

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: **Доктор технических наук, профессор  
Сладкова Любовь Александровна**

Официальные оппоненты: **Доценко Анатолий Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Московский автомобильно-  
дорожный государственный технический  
университет (МАДИ)», кафедра «Дорожно-  
строительные машины», профессор

**Гончаров Кирилл Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Брянский государственный  
технический университет», кафедра «Подъемно-  
транспортные машины и оборудование»,  
заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Тверской государственный  
технический университет»

Защита состоится «20» января 2022 г., в 15 часов 00 мин на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), [www.miiit.ru](http://www.miiit.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 оценке 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;

6) 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 оценке 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.).

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «ИМЭДЖИН ЛАБ».

**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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** выполнен анализ наиболее распространенных методов борьбы со льдом и снегом в различных условиях, определены самые эффективные типы уборочного оборудования для борьбы с зимней скользкостью.

Результаты проведённого анализа современных методов и средств борьбы со льдом и снегом на различных покрытиях и поверхностях, состоят в следующем:

- для реализации термического метода, как правило, требуется очень большое количество энергии или мощности;

- многие химические противогололедные материалы (ПГМ) агрессивно воздействуют на металлические части машин, обувь, растения и почвы, являются причиной повышения скользкости покрытий, поэтому производители реагентов перешли на изготовление более эффективных и безопасных химических многокомпонентных ПГМ с добавлением формиата натрия;

- фрикционные ПГМ плохо закрепляются на поверхности участков зимней скользкости, так как из-за передвижения автомобилей и воздействия ветров происходит смещение данных материалов в придорожные полосы, приводящее к повышенной запылённости таких районов;

- резонансный метод эффективен лишь при разрушении ледяного покрова водоёмов;

- использование *механических средств* практически не оказывает вредного влияния на окружающую среду, причём во многих сферах борьбы со льдом и снегом данный метод считается одним из самых эффективных, но недостаток метода в исследуемой области заключается в том, что рабочие органы уборочных машин и устройств отличаются конструктивным несовершенством, из-за этого далеко не всегда можно удалить весь лёд и снег за пределы очищаемой зоны, с другой стороны, не исключается вероятность повреждения дорожных и «пешеходных» покрытий;

- комбинированный метод является более затратным с экономической точки зрения, чем термический, химический, фрикционный и механический, однако сочетание разных по характеру воздействия средств может привести к существенному улучшению процесса борьбы со льдом и снегом.

Исходя из рассмотренных конструктивных особенностей существующих типов дорожной уборочной техники, установлено, что для эффективной борьбы с зимней скользкостью (достижения полной очистки покрытий) лучше всего подходят плужно-щёточные машины, которые необходимо дополнительно оснастить ударными рабочими органами и механизмами точного регулирования внедрения этих рабочих органов в толщу плотных слоёв такой скользкости.

Следует отметить, что процесс разрушения участков зимней скользкости оборудованием ударного действия отличается относительно небольшой энергоёмкостью, а отвал и щёточное оборудование (при совместном использовании с ударными рабочими органами) наиболее эффективны на начальном и завершающем этапе работ: при выравнивании поверхности таких участков и удалении раздробленной ударниками массы.

**Во втором разделе** рассмотрены виды зимней скользкости, особенности влияния зимней скользкости на движение транспортных средств и пешеходов, действующие требования нормативных документов РФ в области содержания покрытий проезжих частей автомобильных дорог и пешеходных пространств в зимний период, основные характеристики льда. Кроме того, приведены результаты анализа основных моделей разрушения льда и результаты теоретических исследований по моделированию процесса разрушения льда ударным воздействием на дорожном покрытии.

Образующиеся на покрытиях проезжих частей и пешеходных пространств виды зимней скользкости – рыхлый снег, снежный накат, стекловидный лёд (гололед, гололедица, изморозь, «чёрный лёд»). Наличие зимней скользкости на указанных покрытиях приводит к тому, что у машин значительно снижается устойчивость и скорость движения, увеличивается

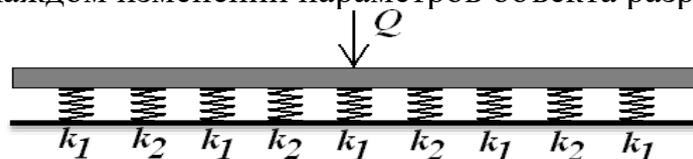
тормозной путь и вероятность заносов, а пешеходы подвергаются риску получения ушибов, переломов и черепно-мозговых травм.

В России с 2014 по 2018 год введены в действие новые и переработанные нормативные документы для зимнего содержания покрытий, с весьма жёсткими требованиями к срокам (полного или практически полного) устранения зимней скользкости, а также к состоянию покрытий автомобильных дорог и пешеходных пространств после окончания работ по их очистке. Основное отличие действующей нормативной базы от предыдущей состоит в том, что для большинства элементов дорог и пешеходных пространств впервые разработаны отдельные требования к их эксплуатационному состоянию в зимний период.

При разработке эффективных способов и средств борьбы с зимней скользкостью, следует учитывать многие свойства льдообразований, такие как адгезия льда к покрытиям, плотность, теплоёмкость, теплопроводность, скрытая теплота плавления, прочность. При этом значения тех параметров льда, которые характеризуют его физико-механические свойства, необходимо определять экспериментальным путём, учитывая текущие местные условия.

Анализ состояния континуальных и дискретных моделей ледовых нагрузок, реологических моделей, а также моделей, в которых лёд представлен упругопластическим и вязкопластическим материалом показал, что большинство моделей взаимодействия тел и сред со льдом изначально не предназначено для прогнозирования разрушения участков зимней скользкости. Тем не менее, небольшое количество вариантов моделирования разрушения этих участков на дорожных покрытиях всё-таки было разработано, но воздействия ударного типа на такие образования в них, как правило, не рассматривались.

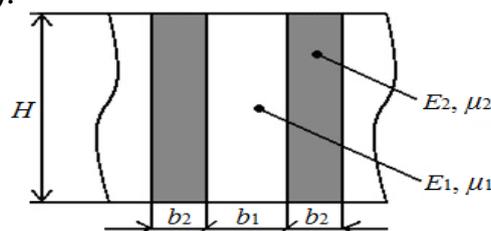
В связи с этим, была разработана модель разрушения льда (участка обледенения) воздействием ударного типа на дорожном покрытии (рисунок 1) для определения условий эффективной борьбы с прочными и неоднородными участками зимней скользкости, посредством установления значений данного воздействия при каждом изменении параметров объекта разрушения.



$Q$  – действующее усилие разрушения;  $k_1$  и  $k_2$  – реакции связей переменной жесткости

**Рисунок 1 – Модель льда, подвергнутого разрушающему ударному воздействию на дороге**

Все кристаллы этой модели ориентированы вертикально и «спаяны» между собой (рисунок 2).



$H$  – толщина слоя;  $b_1$  и  $b_2$  – ширина кристаллов льда и спаяк;  $E_1$  и  $E_2$  – модуль Юнга кристаллов льда и спаяк;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициент Пуассона кристаллов льда и спаяк

**Рисунок 2 – Схема фрагмента слоя модели**

Реакция со стороны основания (дорожного покрытия) при воздействии на пластину из льда ударного усилия представлена, как произведение функции переменной жёсткости  $k(x)$  на перемещение  $w$  всех кристаллов льда и спаек.

Функцию жёсткости можно представить в виде:

$$k(x) = \frac{(C \times \text{sign} \cdot \cos(Ax) + B + D)}{H}, \quad (1)$$

где  $A$  – период функции;  $B$  – смещение значений функции косинуса, для получения нужных отрезков по оси  $x$ ;  $C$  – половина разницы между значениями модулей Юнга;  $D$  – среднее арифметическое модулей Юнга.

Преобразованное уравнение изгиба необходимо для определения величины перемещения  $w$ :

$$\frac{dw_3}{dx} = q(x)b - k(x)w, \quad (2)$$

где  $x$  – изменение координаты жёсткости;  $q$  – приложенная вертикальная нагрузка на единицу длины балки, Н/м;  $b$  – ширина балки, м.

При этом, предложена имитационная модель НДС льда, с целью оценки процессов данного состояния, происходящих при использовании воздействий ударного типа на образец. Для имитационной модели были заданы факторы, с пределами их изменения (таблица 1).

**Таблица 1 – Пределы изменения факторов, действующих на прочность льда**

Фактор	Значение	
	Минимальное	Максимальное
Внешнее воздействие ( $X_1$ ), Н	10000	20000
Толщина кристалла льда ( $X_2$ ), мм	0,4	0,6
Толщина спайки ( $X_3$ ), мм	0,3	0,8
Модуль Юнга кристалла льда ( $X_4$ ), Па	8500	9500
Модуль Юнга спайки ( $X_5$ ), Па	5000	15000
Высота слоя льда ( $X_6$ ), мм	10	30

Благодаря выполненному построению графиков имитационной модели, было установлено следующее: деформация увеличивается с ростом толщины спайки (в результате снижения её жёсткости), величина прогиба снижается с ростом толщины слоя льда, а увеличение внешнего воздействия приводит к увеличению прогиба.

При проведении экспериментов по определению значимых факторов (влияющих на НДС льда) и подтверждению достоверности имитационной модели, было составлено уравнение регрессионной зависимости прогиба:

$$w = 5,564 + 1,878X_1 - 1,084X_5 + 2,193X_6, \quad (3)$$

где  $X_1$ ,  $X_5$ ,  $X_6$  – значимые факторы.

Из графической интерпретации выполненной проверки достоверности модели НДС льда (рисунок 3) видно, что данная модель имеет высокую степень корреляции с регрессионной зависимостью.



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

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

**В третьем разделе** представлены описание и результаты двухэтапных исследований по определению условий для минимизации негативного воздействия зимней скользкости на качество передвижения машин и пешеходов, а также приведена методика для первого этапа исследований и расчёты по установлению коэффициентов эмпирических зависимостей изменения энергоёмкости разрушения льда от температуры воздуха для ударников установленных рациональных конфигураций. Помимо этого, в разделе приведены порядок расчёта по определению параметров привода для работы предлагаемого устройства на отвале плужно-щёточной машины, с описанием конструкции этого уборочного устройства ударного типа, рассмотрены условия изменения расположения и параметров насечек, выполненных предлагаемым устройством, а также представлен порядок расчёта его параметров и суммы сопротивлений, характерных для противодействия работе модернизированной уборочной машины.

Энергоёмкость разрушения льда от ударников ( $E$ ) определяется, как отношение работы ( $A$ , Дж), затрачиваемой на разрушение льда, к объёму ( $V$ , м<sup>3</sup>) зоны его разрушения.

Величина работы  $A$  определяется по зависимости (6):

$$A = mgh, \quad (6)$$

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

Эксперимент по определению объёмов зон разрушения льда от ударников различных конфигураций проведён в естественных условиях при температуре воздуха от 0 до  $-15$  °С, с целью установления вариантов образцов, необходимых для устранения участков зимней скользкости с наименьшей энергоёмкостью.

В качестве ударников были выбраны стальные профили, представленные на рисунке 5 и стальной шар.



1 – крестообразный остроконечный; 2 – шестигранная призма;

3 – крестообразный тупоконечный; 4 – клиновидный

**Рисунок 5 – Общий вид экспериментальных профилей**

Наименьшие значения энергоёмкости разрушения льда (среди рассматриваемых образцов) получены от использования клина и шара, поскольку от их применения объёмы зон разрушения льда самые большие (рисунок 6).

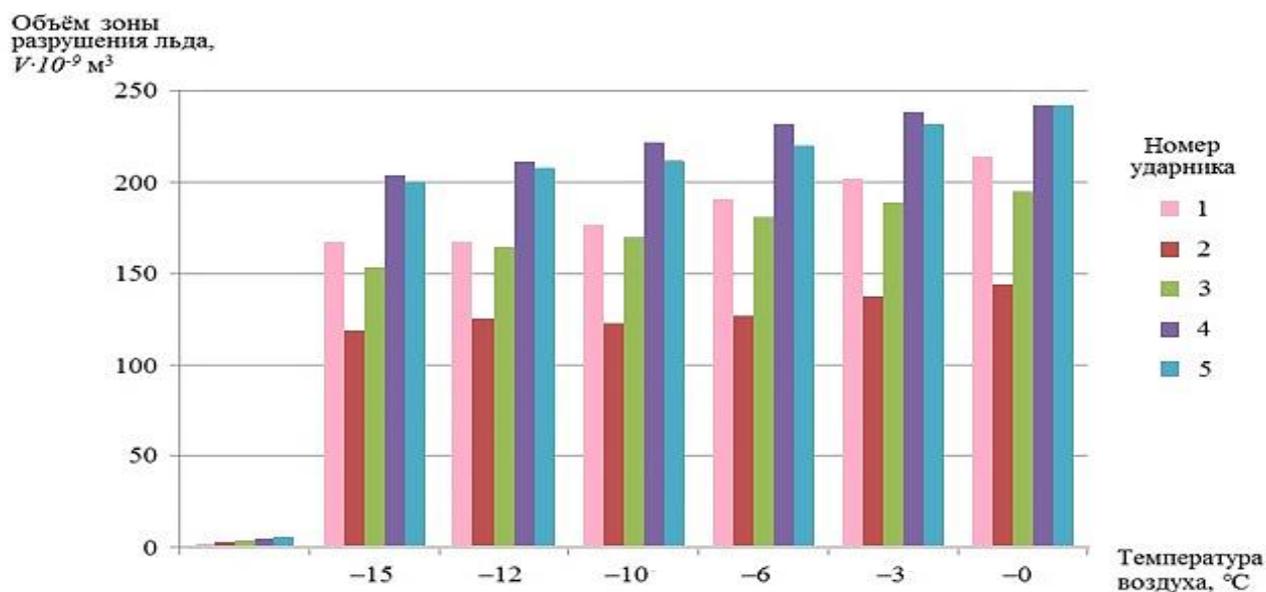


Рисунок 6 – Диаграмма изменения объёмов зон разрушения льда

Численные результаты первого этапа исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Величины объёмов зон разрушения льда ударниками, в зависимости от температуры воздуха

Температура воздуха, °C	Высота сбрасывания держателя с ударником, м	Номер ударника				
		1	2	3	4	5
		Объём зоны разрушения льда, $V \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$				
-15	1	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

Следы от внедрения в лёд клина и шара (рисунок 7), например, при температуре воздуха минус 3 °C, показаны для сравнения.



Рисунок 7 – Следы от внедрения в лёд 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. Такой характер разрушения наблюдался во всех опытах выбранного диапазона температур. Однако объём зоны разрушения от внедрения клина больше, чем от внедрения шара. Следовательно, эти конфигурации можно считать отчасти равнозначными при составлении ударных рабочих органов к уборочным машинам и устройствам.

Эмпирические зависимости изменения энергоёмкости разрушения льда от температуры воздуха при использовании клина и шара установлены по формуле:

$$E = a_0 + a_1 t, \quad (7)$$

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

Для клина эта зависимость равна:

$$E = -11825 + 151t. \quad (8)$$

Зависимость для шара равна:

$$E = -12078 + 165t. \quad (9)$$

Для обеспечения значительного повышения коэффициента сцепления колеса автомобиля по выровненному участку зимней скользкости на втором этапе исследований было проанализировано влияние угла наклона насечек, оставляемых рабочим органом ударного типа, на изменение коэффициента трения движителя по скользкой наклонной поверхности с насечками, так как на момент начала движения образца эти коэффициенты равны.

Из материалов взаимодействующих поверхностей выбраны резина (для представления частей колеса, контактирующих со льдом) и ламинированная древесно-стружечная плита (с насечками на поверхности) для имитации участка зимней скользкости.

Установлено, что максимальный коэффициент трения по поверхности достигается при выполнении на ней насечек под углом наклона в  $45^\circ$  к направлению движения (рисунок 8). Коэффициент трения при таких условиях на 20-25 % больше, чем при скольжении по поверхности без насечек.

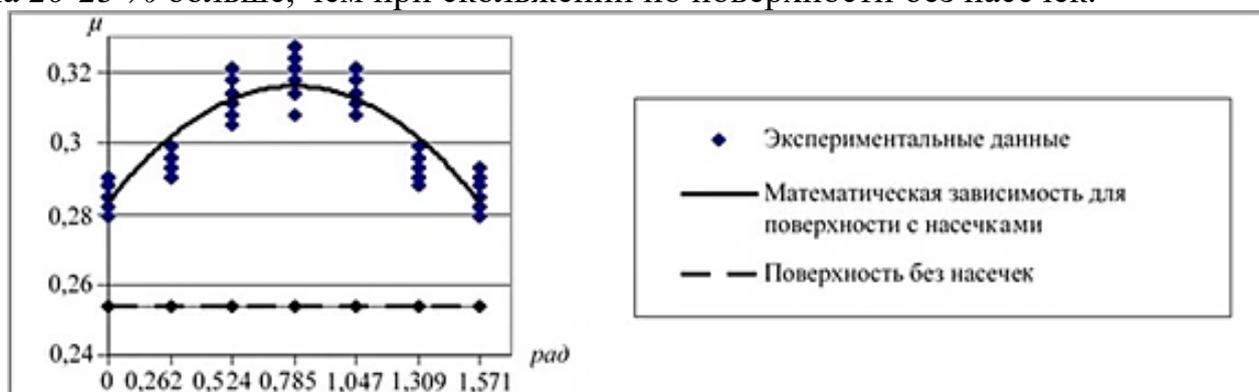
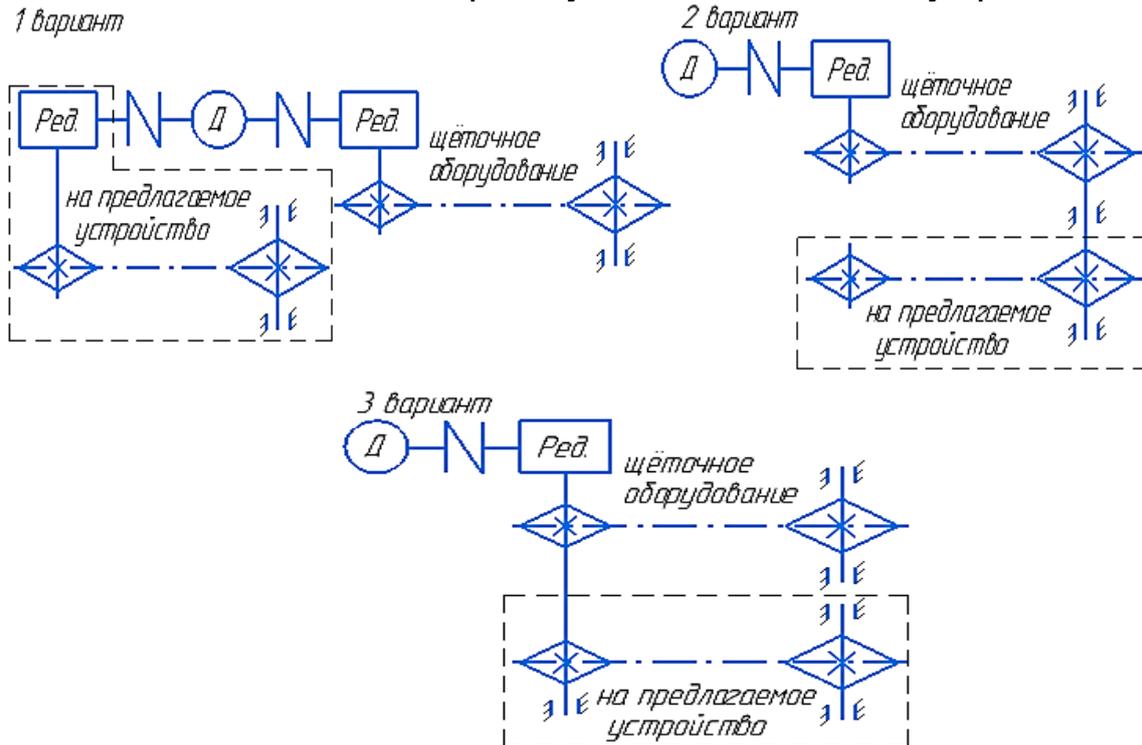


Рисунок 8 – График изменения коэффициента трения в зависимости от угла наклона насечек

В данном случае, коэффициент сцепления более 0,3, что соответствует требованиям ГОСТ Р 50597-2017 «Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условию безопасности

дорожного движения. Методы контроля», при которых обеспечивается безопасная эксплуатация покрытий.

Для разработки и эффективного функционирования уборочной техники с предлагаемым устройством ударного типа, были рассмотрены кинематические схемы вариантов привода машины (рисунок 9), определены мощности для работы устройства, рассчитаны выражения для установления крутящего момента на валу устройства, касательной силы, приводящей во вращение вал устройства и радиальной силы, приходящейся на звёздочку, а также диаметра ведомой звёздочки вала и диаметра ведущей звёздочки на валу привода.



1 вариант – привод с отдельным редуктором для устройства; 2 и 3 варианты – расположение привода вращения устройства за приводной передачей щётчного оборудования

**Рисунок 9 – Кинематические схемы вариантов привода машины**

Доля мощности, затрачиваемая на устройство по первому варианту, равна:

$$x = 1 - (\eta_{ц.п.} \cdot \eta_{ред.} \cdot \eta_{муф.} \cdot \eta_{подш.}), \quad (10)$$

где  $\eta_{ц.п.}$  – коэффициент полезного действия (КПД) цепной передачи;  $\eta_{ред.}$  – КПД редуктора;  $\eta_{муф.}$  – КПД муфты;  $\eta_{подш.}$  – КПД подшипников.

Мощность, затрачиваемая на функционирование разработанного устройства, вычисляется по формуле:

$$P_{р.у.} = P_{прив.} \cdot x, \quad (11)$$

где  $P_{прив.}$  – мощность привода уборочной машины с отвалом и щётчным оборудованием, кВт.

Доля мощности, затрачиваемая по вариантам 2 и 3, равна:

$$x = 1 - (\eta_{ц.п.} \cdot \eta_{подш.}). \quad (12)$$

Определено, что мощность, потребляемая по первому варианту, составляет 7,75 кВт, а по второму и третьему – 4,17 кВт, но первый вариант

является более подходящим, поскольку при вариантах 2 и 3 требуется цепная передача значительной длины, имеющая существенные недостатки при эксплуатации.

Схема функционирования предлагаемого устройства ударного действия представлена на рисунке 10.

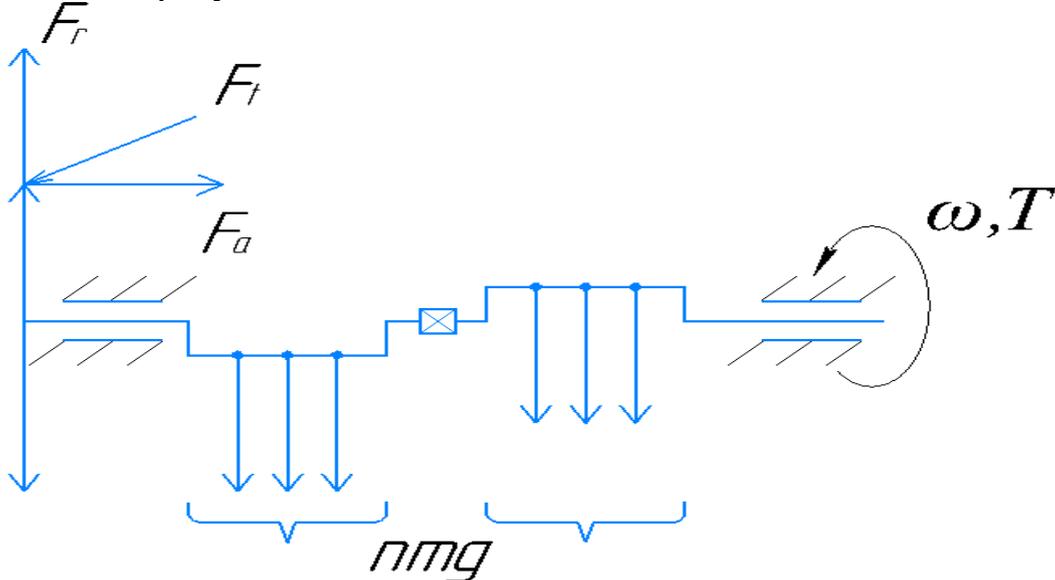


Рисунок 10 – Распределение сил, действующих для работы дополнительного устройства

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

$$F_t = \frac{T_{\text{р.у.}} \cdot 2}{d}, \quad (13)$$

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

Сила тяжести всех отбойников устройства определяется по формуле:

$$G = nmg, \quad (14)$$

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

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

$$F_r = k_B \cdot F_t = \frac{P_{\text{р.у.}} \cdot 2}{d\nu} k_B = \frac{2 \cdot P_{\text{п.б.м.}} \cdot \eta_{\text{ц.п.}} \cdot \eta_{\text{подш.}} \cdot k_B}{d\nu}, \quad (15)$$

где  $P_{\text{п.б.м.}}$  – мощность привода базовой машины, кВт;  $k_B$  – коэффициент превышения тангенциальной составляющей нагрузки на звёздочке, при условии, что внешняя нагрузка носит ударный характер ( $k_B = 1,15$ );  $d$  – диаметр основной окружности звёздочки, м;  $\nu$  – частота вращения вала разработанного устройства,  $\text{с}^{-1}$ .

Тогда диаметр ведомой звёздочки вала равен:

$$d = \frac{2 \cdot P_{\text{п.б.м.}} \cdot \eta_{\text{ц.п.}} \cdot \eta_{\text{подш.}} \cdot k_B}{\nu nmg}. \quad (16)$$

На базе плужно-щёточной машины возможно расположение предлагаемого оборудования ударного действия с тыльной стороны отвала, разместив концы вала оборудования в специальных кронштейнах, приваренных к отвалу.

Ударные узлы, расположенные на коленчатом валу, целесообразно разбить на участки, которые между собой предлагается соединять сдвоенными муфтами. Муфта передаёт крутящий момент с одного участка вала на другой, служит своеобразным компенсатором радиального биения. К тому же, сдвоенная муфта сохраняет заданную скорость 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, для обеспечения вращения коленчатого вала и закреплённых на нём ударных узлов, в которых установлены отбойники.

Траекторию вращения отбойника, при необходимости, можно изменить, так как её характер зависит от диаметра отверстий, выполненных в фиксаторном раскосе (рисунок 11).

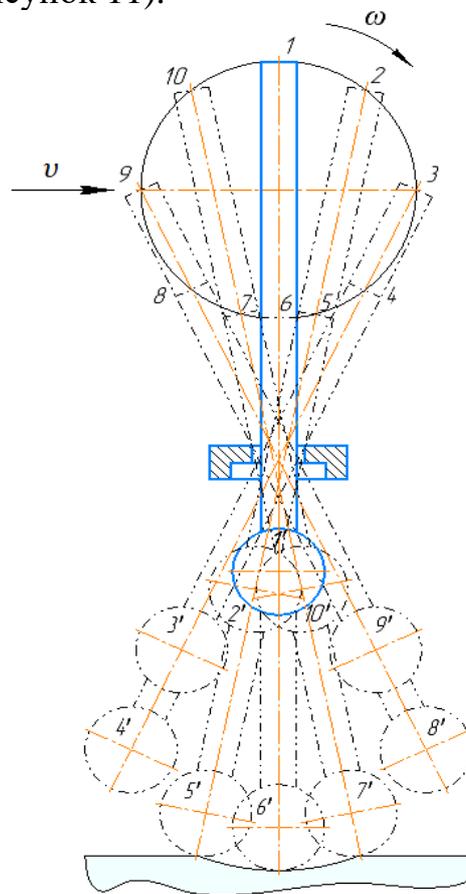


Рисунок 11 – Траектория перемещения отбойника

При этом, предусмотрена возможность регулирования расположения отбойников относительно поверхности слоёв зимней скользкости, в зависимости от прочности и толщины этих слоёв.

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 12, размер  $c$ ), а параметр  $v$  влияет на расстояние между насечками в направлении движения машин (рисунок 12, размер  $d$ ).

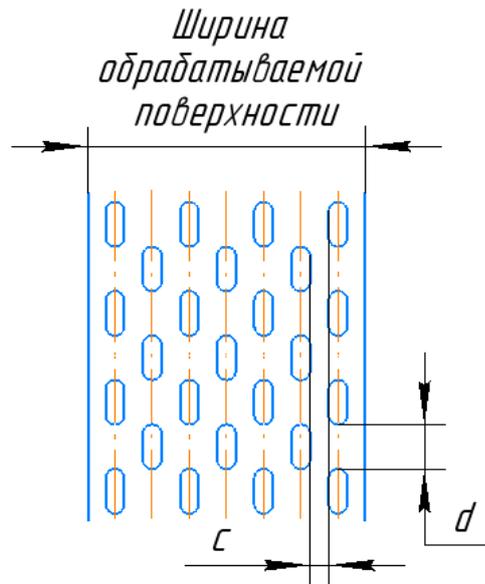
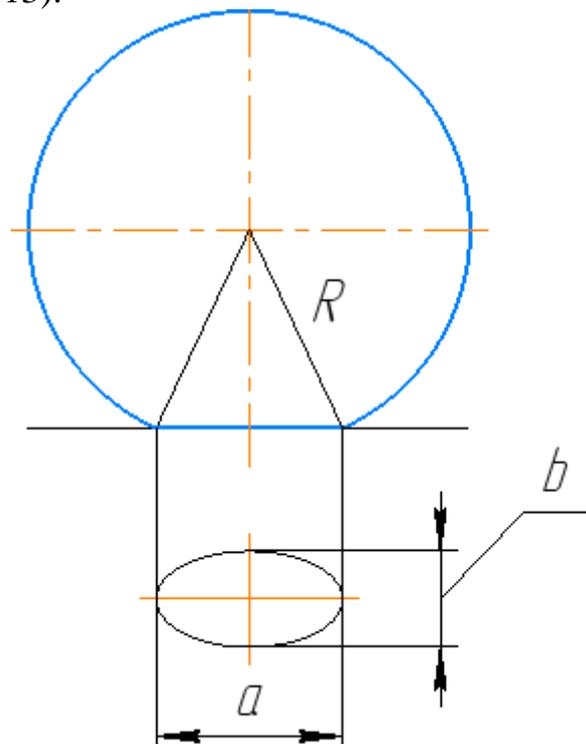


Рисунок 12 – Схема для определения расположения насечек

Для доведения поверхности указанного участка до уровня безопасной эксплуатации необходимо, чтобы расстояния  $d$  и  $c$  между насечками (рисунок 12) не были больше длины и ширины пятна контакта шины колеса автомобиля (рисунок 13).



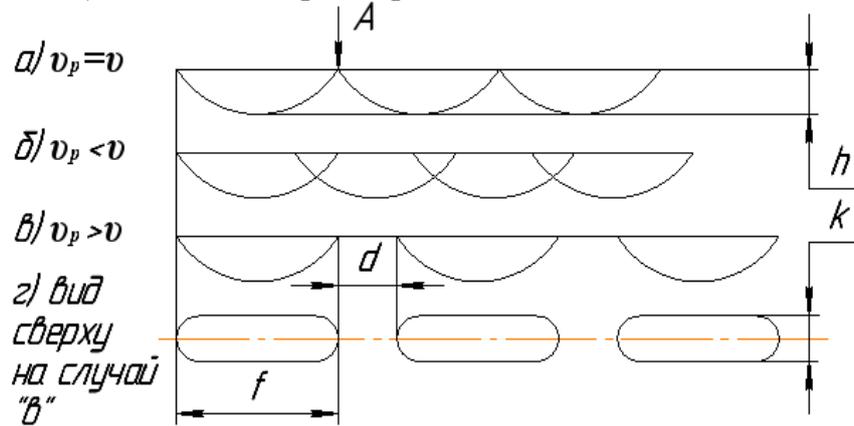
$a$  – длина пятна;  $b$  – ширина пятна

Рисунок 13 – Пятно контакта шины колеса автомобиля с дорожным покрытием

Характер расположения насечек на поверхности таких слоёв (рисунок 14) зависит, главным образом, от скорости перемещения модернизированной плужно-щёточной машины ( $v_p$ ), количества ударных узлов с отбойниками на коленчатом валу и скорости их вращения ( $v$ ).

На рисунке 14 показаны случаи, когда  $v_p = v$ ,  $v_p < v$  и  $v_p > v$ , а также вид

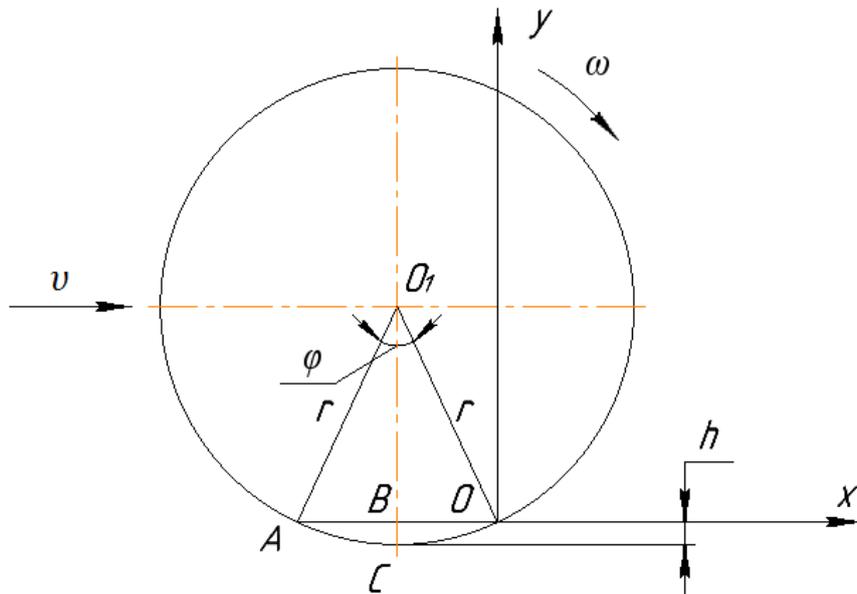
сверху на случай в) и основные размеры насечек.



$h$  – максимальная глубина насечки;  $k$  – ширина насечки;  $f$  – длина насечки;  $d$  – расстояние между насечками

**Рисунок 14 – Схема изменения расположения насечек**

Исходя из схемы внедрения отбойника в толщу слоя зимней скользкости (рисунок 15), 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 15 – 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:

$$O_1B = r - h. \quad (17)$$

Половина длины насечки определяется по формуле:

$$OB = \sqrt{r^2 - (r - h)^2} = \sqrt{r^2 - r^2 + 2rh - h^2} = \sqrt{h(2r - h)}. \quad (18)$$

Тогда уравнение окружности, описываемой отбойником, будет иметь вид:

$$r^2 = [x + \sqrt{h(2r - h)}]^2 + [y - (r - h)]^2. \quad (19)$$

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

$$S = \frac{\omega \cdot d_0 \cdot t}{2}, \quad (20)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения коленчатого вала и отбойника,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  – время работы оборудования ударного действия и передвижения базовой машины,  $\text{с}$ .

Предлагаемый 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.

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:

$$\sum_{i=1}^n W_i = W_0 + W_6 + W_7, \quad (21)$$

где  $W_0$  – сопротивления снежно-ледяных образований копанию рабочим органом отвального типа, Н;  $W_6$  – сопротивление снежно-ледяных образований разрушению отбойниками предлагаемого устройства, Н.  $W_7$  – сопротивление перемещению предлагаемого устройства, Н.

Порядок установления слагаемых  $W_0$  – полного сопротивления функционированию рабочего оборудования снегоуборочной машины приведён во многих научных источниках. Интерес представляет сумма слагаемых  $W_6$  и  $W_7$ , определяемых через усилие разрушения отбойником  $W_{\text{у. отб.}}$  участка зимней скользкости:

$$W_6 + W_7 = nW_{\text{у. отб.}}, \quad (22)$$

где  $n$  – количество отбойников в ударных узлах, шт.

Усилие разрушения отбойником участка зимней скользкости, учитывая рисунок 15, равно:

$$W_{\text{у. отб.}} = 2k \cdot r \cdot k_0 \cdot \arccos \frac{r - h}{r}, \quad (23)$$

где  $k_0$  – предел прочности слоя снежно-ледяных образований, обрабатываемого отбойником предлагаемого устройства, Па.

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 машин для содержания дорог и пешеходных зон, у которых функционирование с предлагаемым дополнительным уборочным устройством не будет являться причиной рассогласования скорости перемещения машины и скорости вращения вала устройства.

## 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.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

### а) в рецензируемых научных изданиях:

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

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

3) 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.

### б) в научных изданиях и материалах конференций:

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

5) 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.

6) 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.

7) 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.

8) 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.

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

10) 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.

**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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано к печати \_\_\_\_\_.\_\_\_\_. 2021 г.  
Объем 1,5 усл. п.л.

Заказ № \_\_\_\_\_  
Тираж 80 экз.

Формат 60×90/16

---

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,  
ЦСО Отдел дизайна, вёрстки и печати РУТ (МИИТ)