускная цена ( $C = 1490000$ ), руб.;  $k$  – переходной коэффициент от отпускной цены к расчётно-балансовой стоимости (рекомендуется принимать  $k = 1,07$ ).

Расчётно-балансовая стоимость базовой машины равна:

$$C_6 = 1490000 \cdot 1,07 = 1594300 \text{ руб.}$$

Эксплуатация модернизированной техники не вносит существенных изменений в процесс технического осмотра (далее – ТО), текущего ремонта (далее – ТР) и капитального ремонта (далее – КР), поэтому параметр  $K_3$  определим по зависимости:

$$K_3 = 0,07 \cdot C_6. \quad (\Gamma 3)$$

Цена модернизированной техники рассчитывается по формуле:

$$C'' = Z''_{\text{изг.}} + C, \quad (\Gamma 4)$$

где  $Z''_{\text{изг.}}$  – затраты на приобретение специальных стальных заготовок для изготовления из них предлагаемого устройства ударного действия, без учёта затрат на запасные части для него ( $Z''_{\text{изг.}} = 45000$ ), руб.

Величина параметра  $C''$  равна:

$$C'' = 45000 + 1490000 = 1535000 \text{ руб.}$$

Получив  $C''$ , рассчитаем расчётно-балансовую стоимость модернизированной машины:

$$C_6'' = C'' \cdot k = 1535000 \cdot 1,07 = 1642450 \text{ руб.}$$

Дополнительные затраты равны:

$$K_3' = 0,07 \cdot 1594300 = 111601 \text{ руб.},$$

$$K_3'' = 0,07 \cdot 1642450 = 114971,5 \text{ руб.}$$

Теперь определим капитальные вложения:

$$K' = C_6' + K_3' = 1594300 + 111601 = 1705901 \text{ руб.},$$

$$K'' = C_6'' + K_3'' = 1642450 + 114971,5 = 1757421,5 \text{ руб.}$$

Годовой фонд рабочего времени модернизированной машины ( $\Phi_r$ ) определяем по следующей формуле:

$$\Phi_r = (365 - D_B - D_{\text{п}} - D_M) \cdot 8 \cdot p \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right), \quad (\Gamma 5)$$

где 365 – количество дней в году;  $D_B$  – количество выходных и праздничных дней ( $D_B = 0$ , так как данная машина предназначена для использования дорожными и коммунальными службами при оперативной очистке покрытий в любое время суток, но, например, в средней полосе России с апреля по октябрь без предлагаемого устройства и зачастую без отвала);  $D_{\Pi}$  – количество дней на перебазировку техники ( $D_{\Pi} = 0$ );  $D_M$  – продолжительность простоев по метеоусловиям для средней полосы России ( $D_M = 0$ ), дни;  $p$  – минимальное количество рабочих смен в сутки ( $p = 1$ ); 8 – минимальная продолжительность рабочей смены, ч;  $\alpha$  – потери времени в простое на ремонте, дни.

Необходимо отметить, что период использования в году устройства принципиально ограничивается при отсутствии льда и снега на покрытиях.

В таблице Г1 представлены величины показателей для проведения ТО, ТР и КР.

**Таблица Г1 – Величины показателей для проведения ТО, ТР и КР**

Норматив для проведения	Базовый вариант				Модернизированный вариант			
	Период, мото-ч	Межремонтный цикл	Средняя трудоёмкость, чел./час	Календарные сутки	Период, мото-ч	Межремонтный цикл	Средняя трудоёмкость, чел./час	Календарные сутки
ТО	210	20	35	1	240	20	35	1
ТР	2000	4	220	7	1200	4	220	7
КР	6000	1	600	17	6000	1	600	17

Используя данные из таблицы Г1, определим время простоя бульдозеров в ремонте:

$$\alpha' = \alpha'' = 1 + 7 + 17 = 25 \text{ дней.}$$

Подставив все необходимые значения, рассчитаем величину годового фонда рабочего времени для базовой и модернизированной техники:

$$\Phi_r' = \Phi_r'' = 365 \cdot 8 \cdot 1 \cdot \left(1 - \frac{25}{100}\right) = 2190 \text{ ч.}$$

Часовую эксплуатационную производительность модернизированной машины определим по зависимости:

$$P_{\text{ч}} = \frac{V \cdot 3600}{t_{\text{ц}}}, \quad (\text{Г6})$$

где  $V$  – объём удалённых снежно-ледяных образований отвалом,  $\text{м}^3$ ;  $t_{\text{ц}}$  – продолжительность рабочего цикла, ч.

Нужно отметить, что при очистке покрытия, объём удаляемых снежно-ледяных образований и производительность модернизированной машины необходимо вычислять исходя из текущих местных условий (толщины участка зимней скользкости, его прочности, температуры воздуха), но при нанесении насечек разработанным устройством, величины указанных параметров будут практически одинаковыми, как и в случае использования базовой техники. Раздробленные снежно-ледяные образования, появившиеся от нанесения насечек, очень малы по объёму. Однако польза от выполненных устройством насечек вполне очевидна.

При этом, объём удалённых снежно-ледяных образований отвалом бульдозера равен:

$$V = \frac{bh^2}{2tg\varphi_0}, \quad (\text{Г7})$$

где  $b$  – ширина отвала выбранной модификации ( $b = 2,4$ ), м;  $h$  – высота отвала ( $h = 0,68$ ), м;  $\varphi_0$  – угол естественного откоса снега ( $\varphi_0 = 45^\circ$ ).

Имея необходимые значения, найдём объём удалённых снежно-ледяных образований:

$$V = \frac{2,4 \cdot 0,68^2}{2 \cdot tg45^\circ} = 0,555 \text{ м}^3.$$

Время, затрачиваемое на набор призмы волочения, будет равно:

$$t = \frac{l}{v}, \quad (\text{Г8})$$

где  $l$  – длина пути резания, м;  $v$  – средняя рабочая скорость перемещения модернизированной машины ( $v = 0,83$ ), м/с.

Величина параметра  $l$  вычисляется по формуле:

$$l = \frac{k_0 V}{T - Gf}, \quad (\Gamma 9)$$

$k_0$  – удельное сопротивление снега удалению отвалом ( $k_0 = 11$ ), кН/м<sup>2</sup>;  $T$  – тяговое усилие базового трактора ( $T = 18$ ), кН;  $Gf$  – усилие, затрачиваемое для перемещения базового трактора ( $Gf = 4,29$ ), кН.

Подставив полученные значения, найдём длину пути резания до набора полной призмы волочения:

$$l = \frac{11 \cdot 0,555}{18 - 4,29} = 0,445 \text{ м.}$$

Найдём продолжительность рабочего цикла:

$$t_{\text{ц}} = \frac{0,445}{0,83} = 0,536 \text{ с.}$$

Тогда почасовая производительность бульдозера с предлагаемым оборудованием будет равна:

$$P_{\text{ч}} = \frac{0,555 \cdot 3600}{0,536} = 3728 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Рассчитаем годовую эксплуатационную производительность модернизированной машины:

$$P_{\text{г}} = P_{\text{ч}} \cdot \Phi_{\text{г}} \cdot 0,3616, \quad (\Gamma 10)$$

где 0,3616 – продолжительность зимнего периода в Москве.

Величина параметра  $P_{\text{г}}$  равна:

$$P_{\text{г}} = P_{\text{ч}} = 3728 \cdot 2190 \cdot 0,3616 = 2952218,11 \text{ м}^3.$$

Годовые текущие затраты ( $C$ ) для базовой и модернизированной техники определяются по следующим формулам:

$$C = C_{\text{зп}} + C_{\text{э}} + C_{\text{арц}}, \quad (\Gamma 11)$$

$$C = C_{\text{зп}} + C_{\text{э}} + C_{\text{арц}}, \quad (\Gamma 12)$$

где  $C_{\text{зп}}$  – заработная плата, выдаваемая водителю машины и сотрудникам ремонтной группы, руб./ч (руб./год);  $C_{\text{э}}$  – эксплуатационные затраты, руб.;  $C_{\text{арц}}$  – затраты на амортизацию, руб.

Общая почасовая оплата водителя и сотрудников ремонтной группы определяется по формуле:

$$C_{\text{по}} = (1 \cdot C_{Ti \text{ водит.}} \cdot K_{T \text{ водит.}}) + (4 \cdot C_{Ti \text{ срг}} \cdot K_{T \text{ срг}}), \quad (\text{Г13})$$

где 1 – количество водителей машины, чел.;  $C_{Ti \text{ водит.}}$  – тарифная ставка водителя машины ( $C_{Ti \text{ водит.}} = 98,3$ ), руб./ч;  $K_{T \text{ водит.}}$  – тарифный коэффициент водителя ( $K_{T \text{ водит.}} = 1,36$ ); 4 – количество сотрудников ремонтной группы, чел.;  $C_{Ti \text{ срг}}$  – тарифная ставка сотрудника ремонтной группы ( $C_{Ti \text{ срг}} = 88,9$ ), руб./ч;  $K_{T \text{ срг}}$  – тарифный коэффициент сотрудника ремонтной группы ( $K_{T \text{ срг}} = 1,23$ ).

Рассчитаем общую почасовую оплату водителю машины и сотрудникам ремонтной группы:

$$C_{\text{по}} = (1 \cdot 98,3 \cdot 1,36) + (4 \cdot 88,9 \cdot 1,23) = 571,08 \text{ руб./ч.}$$

Годовая заработная плата этих работников вычисляется по формуле:

$$C_{\text{зп}} = C_{\text{по}} \cdot \Phi_{\text{г}}. \quad (\text{Г14})$$

Тогда величина годовой заработной платы работников будет равна:

$$C_{\text{зп}} = 571,08 \cdot 2190 = 1250665,2 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные затраты рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{э}} = C_{\text{эр}} + C_{\text{кр}} + C_{\text{т}} + C_{\text{см}} + C_{\text{пб}}, \quad (\text{Г15})$$

где  $C_{\text{эр}}$  – затраты на ТО и ТР, руб.;  $C_{\text{кр}}$  – затраты на капитальный ремонт, руб.;  $C_{\text{т}}$  – затраты на дизельное топливо, руб.;  $C_{\text{см}}$  – затраты на смазочные материалы, руб.;  $C_{\text{пб}}$  – затраты на перебазировку техники ( $C_{\text{пб}} = 0$ ), руб.

Затраты на ТО и ТР определяются по следующей формуле:

$$C_{\text{эр}} = \frac{C_{\text{тр}} \cdot \Phi_{\text{г}}}{\Phi_{\text{ц}}}, \quad (\text{Г16})$$

где  $C_{\text{тр}}$  – плата сотрудникам ремонтной группы за проведение ТО и ТР, руб.;  $\Phi_{\text{ц}}$  – продолжительность всех ТО и ТР ( $\Phi_{\text{ц}} = 1580$ ), ч.

Для установления параметра  $C_{\text{эр}}$  необходимо вычислить плату сотрудников ремонтной группы за ТО и ТР:

$$C_{\text{тр}} = (n_{\text{то}} \cdot r_{\text{то}} \cdot 4C_{Ti \text{ срг}} + n_{\text{тр}} \cdot r_{\text{тр}} \cdot 4C_{Ti \text{ срг}})K_{T \text{ срг}}, \quad (\text{Г17})$$

где  $n_{\text{ТО}}$  и  $n_{\text{ТР}}$  – количество межремонтных циклов, шт.;  $r_{\text{ТО}}$  и  $r_{\text{ТР}}$  – трудоёмкость отдельных ТО и ТР, чел./час.

Подсчитаем оплату сотрудникам ремонтной группы за проведение ТО и ТР:

$$C_{\text{ТР}}^{\ddot{}} = C_{\text{ТР}}^{\dot{}} = (20 \cdot 35 \cdot 355,6 + 4 \cdot 220 \cdot 355,6)1,23 = 691073,04 \text{ руб.}$$

С учётом полученных данных, рассчитаем величину затрат на ТО и ТР:

$$C_{\text{Эр}}^{\ddot{}} = C_{\text{Эр}}^{\dot{}} = \frac{691073,04 \cdot 2190}{1580} = 957879,72 \text{ руб.}$$

Теперь следует вычислить затраты на капитальный ремонт:

$$C_{\text{КР}} = (n_{\text{КР}} \cdot r_{\text{КР}} \cdot 4C_{\text{Ti срГ}})K_{\text{Т срГ}} + C_{\text{Зч}}, \quad (\text{Г18})$$

где  $n_{\text{КР}}$  – количество межремонтных циклов, шт.;  $r_{\text{КР}}$  – трудоёмкость КР, чел./час;  $C_{\text{Зч}}$  – стоимость запасных частей, руб.

Затраты на проведение КР равны:

$$C_{\text{КР}}^{\dot{}} = C_{\text{КР}}^{\ddot{}} = (1 \cdot 600 \cdot 355,6)1,23 + 30000 = 292432,8 \text{ руб.}$$

Далее необходимо установить затраты на топливо:

$$C_m^{\dot{}} = C_{\text{Т}} \cdot P_{\text{Т}}^{\dot{}} \cdot \Phi_{\text{Г}}, \quad (\text{Г19})$$

$$C_m^{\ddot{}} = (C_{\text{Т}} \cdot P_{\text{Т}}^{\dot{}} \cdot 0,6384 \cdot \Phi_{\text{Г}}) + (C_{\text{Т}} \cdot P_{\text{Т}}^{\ddot{}} \cdot 0,3616 \cdot \Phi_{\text{Г}}), \quad (\text{Г20})$$

где  $C_{\text{Т}}$  – стоимость дизельного топлива ( $C_{\text{Т}} = 46,5$ ), руб./л;  $P_{\text{Т}}$  – расход топлива ( $P_{\text{Т}}^{\dot{}} = 6,9$ ;  $P_{\text{Т}}^{\ddot{}} = 7,4$ ), л/ч.

Определим затраты на топливо:

$$C_m^{\dot{}} = 46,5 \cdot 6,9 \cdot 2190 = 702661,5 \text{ руб.},$$

$$C_m^{\ddot{}} = (46,5 \cdot 6,9 \cdot 0,6384 \cdot 2190) + (46,5 \cdot 7,4 \cdot 0,3616 \cdot 2190) = 721073,27 \text{ руб.}$$

Затраты на смазочные материалы составляют 15-30 % от затрат на топливо:

$$C_{\text{СМ}}^{\dot{}} = 0,25 \cdot 702661,5 = 175665,38 \text{ руб.},$$

$$C_{\text{СМ}}^{\ddot{}} = 0,25 \cdot 721073,27 = 180268,32 \text{ руб.}$$

Подставив полученные значения, рассчитаем эксплуатационные затраты:

$$C_3^{\dot{}} = 957879,72 + 292432,8 + 702661,5 + 175665,38 + 0 = 2128639,4 \text{ руб.},$$

$$C_3^{\ddot{}} = 957879,72 + 292432,8 + 721073,27 + 180268,32 + 0 = 2151654,11 \text{ руб.}$$



Затраты на амортизацию рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{арц}} = \frac{Ц_6 \cdot \Phi_{\text{ар}}}{100\%}, \quad (\text{Г21})$$

где  $\Phi_{\text{ар}}$  – норма амортизации ( $\Phi_{\text{ар}} = 10$  при сроке службы базовой и модернизированной техники, составляющем 10 лет), %.

Вычислим затраты на амортизацию:

$$C_{\text{арц}}^{\cdot} = \frac{1490000 \cdot 10}{100} = 149000 \text{ руб.},$$

$$C_{\text{арц}}^{\ddot{}} = \frac{1535000 \cdot 10}{100} = 153500 \text{ руб.}$$

Подставив все полученные значения, определим годовые текущие затраты:

$$C^{\cdot} = 1250665,2 + 2128639,4 + 149000 = 3528304,6 \text{ руб.},$$

$$C^{\ddot{}} = 1250665,2 + 2151654,11 + 153500 = 3555819,31 \text{ руб.}$$

Формула для определения годовой экономической эффективности от использования усовершенствованной машины имеет вид:

$$\mathcal{E}_m^{\ddot{}} = (Z_y^{\cdot} - Z_y^{\ddot{}}) \cdot П_{\Gamma}^{\ddot{}}, \quad (\text{Г22})$$

где  $Z_y^{\cdot}$  и  $Z_y^{\ddot{}}$  – приведённые затраты на базовое и предложенное оборудование, руб./ч.

Приведённые затраты рассчитываются по формуле:

$$Z_y^{\cdot} = \frac{(C^{\cdot} + E_n \cdot Ц_6^{\cdot})}{П_{\Gamma}^{\cdot}}, \quad (\text{Г23})$$

$$Z_y^{\ddot{}} = \frac{(C^{\ddot{}} + E_n \cdot Ц_6^{\ddot{}})}{П_{\Gamma}^{\ddot{}}}, \quad (\text{Г24})$$

где  $E_n$  – нормальный коэффициент экономической эффективности ( $E_n = 0,15$ ).

Подставив ранее полученные значения, рассчитаем приведённые затраты:

$$Z_y^{\cdot} = \frac{(3528304,6 + 0,15 \cdot 1594300)}{2952218,11} = 1,276142026 \text{ руб./ч.},$$

$$Z_y^{\ddot{}} = \frac{(3555819,31 + 0,15 \cdot 1642450)}{2952218,11} = 1,287908504 \text{ руб./ч.}$$

Теперь определим экономическую эффективность:

$$\mathcal{E}_m = (1,276142026 - 1,287908504) \cdot 2952218,11 = -34737,21 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от использования модернизированной техники получился отрицательным. Тем не менее, эффективность применения уборочной машины, оснащённой базовым и предлагаемым оборудованием, подтверждается из условия того, что, например, работник четвёртого разряда может быть избавлен от получения травмы (перелома ноги) в результате падения на тротуаре, покрытым слоем зимней скользкости (необработанным модернизированной техникой).

Если использовать устройство, то добиться предотвращения такого травмирования достаточно просто. Хотя очевидно, что при помощи устройства можно защитить от травмирования более одного человека.

Для расчёта примем то, что работник может находиться на лечении в течение двух календарных месяцев, учитывая период нахождения в гипсе и последующую реабилитацию после его снятия.

Определим оплату труда работника за два месяца, в течение которых он не сможет (по причине травмы) исполнять свои служебные обязанности:

$$C_{зп} = 98,3 \cdot 1,36 \cdot 352 = 47058,18 \text{ руб.}$$

Тогда суммарные затраты будут равны:

$$C'' = 1250665,2 + 2151654,11 + 153500 - 47058,18 = 3508761,13 \text{ руб.}$$

Рассчитаем приведённые затраты, с учётом нетрудоспособности травмированного работника:

$$Z_y'' = \frac{(3508761,13 + 0,15 \cdot 1642450)}{2952218,11} = 1,271968564 \text{ руб./ч.}$$

Вычислим годовую экономическую эффективность  $\mathcal{E}_m$  в случае предотвращения травмирования работника:

$$\mathcal{E}_m = (1,276142026 - 1,271968564) \cdot 2952218,11 = 12320,97 \text{ руб.}$$

Результаты расчётов по определению экономической эффективности от применения усовершенствованной машины, свидетельствуют о целесообразности использования коленчато-ударного устройства.

Необходимо подчеркнуть, что величина годовой экономической

эффективности применения модернизированной машины рассчитана без учёта последствий от ДТП и использования дополнительных единиц снегоуборочной техники с ПГМ при очистке покрытий. Если же учитывать эти параметры, то величина  $\mathcal{E}_m^{\circ}$  безусловно значительно увеличится.

Срок окупаемости разработанного устройства при таких условиях вычисляется по формуле:

$$T_{\text{py}}^{\circ} = \frac{3_{\text{изг.}}^{\circ}}{\mathcal{E}_m^{\circ}}. \quad (\text{Г25})$$

Установим срок окупаемости разработанного устройства:

$$T_{\text{py}}^{\circ} = \frac{45000}{12320,97} = 3,65 \text{ года.}$$

Таким образом, срок окупаемости устройства значительно ниже срока его службы.

Устройство может быть установлено и на другие, подходящие для этого модификации уборочных машин, но экономическая эффективность от усовершенствованной техники всё равно будет положительной, поскольку использование устройства во многих случаях приводит к исключению затрат на лечение, реабилитацию и страхование травмированных пешеходов, с пострадавшими участниками ДТП. Снизится и число случаев ремонта автомобилей, которые могут попасть в аварии на неочищенных от гололёдных образований дорожных покрытиях. Поэтому статистические данные, относящиеся к последствиям появления зимней скользкости, должны заметно улучшиться для городов и населённых пунктов, в которых будут использовать усовершенствованные машины.

Полученные в настоящем расчёте значения параметров в дальнейшем могут меняться в сторону уменьшения или увеличения, в зависимости от цен на соответствующие наименования и от необходимых для вычислений тарифных ставок.