

М. В. Дудкин, С. Н. Фадеев, С. Ю. Пичугин,

Восточно-Казахстанский государственный
технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

МЕТОДИКА РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРЫТИЯ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ РАБОЧИМ ОРГАНОМ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Аннотация. Работы по содержанию несущих поверхностей дорог в зимний период отличаются высокой трудоёмкостью, производятся на больших площадях, в сложных, изменяющихся климатических условиях. С этой целью обычно используют машины с плужным или фрезерным рабочим органом. Их минус в том, что при использовании режущих и колющих рабочих органов трудно убрать тонкий лёд в нижнем слое его образования, не повредив при этом верхний слой дорожного покрытия. Разработанный рабочий орган ударного действия обладает небольшой энергоёмкостью, потому что лёд, как хрупкий материал, хорошо им колется, но при этом дорожное покрытие остается целым, так как силы удара молотка не хватает для разрушения дорожного покрытия. В статье приведен анализ работоспособности рабочего органа льдоскалывающей машины и сделан расчет основных параметров эффективности работы. Проведена проверка достоверности экспериментальных данных, полученных при испытаниях натуральных образцов специального рабочего органа ударного действия.

Ключевые слова: скалывание, рабочий орган, лёд, льдоскалывающая машина.



Түйіндеме. Жұмыс мазмұны жағынан климаттық жағдайдың өзгеруіне байланысты қыс кезінде ауқымды жерлерде жол үстіндегі жүргізілетін жұмыстың қиыншылығымен ерекшеленеді. Осы мақсатта әдетте соқа немесе фрезер жұмыс органыбар машина қолданылады. Оның тиімсіз жағы кескіш және тікенекті жұмыс органымен жолдың үстіңгі бетінде пайда болған мұзды тазалау қиын. Өзірленген соққы әрекеті арқылы жүргізілетін жұмыс органының энергия сымдылығы үлкен емес, себебі мұз сынғыш материал

ретінде жолдың үстіңгі бетін бүлдірмей сақтайды. Балға соққысының күші жолдың беткі бөлігін бүлдіруге күші жетпейді. Мақалада мұз жарғыш машинаның жұмыс органдарының жұмысқа қабілетінің талдауы келтірілген және жұмыс тиімділігі есебінің негізгі параметрлері жасалған. Арнайы жұмыс органдарының соққы әрекетінің сынақ кезіндегі алынған тәжірибелік тексерулері көрсетілген.

Түйінді сөздер: жару, жұмыс органы, мұз, мұз жарушы машина.



Abstract. The work on content of carrying surfaces of roads in winter period differs with the high laboriousness, is carried out over the large areas, in difficult, changing climatic conditions. For this purpose usually use machines with plough or milling working body. Their disadvantage is if you are using cutting and stitching working bodies it is hard to remove thin ice on the bottom layer of its formation without damaging the upper layer of the road cover. The developed working body of the impact action has a small energy capacity because ice as the brittle material, is breaking well with it and the road cover remains intact, such as power of the impact hummer is not enough to break road cover. The article contains analysis of efficiency of working body of ice breaking machine and calculation of the basic parameters of efficiency. It was carried out the checking of authenticity of experimental data, obtained in tests of natural samples of special working body of the impact action.

Key words: breaking, working body, ice, ice breaking machine.

Введение. За последние годы в Казахстане наблюдается значительное увеличение числа автомобильного транспорта. Однако наряду с этим более отчетливо проявляются и некоторые отрицательные тенденции автомобилизации, наиболее важной из которых является значительное число дорожно-транспортных происшествий (ДТП). На количество ДТП влияет множество факторов, главнейшим из которых является состояние дорожного покрытия. Уменьшение сцепления колеса с дорогой вследствие наличия на ней гололеда приводит к увеличению тормозного пути и безопасного радиуса поворота в 3-9 раз.

В зависимости от структуры отложения снежно-ледяных образований различают следующие виды обледенения: гололед, зернистая изморозь, кристаллическая изморозь, замерзшая роса, иней, замерзший мокрый снег и другие. Из перечисленных видов наземного обледенения наибольшее практическое значение для безаварийного движения транспорта имеют гололед, кристаллическая изморозь и замерзший мокрый снег.

В настоящее время существует несколько методов борьбы с этим явлением. Например, распределение химических реагентов, механическое скалывание льда и уплотненного снега, а также использование дорожно-строительной техники, которая зачастую вместе со снежно-ледяными образованиями срезает и верхний слой дорожного покрытия.

Нельзя не отметить также сложности уборки от образовавшейся наледи дворовых территорий, пешеходных дорожек, остановочных площадок общественного транспорта и т.д. Ежегодно только по причине зимней скользкости в травматические пункты обращается свыше 10 тыс. человек. Связано это с тем, что при низких температурах и большой толщине льда ручными способами невозможно эффективно бороться с обледенелостью. Чаще известными способами скалывается верхний, толстый слой льда, а нижний, тонкий слой в виде ледяной пленки остается на дорожном покрытии. Именно этот слой наиболее опасен и практически не убирается как на автомобильных дорогах, так и в местах движения пешеходов. Уменьшить травматизм от падения людей при движении по городским маршрутам, а также от случившихся вследствие скользкого льда аварий можно лишь с применением механизированных методов борьбы с наледью в местах движения пешеходов, которые при полной уборке льда не разрушают целостности очищаемой поверхности.

Работы по содержанию несущих поверхностей дорог в зимний период отличаются высокой трудоёмкостью [1-7], производятся на больших площадях, в сложных, изменяющихся климатических условиях. Для снижения доли энергозатрат и более качественной очистки дорог лёд необходимо подвергать предварительному разрушению. С этой целью обычно используют машины с плужным или фрезерным рабочим органом. Их минус в том, что при использовании режущих и колющих рабочих органов трудно убрать тонкий лёд в нижнем слое его образования, не повредив при этом верхний слой дорожного покрытия. Разработанный рабочий орган ударного действия обладает небольшой энергоёмкостью, потому что лёд, как хрупкий материал, хорошо им колется, но при этом дорожное покрытие остается це-

лым, так как силы удара молотка не хватает для разрушения дорожного покрытия.

Цель работы – обоснование конструктивных параметров на основе проведенных исследований рабочего органа ударного действия, предназначенного для удаления льда без повреждения поверхности автомобильных дорог.

Методы исследований. В теоретической части работы применены методы математической статистики, методы нелинейного программирования и математического моделирования на ЭВМ. Экспериментальные исследования проведены в натуральных условиях как на рабочих органах, так и на их отдельных элементах.

Основные результаты. По результатам исследований разработаны рекомендации для повышения эффективности применения льдоуборочных машин с предлагаемым рабочим органом, для уборки льда с поверхности асфальтобетонных дорог на базе существующих машин для зимнего содержания дорог. Кроме того, результаты использованы при модернизации существующих образцов льдоуборочных машин, а также при разработке перспективных проектно-конструкторских решений.

Одной из актуальных проблем в зимний период в умеренном климатическом поясе является борьба с обледенением на автодорогах и тротуарах. В настоящее время существует несколько методов борьбы с этим. Например, распределение химических реагентов [3], механическое скалывание льда и уплотненного снега, а также их удаление плужными и роторными рабочими органами.

При химическом способе на дорожное покрытие наносятся реагенты, при помощи которых происходит разрушение льда. Но в то же время эти реагенты оказывают негативное воздействие на транспортные средства и асфальтобетонное покрытие дороги (тротуара), разъедая и разрушая целостность поверхностного слоя. Также страдает от этого и экология.

При механическом способе удаления льда наиболее часто используются скалыватели в виде отвала, либо убирают лед вручную, с использованием лома или железной рукояти с наконечником в виде заостренной пластины, которые в процессе

работы повреждают несущее покрытие дорог. При этом машины с отвалом не удаляют тонкие слои льда и легко могут повредить дорожное покрытие. Они обладают крупными габаритами, не могут обеспечить необходимую качественную уборку от снежно-ледяного образования на тротуарах и в труднодоступных местах. Ручные ударные инструменты требуют непосредственной физической силы человека и неэффективны вследствие низкой производительности. Поэтому возникает необходимость разработки таких рабочих органов для разрушения льда на дорогах и тротуарах, которые эффективно убирают лед и при этом не повреждают поверхность под ним.

После проведенного анализа условий эксплуатации и существующих рабочих органов было принято решение разработать рабочий орган для малогабаритной самоходной установки, способной разрушать снежно-ледяное образование, не повредив покрытие дорог и тротуаров.

Исследования физико-механических свойств льда позволяют сделать следующие выводы:

1. Лед по своим физико-механическим свойствам может быть отнесен к квазиизотропным твердым телам, обладающим упругопластическими свойствами, и имеет характерные отличия от других материалов. При действии ударных нагрузок лед ведет себя как хрупкое тело. Это объясняется тем, что для льда характерны в отличие от большинства твердых тел неоднородность структуры, наличие трещин и пор. Поэтому классические методы расчета прочности льда не всегда соответствуют физической картине его сопротивляемости действующим нагрузкам.

2. Величины пределов прочности льда при различных деформациях неоднозначны, так как сопротивляемость льда действующим нагрузкам зависит от условий формирования ледяного покрова.

Установлено [8], что сила резания по свободной схеме на 45-50 % меньше силы заблокированного резания и на 25-30 % – полублокированного. Считается, что каждая заблокированная сторона увеличивает суммарное сопротивление резания на 40 %. Данные показатели объясняются тем, что в боковых частях про-

рези удельное сопротивление значительно меньше, чем перед лобовой частью.

Анализируя технические решения рабочих органов и оборудования (рис. 1) для механического разрушения снежно-ледяных образований на покрытиях автомобильных дорог [11, 12], можно утверждать, что в новых конструкциях использованы научные и конструкторские достижения в области процессов разрушения многих отраслей техники: горного дела, металлообработки, разрушении мерзлых грунтов и т. д.



Рис. 1. Классификация рабочих органов для разрушения уплотненного снега

На основании сравнительного анализа и синтеза существующих устройств была предложена и разработана конструкция рабочего органа вращательно-ударного действия (рис. 2). Рабочий орган размещается на малогабаритном самоходном шасси, имеет устройство регулирования высоты положения рабочего органа относительно очищаемой поверхности и работает следующим образом: вращаясь и двигаясь с определенной скоростью вдоль очищаемой поверхности, ударный ротор, представляющий собой конструкцию из дисков, между которыми распо-

ложены молотки, взаимодействует с ледяной или уплотненной снежной поверхностью.

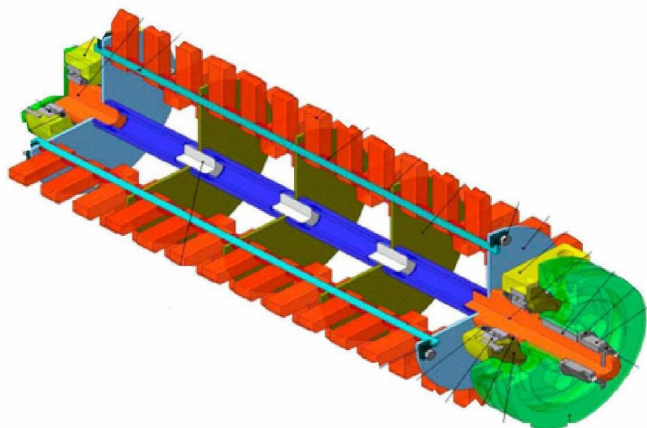


Рис. 2. Рабочий орган ударного действия

При вращении ударного ротора молотки, установленные на оси с зазором, совершают ударное воздействие на поверхность ледяного или уплотненно-снежного образования, разрушая его за счёт центробежной силы, приводящей молотки в рабочее состояние, и их кинетической энергии, которая превышает прочность льда, но которой недостаточно для разрушения асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог. Сила инерции молотка, необходимая для разрушения льда, возникает за счет вращения массы молотка и угловой скорости движения ударного ротора. Расположение молотков один возле другого или в шахматном порядке обеспечивает разрушение слоя снежно-ледяного образования на поверхности тротуара или дороги по всей ширине рабочего органа. При изменении скорости вращения ударного ротора и скорости перемещения его вдоль очищаемой поверхности регулируются качество и степень очистки.

Конструкторские работы по созданию рабочих органов по разрушению снежно-ледяного образования на покрытиях дорог велись во многих университетах мира. Наиболее доступны для практического использования разработки российских ученых и инженеров. В Казахстане похожие работы велись на кафедре технологических машин ВКГТУ им. Д. Серикбаева профессорами М. В. Дудкиным, Г. А. Гурьяновым, доцентом А. В. Вавиловым, исследователями Р. В. Краснобаевым, А. С. Сергеевым, А. И. Ким. На основе выводов и рекомендаций, выполненных на кафедре работ, была сконструирована, разработана, собрана и испытана самоходная машина для очистки дорог от снежно-ледяных образований. Этапы проектирования и моделирования машины представлены на рис. 3.



Рис. 3. Этапы конструирования от модели до натурной машины

Разработка льда, находящегося на поверхности дорог, при помощи рабочего органа ударного действия имеет ряд особенностей, обусловленных физико-механическими свойствами льда и дорожной одежды, кинематическими параметрами рабочего процесса и координатами расположения рабочего органа относительно снежно-ледяного покрова в процессе его удаления.

Для определения параметров взаимодействия снежно-ледяных образований автомобильных дорог и городских территорий с рабочим органом ударного действия льдоскалывающей машины рассмотрим общие картины динамики удаления льда с

поверхности дорог и условия получения расчётных зависимостей, обеспечивающих выбор рациональных параметров, таких, как размеры рабочих органов и режимы технологии уборки ледяных образований [9, 10].

Весь процесс разработки льда можно разделить на два относительно независимых процесса [8]: взаимодействие рабочего органа со льдом и взаимодействие рабочего органа с асфальтобетонной поверхностью. Причём параметры рабочего органа и режимы его эксплуатации в обоих случаях взаимодействия будут идентичны.

Цель исследований – определение таких параметров рабочего органа и его режимов работы, при которых достигается максимально эффективное удаление снежно-ледяных образований с поверхности автомобильных дорог при обязательном соблюдении целостности дорожной одежды и тротуаров. Результаты многочисленных исследований [1, 6] указывают на то, что наиболее сложными при разрушении являются твёрдый ледяной налёт и гололёд, имеющие прочность при температуре 0°C до 2,86 МПа и величину адгезии к асфальтобетонной поверхности до 2 МПа.

При вращении шарнирно-свободно размещенного на торцевом диске инерционного бойка вокруг оси приводного цилиндра (рис. 4) он по высоте позиционируется до касания с поверхностью несущего слоя автомобильной дороги.

Ледяной слой расположен выше этой точки, поэтому боёк врежется в разрабатываемую среду с некоторой

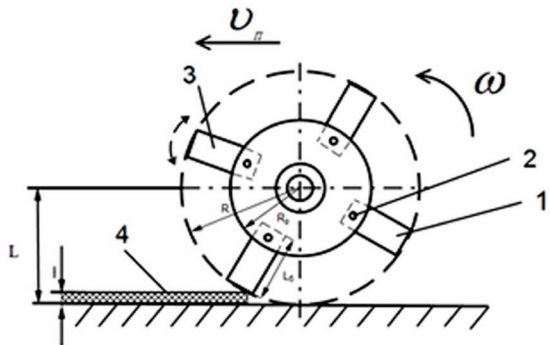


Рис. 4. Расчетная схема механизма рабочего органа

силой F , равной геометрической сумме силы тяжести бойка G_6 и центробежной силы C_6 , возникающей при вращении бойка:

$$F = C_6 + G_6 \quad (1)$$

Выражение можно записать в виде:

$$F = \sqrt{\left(\frac{m_6 v_c^2}{R}\right)^2 \pm (m_6 g)^2 \pm \frac{m_6 v_c^2}{R} m_6 g \cos \varphi}, \quad (2)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

m_6 – масса бойка, кг.

При построении математической модели взаимодействия снежно-ледяных образований со специальным рабочим органом ударного действия были сделаны следующие допущения [5]:

— снежно-ледяные образования представляют собой ровную горизонтальную поверхность как со стороны контакта с асфальтобетонной поверхностью автомобильной дороги, так и со стороны свободной поверхности;

— физико-механические свойства снежно-ледяных образований считаем постоянными по всей трассе движения льдоскалывающей машины, температуру ледового образования принимаем равной температуре окружающей среды, изменение температуры по толщине льда считаем отсутствующим в связи с относительно малой толщиной льда. Свойства льда (прочность, твёрдость и другие), связанные с изменением температуры, также считаем постоянными;

— движение льдоскалывающей машины считаем прямолинейным, а вращение рабочего органа, кроме специально оговорённых случаев, равномерным.

В реальности лёд, образующийся на поверхности дорог, по своему составу и структуре неоднороден. Кроме того, на силу удара будет влиять также и форма самого бойка. Поэтому выражение для определения ударной силы бойка будет иметь вид:

$$P_{y\delta} = K_1 \cdot K_2 \cdot P_{\max} = K_1 \cdot K_2 \cdot v_c \sqrt{2\pi L_{\min} m_6 \sigma_B}, \quad (3)$$

где $K_1 = P_{\max} / P_{\text{э}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий физико-механические свойства льда при ударе;

$P_{\text{Э}}$ – эталонная сила удара;
 $K_2 = (1 + b_1/2h)$ – коэффициент, учитывающий тип ударной кромки;

b_1 – длина ударной кромки, м;

h – толщина разрабатываемой среды, м;

L_{min} – минимальное расстояние от ударной кромки бойка до его центра тяжести, м;

$\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности разрабатываемой среды, МПа.

Общая сила резания льда бойком рабочего органа ударно-вращательного действия может быть определена из следующего выражения:

$$P_{\text{рез}} = \frac{C_0}{\text{tg}\beta} P_{\text{Э}} h_1^{0.47} \frac{b_1}{K_{\text{нер}}} (1 + kt)(1 + \xi v_c) \left(1 + 4h_1 \sqrt{\frac{C_0 \pi}{(1 - 2\mu) \text{tg}\alpha}} \right), \quad (4)$$

где $P_{\text{Э}}$ – эталонная сила удара, Н;

k – коэффициент, учитывающий изменение прочностных свойств льда в зависимости от температуры, равный 0,04 Н/град.;

ξ – коэффициент, учитывающий изменение прочностных свойств льда при разной скорости v_c приложения нагрузки, равный Н/(м/с);

β – угол скола льда, град.;

μ – коэффициент Пуассона льда, равный 0,36;

b_1 – ширина режущей кромки бойка;

h_1 – высота срезаемого слоя, м;

t – температура окружающей среды, град.

По величине скорость разработки определяется геометрической суммой окружной скорости вращения рабочего органа (по ударной кромке бойка) ωR , (причём величина R определяется с учётом изгиба каждой упругой связи), и скорости поступательного движения льдоуборочной машины $v_{\text{п}}$ (скорости подачи). По правилу параллелограмма скорость разработки будет равна:

$$v_c = \sqrt{v_{\text{п}}^2 \pm \omega^2 \cdot R^2 \pm 2 \cdot \omega \cdot R \cdot v_{\text{п}} \cdot \cos \varphi}. \quad (5)$$

Одной из основных характеристик рабочего органа ударно-вращательного действия, влияющей на параметры ледового ско-

ла и на сохранность дорожного основания, является масса бойка. Данная величина определится из следующего соотношения:

$$m_b = \frac{2\pi h_p^3 \rho_p}{3 \left(\frac{v_c}{v_p} + 1 \right)}. \quad (6)$$

Таким образом, мощность, затрачиваемая на разрушение удаляемой среды, может быть определена как произведение крутящего момента на скорость вращения рабочего органа ударного действия, а мощность на создание тягового усилия – как произведение скорости движения машины на величину этой силы.

$$N_{разр} = v_p P_T + \omega M_{кр} \quad (7)$$

Эксперименты проводились как на натуральных образцах рабочего органа, так и на их моделях (рис. 5). Экспериментальные исследования состояли из 3-х этапов: изучение характеристик обледенелостей как разрабатываемой среды; проверка предложенной модели разработки льда единичным бойком; проверка математической модели всего рабочего органа в целом.



Рис. 5. Проведение эксперимента по очистке дорог от снежно-ледяных образований

Измерениям подвергались высоты неровностей чистой поверхности дорог, а при наличии на ней льда и снежного наката измерения проводились с использованием стандартного нивелира. При этом учитывались величины эталонных сил удара и поправочных коэффициентов.

Анализ полученной информации и проведённые постановочные эксперименты выявили 5 факторов, формирующих силу сопротивления разработки льда. Такое количество факторов заставляет отказаться от классической схемы эксперимента для определения численных значений, базовой математической модели взаимодействия специального рабочего органа ударного действия со льдом и уплотнённым снегом. Поэтому для решения данной задачи пришлось применить методы и приёмы теории планирования эксперимента.

Проведена проверка достоверности экспериментальных данных, полученных при испытаниях натуральных образцов специального рабочего органа ударного действия на воспроизводимость результатов по критерию Кохрена и на адекватность математической модели по критерию Фишера (рис. 6). В ходе проверки установлена достоверность результатов по обоим критериям.

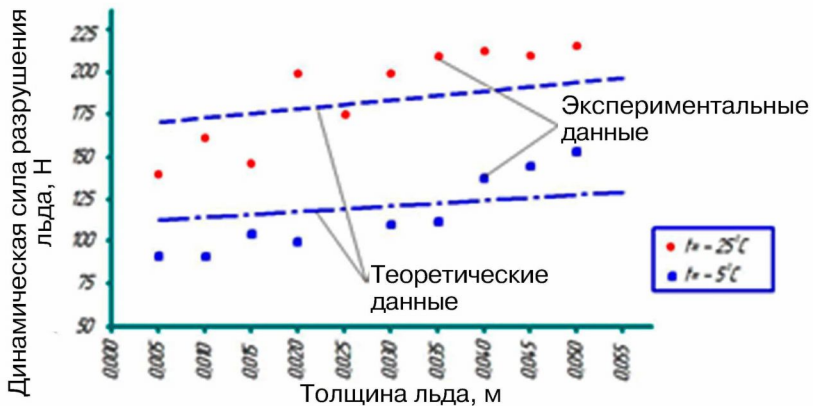


Рис. 6. Сравнение теоретических и экспериментальных исследований

Выводы

1. Разработана математическая модель взаимодействия рабочего органа ударного действия со льдом и снежно-ледяным накатом на дорожных покрытиях.
2. Спроектирована и разработана конструкция машины для скалывания льда с поверхности дорог без повреждения верхнего слоя асфальтового покрытия.
3. Проведено экспериментально-теоретическое исследование процесса разрушения льда при выбранной схеме разработки. Среднеквадратичное отклонение от исследуемых параметров составило 12-28 %.
4. Результаты исследования в дальнейшем будут использованы при модернизации существующих образцов льдоуборочных машин, а также при разработке перспективных проектно-конструкторских решений.

Список литературы

- 1 *Воскресенский Г.Г.* Исследование процесса резания уплотненного снега на автодорогах. // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 12. – С. 45-48.
- 2 *Коробов И.Б.* Методика выбора конструктивных параметров вибрационного рабочего органа для разрушения льда на поверхности дорог: автореф. канд. дис. Нижний Новгород, 2005. – 21 с.
- 3 *Куляшов А.П., Молев Ю.И., Шапкин В.А., Щепетов А.В.* Современные методы разрушения льда. – М.: Компания «Спутник», 2005. – 135 с.
- 4 *Линьков С.А.* Разработка конструкций и обоснование параметров рабочего органа для бурения скважин в мерзлых грунтах: автореф. канд. дис. – Омск, 2007. – 22 с.
- 5 *Одинокое В.И., Сергеева А.М.* Математическое моделирование одного нового процесса разрушения ледяного покрова // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – № 2. – С. 139-146.

6 *Козин В.М., Онищук А.В., Марьин Б.Н., Иванов Ю.Л., Позык Н.Г., Шпорт В.И.* Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 191 с.

7 *Ганжа В.А.* Разрушение снежно-ледяных образований механическим способом: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 191 с.

8 *Ninon W.A., Gawronski T.J., and Whelan A.E.* Development of a Model for the Ice Scraping Process // Iowa Dept. of Transportation, Project HR361

9 *Wooseung Jang, James S. Noble, Thomas Hutsel.* An integrated model to solve the winter asset and road maintenance problem Journal: Iie Transactions. – 2010. – Vol. 42, no. 9. – P. 675-689, 2010.

10 *Nathalie Perrier, André Langevin, Ciro-alberto Amaya.* Vehicle Routing for Urban Snow Plowing Operations // Transportation Science. – 2008. – Vol. 42, no. 1. – P. 44-56.

11 *Nathalie Perrier, André Langevin, James F. Campbell.* A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part III: Vehicle routing and depot location for spreading // Computers & Operations Research – CoR. – 2007. – Vol. 34, no. 1. – P. 211-257.

12 *Gurkan Erdogan, Lee Alexander, Rajesh Rajamani.* Closed-loop snowplow applicator control using road condition measurements // Vehicle System Dynamics. – VEH SYST DYN. – 2011. – Vol. 49, no. 4. – P. 625-638.

Дудкин Михаил Васильевич, декан факультета,
доктор технических наук

Фадеев Сергей Николаевич, докторант PhD
тел. 8 701 9779297

Пичугин Сергей Юриевич, докторант PhD
тел. 8 7056727339