

АННОТАЦИЯ

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

БУГАЕВА АНДРЕЯ БОРИСОВИЧА

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАВЕСНОГО УДАРНО-РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

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

Актуальность диссертационной работы. Актуальной проблемой для коммунальных и дорожно-эксплуатационных служб в зимние месяцы является очистка и уборка возникающего на несущей поверхности автомобильных дорог и тротуаров обледенения и снежно-ледяных образований (СЛО), которые существенно затрудняют движение пешеходов и управление автомобилем, а иногда делают их невозможными.

Снежно-ледяные наросты, скапливающиеся на автомобильных дорогах и пешеходных тротуарах, по своим физическим свойствам и внешнему поведению могут подразделяться на неуплотненный, несвязный снег (рыхлый), спрессованный, накатанный снег и прозрачный стекловидный лед. При несвязном снеге коэффициент сцепления шин с заснеженным покрытием понижается до 0,2, при накатанном снеге коэффициент сцепления шин с поверхностью 0,01...0,25, при образовании стекловидного льда коэффициент сцепления шин становится 0,08...0,15. Для сравнения, коэффициент сцепления сухого асфальта - 0,7...0,8.

Коэффициент сцепления колеса с дорожным покрытием влияет на пробег, длину тормозного пути и себестоимость перевозок, а также оказывает значительное влияние на рост выделения отравляющих газов от транспортных средств. Как показывают результаты натурных наблюдений, длина тормозного пути транспортных средств в гололедоопасном интервале увеличивается в 2,5...6,0 раз, расход топлива - до 85%.

В настоящее время существуют различные методы борьбы с обледенением на дорогах и тротуарах.

Из них к основным можно отнести:

- покрытие дороги химическими противогололедными материалами и жидкостями;
- механическое воздействие за счет неконтролируемого удара;
- тепловое воздействие;

- покрытие дороги фрикционными материалами, типа песка, в том числе, подогретыми.

Наиболее универсальным и эффективным представляется механическое разрушение и удаление льда. Недостатком имеющегося на сегодняшний день рабочего механического оборудования, является вероятность повреждения несущей части дороги (тротуара) в процессе их очистки от СЛЮ, а также большие затраты энергии, требуемой на дробление льда, с возрастанием в функции времени его плотности, а значит и прочности (твердости), которая характеризует его сопротивление разрушающему воздействию. Поэтому не все рабочие органы для механического удаления льда, непредсказуемо воздействующие вместе со льдом еще и на дорожное покрытие, в настоящее время рекомендуются к применению и зачастую используются как вынужденная мера.

Отсутствие исследований рабочего процесса нового перспективного навесного ударно-роторного рабочего оборудования для разрушения снежно-ледяных образований на дорогах и определение влияния геометрических и весовых параметров ударного льдоскалывателя на силы сопротивления и крутящий момент, определяют **актуальность исследования**.

Актуальность работы, равно как и предполагаемый социальный эффект, продиктованы ожидаемым снижением случаев зимних ДТП и пешеходного травматизма на территории РК, а за счет того, что дороги новыми льдоскалывающими машинами будут приведены быстрее в удовлетворительное состояние, водители и автомобили будут меньше находиться в состоянии пробок, и, значит, будет снижен выбрасываемый ими объем выхлопных газов.

Идея диссертационной работы сводится к разработке и обоснованию параметров новых эффективных методов и машин для механического дробления льда, способных оперативно обеспечить работоспособность и целостность поверхностного слоя обслуживаемой дороги после удаления СЛЮ за счет регулируемого и управляемого направления и силы удара льдоскалывателя на СЛЮ при изменении его свойств.

Проблема, решение которой приведено в диссертационной работе, заключается в трудности эффективного обеспечения бесперебойной работы городского и междугороднего автомобильного транспорта при зимних температурных перепадах, в результате которых на дорогах образуется ледяная пленка, скалывание которой вызывает затруднение из-за отсутствия соответствующей техники и оборудования, разработка и обоснование параметров которых приведены в предлагаемом для защиты диссертационном исследовании.

Основная гипотеза диссертационной работы состоит в возможности повышения эффективности механической очистки ледяной пленки и СЛЮ с поверхности дорожного полотна без его разрушения ударами бойков льдоскалывателя, при минимальных расходах.

Анализ исследований по теме диссертации выявил большой спрос дорожно-обслуживающих организаций на высокоэффективное и

энергосберегающее оборудование для зимнего содержания пешеходных тротуаров и автомобильных дорог.

Выполнить такие работы можно, применяя эффективное навесное и другое оборудование, рабочее воздействие которых на СЛО представляет собой, например, удар – самый энергонасыщенный и эффективный для разрушения вид воздействия. Однако, чтобы несущее покрытие дороги не разрушилось, удар должен наноситься так, чтобы исключалось концентрированное воздействие и проникновение его активных составляющих через СЛО в слой дорожного покрытия, что можно обеспечить за счет управляемого регулирования величины генерируемого оборудованием удара, превышающей прочность льда на сжатие и недостаточной для превышения прочности асфальтобетона, что позволит разрушать лед, практически не повреждая покрытие дороги.

Цель диссертационного исследования - установление зависимостей и закономерностей, отображающих рабочий процесс навесного ударно-роторного рабочего оборудования для разрушения снежно-ледяных образований на дорогах.

Задачи диссертационной работы:

- выполнен анализ состояния вопроса борьбы с гололедом на дорогах и тротуарах, а также конструктивный анализ патентных и научно-технических сведений в области конструкций навесного ударно-роторного рабочего оборудования для разрушения льда и снежно-ледяных образований (СЛО);
- разработана и исследована механико-математическая модель инерционного внедрения сферического бойка в деформируемый ледяной слой;
- разработана методика экспериментов и экспериментальные стенды, и оборудование для опытной проверки закономерностей разрушения льда на дорожном покрытии. Выполнено сравнение экспериментальных результатов с аналитически полученными результатами;
- предложена конструкция навесного ударно-роторного рабочего оборудования для разрушения льда и снежно-ледяных образований (СЛО) бойками с различной геометрической формой, обеспечивающая максимальную эффективность очистки автомобильных дорог ото льда и СЛО.

Объектом исследования выступает рабочий процесс навесного ударно-роторного рабочего оборудования для разрушения льда и снежно-ледяных образований на дорогах.

Предмет исследования – закономерности рабочего процесса взаимодействия ударно-роторного рабочего оборудования с ледяными образованиями на дорогах.

Научная работа базируется на разработке и научном обосновании новых способов работы навесного оборудования машин для зимнего содержания автомобильных дорог и городских территорий с целью получения максимального эффекта при минимальных энергозатратах.

Научной новизной является:

- экспериментальным путем подтверждена гипотеза о возможности эффективного механического дробления и очистки ледяной пленки и СЛО с

поверхности дорожного полотна без его разрушения от ударов инерционными бойками;

- теоретическим путем определены составляющие сил сопротивления при взаимодействии ударно-роторного льдоскалывателя с разрушаемым льдом, зависящие от геометрических параметров инерционных элементов льдоскалывателя, его рабочей скорости и частоты вращения ротора;

- механико-математическая модель внедрения сферического бойка в деформируемый ледяной слой и теоретико-эмпирическая модель зависимости разрушения ледового покрытия от параметров сферических бойков-ударников;

- экспериментальным путем получены результаты глубины проникновения бойка в лед при его разрушении ударником со сферическим наконечником;

- экспериментальным путем получены результаты сравнительных форсированных испытаний на надежность, работоспособность, функциональность и безотказность рабочих секций льдоскалывателя со сферическими бойками на гибких тягах;

Научно-прикладной эффект заключается в разработке новых видов оборудования повышенной эффективности для борьбы с СЛО на дорожных покрытиях.

Практическая значимость исследований заключается:

- в технической документации и конструкции готового, оригинального, навесного, экспериментального роторно-ударного льдоскалывателя, реализующего эффективное механическое разрушение ледяной корки на очищаемой поверхности дорог;

- в разработанной методике расчета параметров нового, сменного, роторно-фрезерного ударного льдоскалывателя, навешиваемого на базовую машину-тягач и обеспечивающего эффективное механическое разрушение ледяного покрова;

- в разработанном экспериментальном стенде для форсированного исследования рабочих секций ударно-роторного льдоскалывающего рабочего оборудования, позволившим определить их работоспособность, функциональность и безотказность.

- в конструктивных решениях нового навесного ударно-роторного рабочего органа для разрушения льда и СЛО, подтвержденных 6 патентами РК на изобретения, опубликованной международной заявкой на патент РСТ (цитируется в Web of Science), 1 Евразийским патентом на изобретение.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- применение навесного ударно-роторного рабочего оборудования с инерционными бойками разной геометрической формы для разрушения льда и СЛО, позволяет эффективно очищать дорожное полотно от ледяного покрытия, оставляя само дорожное полотно неразрушенным;

- сопротивление льда сдвигающим касательным усилиям, как на гладкой, так и на шероховатой поверхности в среднем на 20% больше сопротивления льда отрыву, что свидетельствует о практической

невозможности удаления ледяной пленки чисто сдвигом, и требуется его разрушение (дробление) и очистка механическим способом, например, инерционными бойками;

- закономерности влияния изменения толщины и температуры ледяного покрытия дорожного полотна на изменение расхода мощности его дробления;

- при массе ударника $m=0,5$ кг и диаметре его сферической рабочей поверхности $r=0,03$ м полное разрушение льда толщиной $h_{\text{л}}=0,1$ м при температуре воздуха $t^{\circ}_{\text{в}}=20^{\circ}\text{C}$ происходит без касания и удара сферы о поверхность бетона, при этом энергозатраты на дробление льда и СЛО с поверхности автодорог уменьшаются до 25%, при сохранении производительности;

- на разрушение СЛО не влияет приложенная к нему сила, а влияет подведенная к нему кинетическая энергии и значение той ее части, которая тратится на совершение полезной работы дробления СЛО, т.е. преобразуется в потенциальную энергию напряжений, возникающих в теле СЛО в процессе его формоизменения, ведущего далее к разрушению или дроблению.

Во время обучения в докторантуре Бугаев А.Б. работал в должности младшего научного сотрудника выигранных в конкурсе МОН РК на 2018-2020г. госбюджетного проекта № АР 05130746 «Механизированный комплекс для очистки дорог и тротуаров в зимнее время» и на 2021-2023г. АР09260192 «Разработка инновационного фрезерно-роторного снегоочистительного рабочего оборудования с повышенной эффективностью работы».

Результаты исследований надлежащим методом оформлены и внедрены в рабочий процесс ВКФ ТОО «Евротехсервис К», г. Усть-Каменогорск.

Краткое содержание. В первой главе диссертации проведен анализ состояния вопроса борьбы с гололедом на дорогах и тротуарах и предшествующих исследований. Выполнен анализ патентно-технических решений роторных льдоскалывателей. Поставлены цели и задачи исследования.

Во второй главе дано теоретическое обоснование функционирования и моделирование рабочих органов для разрушения льда. Дано описание процесса взаимодействия рабочего оборудования инерционно-ударного действия с СЛО. Представлена механико-математическая модель внедрения сферического бойка в деформируемый ледяной слой. Представлена математическая модель ударно-силового взаимовлияния сферического ударника с упругодеформируемым ледяным слоем.

Третья глава посвящена методике экспериментальных исследований процесса разрушения льда инерционными бойками-ударниками льдоскалывателя. Даны этапы, задачи и общая схема экспериментальных исследований, методика проведения эксперимента в лабораторных условиях. Дана теоретико-эмпирическая модель зависимости разрушения ледового покрытия от параметров сферических бойков-ударников. Описаны результаты сравнительных форсированных испытаний на надежность рабочих секций льдоскалывателя со сферическими бойками на гибких тягах. Выполнена проверка соответствия теоретической модели соударения СЛО с инерционно-

ударными бойками рабочего оборудования льдоскалывателя теоретико-опытным путем. Даны результаты экспериментального исследования.

В четвертой главе дан обзор и рекомендации по разработке и выбору рациональной конструкции навесного ударно-роторного рабочего оборудования для разрушения снежно-ледяных образований.

Личный вклад диссертанта. Диссертационная работа выполнена автором лично, автор выполнил патентный анализ известных конструкций, обзор теоретических исследований в области льдоскалывающих машин.

Описал процесс взаимодействия рабочего оборудования инерционно-ударного действия с СЛО.

Разработал и исследовал теоретические модели и предпосылки для разработки рабочего льдоскалывающего оборудования инерционно-ударного действия. Разработал математическую модель ударно-силового взаимодействия сферического ударника с упругодеформируемым ледяным слоем. Разработал и изготовил экспериментальные стенды для форсированных испытаний рабочей секции льдоскалывателя и натурное рабочее оборудование для проверки эффективности опытного образца нового льдоскалывателя в естественных производственных условиях. Выполнил эмпирическую корректировку теоретических зависимостей. Провел натурные экспериментальные исследования навесного рабочего оборудования льдоскалывателя со сферическими бойками. Выполнил сравнительные форсированные испытания на надежность рабочих секций льдоскалывателя со сферическими бойками на гибких тягах.

Публикация и апробация работы. Основные положения диссертации опубликованы в 19 научных работах, в том числе в 2-х статьях, входящих в базу данных Scopus с процентилем выше 35 и одном патенте на изобретение, цитируемом в базе данных Web of Science, в 1 статье, рекомендованной Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, в 1 Евразийском патенте и в 8 патентах на изобретения РК, в 3-х зарегистрированных в НЦГНТЭ отчетах о НИР, в 2 статьях, входящих в реферативную базу РИНЦ. Во всех публикациях представлены материалы и результаты теоретических и экспериментальных исследований рабочего процесса механического скалывания ледяного покрытия на поверхности автомобильных дорог, дающие представления о процессах, протекающих как внутри ледяной массы, так и в зоне ее соприкосновения со сферическим ударником на гибкой тяге, позволяющие выбрать рациональные параметры рабочего процесса очистки дорог ото льда и конструктивные параметры рабочих органов роторных льдоскалывателей. Дополнительно материалы диссертации представлены в 4 тезисах международных научно-практических и научно-методических конференций.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: на VII Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана», ВКТУ, (2021);

на МНПОК «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №12), 18-19 июня 2020 г. МОН РК. Караганда: КарГТУ, 2020; на VI МНПК «Наука и образование в современном мире: вызовы XXI века»: (Секция 4, Технические науки). ОЮЛ «Бобек». Нур-Султан, 2020.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 189 страницах машинописного текста, состоит из обозначений и сокращений, введения, 4 разделов и заключения, включает 131 рисунок, 16 таблиц, список использованных источников из 128 наименований и 6 приложений.

Автор выражает благодарность коллективу кафедры «Дорожно-строительные машины» МАДИ и лично ее заведующему, Кустареву Геннадию Владимировичу за оказанную помощь и консультации при проведении экспериментальных работ, а также директору ТОО «Өскемен-Тазалық» А.Ж. Байгунусову и директору ВКФ ТОО «Евротехсервис К» В.К. Дыдышко за помощь и содействие в организации комиссии и внедрении опытного образца льдоскалывателя в производство.

Результаты исследования и основные выводы. Диссертация содержит новые научно-обоснованные результаты, использование которых обеспечивает решение важной прикладной задачи разработки методики расчета конструктивных параметров льдоскалывателя для механической очистки автомобильных дорог от ледяных покрытий, обеспечивающего эффективную скоростную очистку автомобильных дорог от снежно-ледяных образований с наименьшим потреблением энергии.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований рабочего процесса роторного льдоскалывателя со сферическими бойками на гибкой тяге позволяют сделать ряд общих выводов и практических рекомендаций по выбору параметров рабочих органов и режимов работы машин данного типа:

1. Разработана механико-математическая модель скалывания льда, позволяющая заранее правильно выбрать параметры и конструкцию скалывающих секций льдоскалывающей машины, работа которых будет максимально эффективна для текущего состояния льда, его толщины и прочности, при одновременном сохранении целостности дорожного полотна.

2. Сопротивление льда сдвигающим касательным усилиям, как на гладкой, так и на шероховатой поверхности в среднем на 20% больше сопротивления льда отрыву, что свидетельствует о практической невозможности удаления ледяной пленки чисто сдвигом и требуется его разрушение (дробление) и очистка механическим способом, например, вращающимися инерционными бойками;

3. На основании результатов экспериментов и их компьютерной обработки выполнена эмпирическая переработка исходной математической зависимости с выводом новой, уточненной теоретико-эмпирической формулы, связывающей параметры инерционных бойков льдоскалывателя со сферической ударной частью и характеристики СЛО.

4. Для эмпирической корректировки полученных теоретических формул и получения пригодных для практического использования зависимостей были проведены эксперименты по разрушению льда сферическими бойками с разной массой m и радиусом R рабочей поверхности, в результате которых была установлена зависимость толщины разрушаемого льда от массы сферического бойка и определены фактические напряжения, при которых происходило разрушение льда. Эти напряжения были использованы для эмпирической корректировки и уточнения теоретических зависимостей для расчета процесса разрушения льда ударом сферического бойка.

5. При работе сферического ударника по поверхности, не покрытой слоем льда, на ней остаются теневые следы от удара, но сама поверхность не разрушается, что подтверждает правильность выдвинутой диссертантом гипотезы о возможности разрушения слоя льда на поверхности автомобильных дорог без разрушения самой поверхности дороги.

6. Было выявлено, что во всех циклах экспериментов фактическая толщина h разрушаемого льда в 7...8 раз больше расчетной глубины w проникновения бойка в лед, и на этой основе получены дополнительные расчетные зависимости для определения массы и скорости соударения сферического бойка, необходимых для разрушения льда заданной толщины.

7. Результатом плановых испытаний ОПО стали зависимости (графики): изменения усилия дробления СЛЮ от массы бойка РО; от скорости разработки; изменения момента сопротивления дробления СЛЮ от его высоты; корректировки динамической силы разрушения от толщины СЛЮ; ударной мощности от толщины СЛЮ и льда, веса бойка и температуры. При проверке адекватности теоретической модели расхождение теоретических и экспериментальных результатов было в пределах 5 - 15%;

8. Выбор рационального конструктивного комплектования различными бойками РО льдоскалывателя по уточнённой методике позволяет уменьшить до 25% энергозатрат на дробление и смет СЛЮ с поверхности автодорог, при неизменной производительности и полной сохранности дневного слоя дорог.

9. Промышленная проверка соответствия математической модели соударения инерционных бойков и СЛЮ показала, что в варианте вращения приводного вала льдоскалывателя вместе со сменными секциями и инерционными бойками навстречу рабочему направлению, мощность, направленная на дробление СЛЮ, в 2-3 раза ниже, чем при обратном вращении.

10. Принятые в плановом эксперименте по сбрасыванию шара-бойка показатели, такие, как его масса $m=0,5$ кг и диаметр рабочей сферической части $d=0,05$ м, позволяли полностью разбить СЛЮ высотой $h_{\text{л}}=14$ мм, при окружающей температуре до $t^0_{\text{в}}=-20^{\circ}\text{C}$, за одно соударение, при падении шара с высоты $h_{\text{ш}}=1200$ мм, что соответствует частоте вращения РО $n=360$ об/мин, а частоте $n=883$ об/мин, соответствует двукратному падению шара с высоты $h_{\text{ш}}=700$ мм, причём шар разбивает лед практически не достигнув дорожного

покрытия, т.е. экспериментально подтверждается возможность разбивания и смета СЛО с поверхности дороги без разрушения ее поверхностного покрытия инерционным бойком льдоскалывателя.

11. Двукратное попадание инерционного бойка в предыдущую лунку, достигаемое при снижении скорости базовой машины или увеличении скорости вращения вала привода, влечет за собой уменьшение в 1,3 раза скорости ударника (или частоты вращения вала привода РО), что позволяет корректировать и снизить общие энергозатраты на уборку СЛО.

12. Снежно-ледяные образования, включая тонкие ледяные пленки толщиной до 3 мм, образующиеся в результате замерзания талой или дождевой воды, успешно разрушаются навесным цепным рабочим органом со сферическими бойками, который позволяет эффективно удалять с дорожного покрытия снежно-ледяной накат толщиной до 15 мм за один проход базовой машины со стандартной скоростью вращения вала привода.

13. Большое влияние на процесс разрушения льда оказывает такой параметр ударника, как радиус рабочей сферической поверхности, при увеличении которого эффективность разрушения льда снижается. При длине гибкой связи (цепи) сферического бойка 0,2 м, радиус сферы бойка рекомендуется выполнять в пределах 0,05...0,03 м.

14. При массе ударника $m=0,3$ кг, при диаметре сферической рабочей поверхности $r=0,03$ м, лед толщиной до $h_{\text{л}}=0,08$ м при температуре воздуха $t^{\circ}_{\text{в}}=-20^{\circ}\text{C}$, полностью разрушается без проникновения падающего шара до поверхности бетона, т.е. экспериментально подтверждается возможность избежания разрушения покрытия дороги при использовании ударника со сферической рабочей поверхностью.

15. Лед толщиной до 15 мм разбивается за 1 проход ударником $m=0,5$ кг с размахом бойков до стандартных внешних габаритов ворса дорожной щетки и максимальных оборотах вала отбора мощности трактора. В ином случае необходимо увеличивать массу сферического (шарового) ударника и, соответственно, его радиус. Для очистки снежно-ледяных образований, в отличие от сплошного ледяного покрытия, звенья рабочего органа со сферическими шарами-ударниками можно чередовать на валу с пустыми вставками без шаров, что обеспечивает большую производительность машины и меньшее энергопотребление.

16. На разрушение СЛО не влияет приложенная к нему сила, а влияет подведенная к нему кинетическая энергия и значение той ее части, которая тратится на совершение полезной работы дробления СЛО, т.е. преобразуется в потенциальную энергию напряжений, возникающих в теле СЛО в процессе его формоизменения, ведущего далее к разрушению или дроблению. При толщине льда 15 мм и более, массы бойка-ударника $m=0,5$ кг, вращаемого при стандартных оборотах вала привода трактора МТЗ-80, для эффективного разрушения СЛО недостаточно, поэтому для достижения эффективного дробления легче увеличить скорость вращения вала привода, а если такой возможности нет, то придется увеличивать массу бойков или снизить скорость движения трактора, что может увеличить общий расход энергии.

17. При работе льдоскалывателя со сферическим ударником для очистки поверхности автомобильных дорог от снежно-ледяных образований доказано соблюдение требуемого физического условия прочности: максимальные расчетные напряжения (напряжения в опасной точке МКЭ), возникающие в асфальтобетоне после удара сферического бойка по лежащему на нем льду, меньше предельных напряжений асфальтобетона, поэтому он останется целым и прочным, в то время как слой льда будет разрушен, так как эти же максимальные рабочие напряжения, после удара бойков, больше значений предельных напряжений льда.

18. По выведенной теоретико-эмпирической формуле проведены расчеты массы ударника для тех же значений толщины слоя льда, что и в экспериментах, при которых происходило разрушение СЛЮ при однократном ударном воздействии. Расхождение результатов теоретических расчетов оказалось очень малым в сравнении с экспериментальными результатами (максимальная пиковая погрешность – 15,6%).

19. На основе модификации известной классической модели Буссинеска получено замкнутое решение новой контактной задачи теории упругости о давлении сферического бойка на двуслойное основание (лед на асфальтобетонном покрытии) конечной толщины, жёстко связанное с недеформируемой бесконечной средой.

20. Полученные эмпирико-теоретические зависимости и предложенная методика расчета позволяют решать различные задачи по определению параметров рабочего органа ударного действия со сферическими бойками, как при его проектировании, так и в процессе работы.

Направление дальнейших исследований. Дальнейшую работу в направлении продолжения разработки перспективной конструкции рабочего оборудования роторного льдоскалывателя пониженной энергоемкости следует развивать по следующему направлению:

- определение новых, наиболее перспективных путей совершенствования рабочего оборудования роторного льдоскалывателя для снижения энергоемкости и тягового сопротивления на 30–40% и повышение производительности на 20 – 30%, в том числе:
- изменение формы и крепления сферических или других ударников;
- разработка конструкции и изготовлением новых экспериментальных и опытно-конструкторских образцов и моделей;
- разработка методики и проведение экспериментальных работ;
- разработка методов аналитического расчета конструкции, их оптимизация и определение эффективности.

Разработка эскизного проекта инновационного рабочего оборудования роторного льдоскалывателя, с возможностью коммерциализации результатов работы на территории Республики Казахстан.