



Анализ способов борьбы с льдообразованием



Любовь СЛАДКОВА
Lubov A. SLADKOVA

Алексей НЕКЛЮДОВ
Alexey N. NEKLUDOV



Андрей КУЗНЕЦОВ
Andrey N. KUZNETSOV

Сладкова Любовь Александровна – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.
Неклюдов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой путевых, строительных машин и робототехнических комплексов РУТ (МИИТ), Москва, Россия.
Кузнецов Андрей Николаевич – аспирант РУТ (МИИТ), Москва, Россия.

Analysis of Methods to De-Ice Roads
(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p. 187)

Используя полученные материалы о прочностных характеристиках льда, авторы анализируют способы разрушения льда, исходя из его свойств и поведения в различных условиях. Установлено, что тепловое воздействие (плавление, паровое и газотермическое) может считаться наиболее невыгодным с позиции энергозатрат.

Химическое разрушение льда ведёт к коррозионному воздействию на дорожное покрытие, автотранспорт и отрицательно влияет на людей и окружающую среду. Многие другие способы (электрофизические, электрогидравлические, электромагнитные) находятся на стадии научных разработок. Самым выгодным с точки зрения простоты конструкции, энергозатрат, экологичности и экономичности остаётся механический способ разрушения льда (удар, снижение давления под ледяной коркой, резание, скол, бурение). Предлагаемая в статье конструкция адаптера для борьбы с льдообразованием отличается прежде всего простотой изготовления и обслуживания.

Ключевые слова: транспорт, дорожное покрытие, лёд, способы борьбы, льдообразование, гололёд, гололедица, температура, свойства льда, аварийные риски, безопасность.

Одной из особенностей транспорта является зависимость его функционирования от природных факторов, в частности, от метеорологических условий, которые могут значительно осложнить и даже приостановить работу транспорта. К метеорологическим условиям, оказывающим негативное влияние, могут относиться: температура окружающей среды, влажность воздуха, ветер, осадки, туманы, грозы, высота снежного покрова и т.п. Они определяют дальность видимости, ухудшают сцепные качества шин с дорожным покрытием. Это влияние может быть как длительным, так и кратковременным. Например, отрицательная температура и наличие снежного покрова являются условиями длительного влияния, а осадки, туман, гололёд – кратковременного.

СКОЛЬЗКАЯ ТЕМА

Скользкие дороги, согласно статистике, одна из главных причин автотранспортных аварий и катастроф. По различным данным до 15–70 % случаев дорожно-

Характеристики интенсивности наземного обледенения

Характеристика	Тип обледенения		
	Гололёд	Изморозь	Обледенелый мокрый снег
Слабый	1–5 мм	1–49 мм	1–10 мм
Умеренный	6–19 мм	>50 мм	11–34 мм
Сильный	>20 мм	–	>35 мм

транспортных происшествий на автомобильном транспорте в зимний период обусловлены или сопровождаются явлениями обледенения. Например, среднее количество гололёдных дней в году для столицы составляет 51 день (приложение к постановлению правительства Москвы от 27 ноября 2001 г. № 1063-ПП).

Следует различать понятия «гололёд» и «гололедица». Гололёд – слой льда, образующийся в результате выпадения дождя, ледяного дождя или мороси, он возникает на любых предметах и поверхности земли как при отрицательных температурах, так и при температуре воздуха до $+3^{\circ}\text{C}$, если дорожное покрытие ещё не успело прогреться после «минуса». В 95 % случаев появление гололёда происходит при температуре воздуха, приближающейся к 0°C , и относительной влажности воздуха от 80 до 100 %. Гололедица же – результат замерзания дождевой или талой воды, покрывающей землю. Этот вид наземного обледенения представляет особую угрозу для транспорта. Зернистая изморозь – снеговидный, рыхлый осадок матово-белого цвета, образующийся на проводах, сучьях деревьях, отдельных травинках, отличается от гололёда кристаллической структурой. Образование её наблюдается при мелких каплях переохлаждённого тумана. Отложение мокрого снега – ледяная масса, по внешнему виду напоминающая очень плотную изморозь или гололёд.

Степень интенсивности наземного обледенения принято характеризовать общей толщиной льда, которая создаётся за определённый промежуток времени (см. таблицу 1). При возникновении скользкости коэффициент сцепления шин с поверхностью дороги уменьшается до 0,08–0,15, что приводит к резкому снижению безопасности движения.

Согласно данным метеостатистики, приведённым на сайте <http://thermo.karelia.ru/>, в Москве с 1948 по 2015 год пять

месяцев в году имели отрицательную среднемесячную температуру.

Снежный покров в зависимости от его высоты и состояния может представлять опасность для транспорта. Наличие снега на проезжей части высотой в 3–5 см уже вызывает необходимость уменьшения скорости движения, а при высоте свыше 25 см движение становится невозможным. К созданию снежного наката со скользкой поверхностью приводит уплотнение снега колёсами движущихся автомобилей.

ЛЁД И ПЛАМЁНЬ

Рассмотрим лёд как объект борьбы с гололёдными явлениями. Из курса физики и химии в школе известно, что лёд – это твёрдое состояние воды, молекулярная формула которой H_2O . Несмотря на кажущуюся простоту этого вещества и повседневный привычный контакт с ней человека, о воде в любом её состоянии мы знаем очень мало.

В современных научно-технических и публицистических источниках [1–4], основываясь на результатах анализа спектра инфракрасного поглощения, рентгеновских, электронно-микроскопических и многих других исследований, учёные приводят некие общие сведения о молекуле воды. Молекула *воды* представляет собой два атома водорода, удалённых от атома кислорода на $0,96 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8}\text{см}$), располагающихся от него в направлениях, образующих между собой 105° . Причём радиусы атомов кислорода равны $1,4 \text{ \AA}$, а водорода – $1,2 \text{ \AA}$. Таким образом, состояние воды определяется двумя термодинамическими переменными: температурой и давлением.

Лёд имеет гексагональную кристаллическую структуру, и молекулы воды выстраиваются в нём в шестиугольник. Вспомним, что молекула воды имеет форму шара с двумя бугорками. В кристалле льда молекула воды ориентируется так,



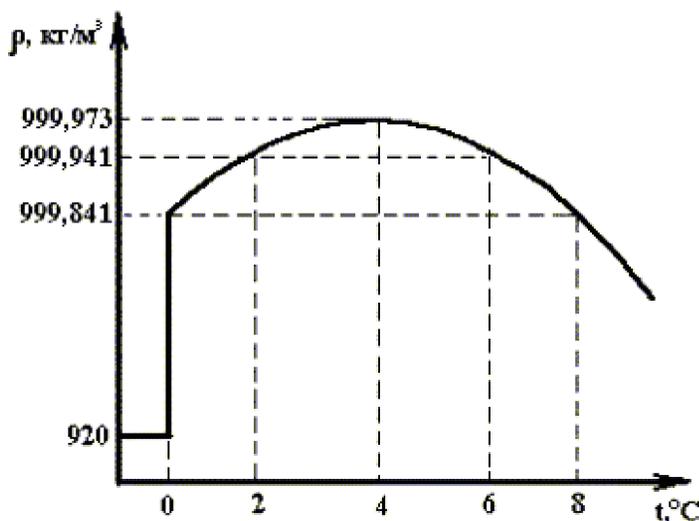


Рис. 1. График зависимости плотности воды от температуры [2].

чтобы оба атома водорода были направлены строго в сторону двух других молекул воды. При возникновении структуры льда угол между атомами водорода в молекулах воды увеличивается на 4° по сравнению с величиной того же угла в молекулах, образующих пар (105°) [2, с. 42]. Изменение валентного угла в молекуле воды, впрочем, только одна из нескольких аномалий этого удивительного вещества.

Процесс льдообразования протекает следующим образом: вода, охлаждаясь до $+4^\circ\text{C}$, достигает максимума плотности. Для того чтобы получить лёд из 1 кг воды с температурой $+4^\circ\text{C}$, нужно охладить её до точки кристаллизации 0°C при нормальном давлении, забрав энергию, равную 16 кДж, а для скрытой теплоты льдообразования при кристаллизации воды отнять 332 кДж. Аморфная структура голёда объясняется тем, что процесс замерзания переохлаждённой воды несколько задерживается выделяющейся при этом скрытой теплотой льдообразования. Вследствие этого капли, прежде чем замёрзнуть, успевают растечься по предмету, образуя сплошной покров льда.

График изменения плотности воды от температуры приведён на рис. 1.

Анализ графика рис. 1 свидетельствует о том, что при неизменности массы вещества (воды) в жидком состоянии переход её в твёрдое состояние неизменно должен вести к увеличению объёма воды, находящейся в твёрдом состоянии, и это может

являться причиной расширения льда при охлаждении. На прочность льда оказывают сильное влияние внешние условия – характер нагрузок, тепловой режим, агрессивность окружающей среды, поверхностные эффекты и т.д. Данные по прочностным характеристикам льда, полученным исследователями многих стран за предшествующие 100 лет, имеют большой диапазон значений. Например, прочность на сжатие изменяется от $4 \cdot 10^5$ до $130 \cdot 10^5$ Па и более, а прочность на изгиб – от $3 \cdot 10^5$ до $30 \cdot 10^5$ Па [5, с. 5]. Характеристики льда определяются его структурой (форма, размер кристаллов, направление кристаллооптических осей, количество воздушных включений и т.д.).

Структурные связи в решётке льда вследствие различной прочности под воздействием нагрузок нарушаются неодинаково по различным кристаллооптическим направлениям, т.е. проявляется анизотропия механических свойств. Прочность льда зависит от температуры, так как при понижении температуры понижается подвижность атомов водорода, и связь между отдельными кристаллами увеличивается. Изменение свойств льда в зависимости от температуры также обусловлено содержанием в нём жидкой фазы. С повышением температуры это содержание увеличивается, что способствует уменьшению ледовой прочности и более интенсивному проявлению пластических свойств.



Рис. 2. Классификация методов разрушения льда по способу воздействия.

Надо заметить, что при плавлении льда не происходит сразу полного разрушения кристаллической решётки. Разрывается лишь небольшое количество межмолекулярных связей, при 0°C число таких разрушенных связей составляет около 15%. Остальные молекулы сохраняют подобную кристаллу структуру внутри небольших областей.

Из сказанного следует, что выбор способов разрушения льда необходимо делать, исходя из его свойств и поведения в различных условиях.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ

При анализе многообразия технических средств, предназначенных для борьбы с гололёдными явлениями, целесообразно объединить технические решения в группы по способу воздействия на разрушаемый лёд (см. рис. 2).

В основе термического разрушения льда находится его способность к таянию по достижении им температуры плавления, но при этом вода способна при соответствующих условиях к повторному льдообразованию. Необходимо отметить, что тепловое воздействие на лёд является наиболее невыгодным с позиции энергозатрат. (На плавление льда для полного растопления 1 м³ его

объёма за 1 час потребуется источник мощностью около 0,1 МВт [5, с. 135], что более чем в сто раз превышает энергию, достаточную для плавления металлов). Тем не менее тепловые методы, основанные на использовании дешёвой попутной энергии (например, отработанного тепла промышленных, судовых установок) и даровой энергии Солнца, могут в некоторых случаях явиться экономически выгодными.

Зачерняющие средства (порошки тёмного цвета с плотностью больше единицы) являют собой солнечно-радиационный подход к разрушению льда, не требующий энергозатрат и предусматривающий максимальное применение солнечной энергии для таяния льда, снижая его отражающую способность. Однако использование зачернения ограничивается при наличии облачности и осадков.

В основу парового и газотермического способов положено растопление льда при помощи пара, струй горячей воды, либо использование воздуха, отбираемого от компрессоров двигателя, или воздуха, нагреваемого в теплообменниках циркулирующими в них выхлопными газами. Вариант малоприменим в условиях дорожного хозяйства с энергетической точки зрения. Допустим, при очистке взлётно-



посадочной полосы шириной 3,66 м и длиной в 1 км от ледяной корки толщиной 15 мм с помощью газотурбинных двигателей ТГ-16 и двигателей Ан-26 необходимо 1200 л топлива!

Химическое разрушение льда основано на свойстве некоторых химических соединений образовывать со льдом смеси, имеющие более низкую температуру плавления, чем сам лёд. Химические вещества внедряются в лёд, нарушая в нём монолитность, что существенно снижает его прочность. К недостаткам при этом следует отнести коррозионную активность химических веществ и их вред экологии.

Электрофизическое разрушение льда (применение высокочастотных магнитных полей, ультразвука, радиации, лазеров) находится на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Большинство проектов так и не вышло из стадии экспериментальных исследований. Электроимпульсное воздействие требует наличия сложных тонкостенных конструкций.

Электрогидравлические средства основаны на создании высокого гидравлического давления высоковольтным импульсным искровым разрядом вокруг зоны разряда внутри объёма жидкости. Разрушающий эффект от электрогидравлического импульса аналогичен результату воздействия эквивалентного по мощности взрыва заряда обычного взрывчатого вещества.

Электромагнитные поля высокой интенсивности в диапазоне высоких и сверхвысоких частот в случае контактного нагрева из-за низкой теплопроводности малоэффективны [7, 8]. Однако при резании льда наложение на режущий инструмент высокочастотных упругих колебаний позволяет уменьшить усилие на резце и увеличить скорость процесса в 1,5–2 раза.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЛЁД

Разными авторами [9–12] предложены устройства для пробивания льда с использованием энергии удара. При этом направление удара бывает сверху вниз или снизу вверх перпендикулярно поверхности льда. В качестве рабочего ор-

гана, как правило, выступает ударник, название которого зависит от принципа действия. Глубина проникновения такого ударника в лёд колеблется от нескольких сантиметров до 2–3 метров. Но при этом скорость перемещения ударника в момент контакта со льдом должна быть не менее 90 м/с и зависит от технических возможностей устройства (установлено, что отклонение направления удара от нормального к поверхности льда на угол менее 40° ведёт к рикошету рабочего органа).

Действие удара может быть пневматическим, гидравлическим, баллистическим, вибрационным.

Интересен способ разрушения льда за счёт отсоса воздуха (снижения давления) в пятне контакта, что ведёт к ослаблению связей в кристаллической структуре льда.

Взламывающие средства относятся к устройствам, расположенным на ледовых судах. Лёд взламывается снизу вверх за счёт оригинальной формы форштевня (пат. 131283, Норвегия) или применения бульб — специального уширения нижней части носовой оконечности судна.

Пневматические средства нацелены на лишение ледяного покрова упругого гидравлического основания, когда подаваемый в подлёдное пространство сжатый воздух оттесняет воду от нижней поверхности льда и тот, лишённый опоры, разрушается под собственной тяжестью.

Из режущих средств можно выделить две группы: устройства с гибкими режущими элементами и устройства с фрезерными рабочими органами.

К этим группам относятся ледовые цепные пилы различных модификаций (баровые, фрезерные машины), которые имеют простую конструкцию и высокую производительность [13, 14]. Их применение целесообразно при разрушении льда большой толщины. Лёдоскальватели предназначены для снятия и измельчения фрезерованием льдообразований и смёрзшихся грунтопесчаных наносов на дорогах и тротуарах. Подобное тракторное навесное оборудование позволяет производить первичное снятие льдообразований с дорожного полотна. Но полное отделение льда от покрытия происходит только в условиях оттепели, при температуре воз-

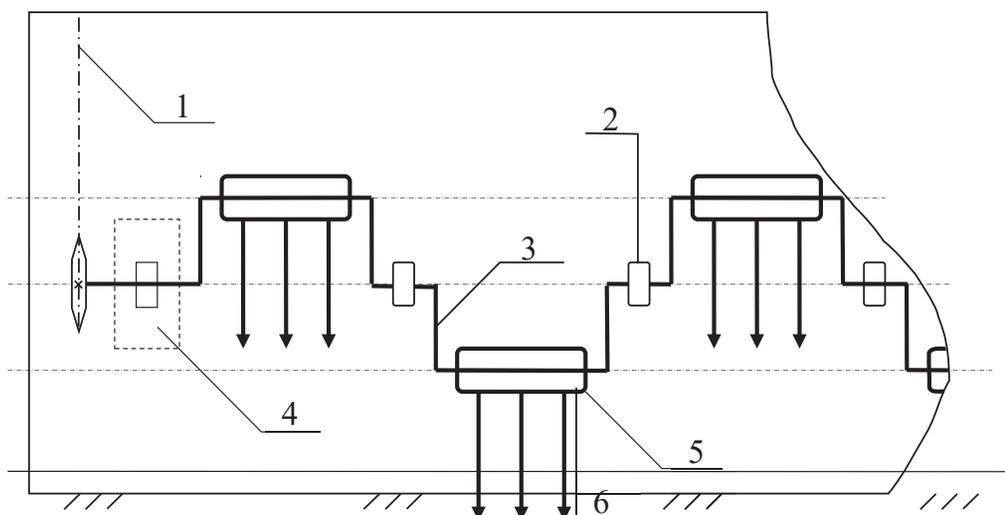


Рис. 3. Схема конструкции адаптера для борьбы с гололедом: 1 – цепная передача; 2 – соединительная муфта; 3 – промежуточный коленчатый вал; 4 – кронштейн; 5 – ударное устройство; 6 – тыльная сторона отвальной поверхности.

духа ниже -3°C , толщина оставляемого слоя льда составляет 10–20 мм.

Применение *скалывающих* средств основано на свойстве льда хрупко разрушаться под действием волн напряжений достаточной интенсивности, которые могут быть введены в лёд с помощью либо концентрированной динамической, либо медленно прилагаемой статической нагрузки. Интенсивность нагрузок должна быть приемлемой для образования трещин. Удельная энергия разрушения льда с использованием упругих волн напряжений значительно меньше, чем удельная энергия разрушения льда резанием [12, 15].

Буровые устройства (буры шлямбуровые или колонковые (полые), винтовые сверлового типа, керновые) разрушают лёд при помощи механического вращательного бурения. Рабочими органами являются режущие инструменты различных типов. Производительность бурения зависит от конструкции инструмента. При нормальных условиях на бурение лунки глубиной 1 м затрачивается около 5 мин. При бурении мокрого льда работа затрудняется, появляется необходимость в нескольких заходах для очистки от ледяной крошки.

КОНСТРУКЦИЯ АДАПТЕРА

Нами предлагается конструкция адаптера для борьбы с гололедом (см. рис. 3). Адаптер представляет собой коленчатый

вал, состоящий из нескольких коленчатых валов и расположенный на кронштейнах, установленных на тыльной стороне отвала бульдозера. Коленчатый вал приводится во вращение посредством цепной передачи, ведомые звёздочки которой монтируются на концевых участках вала с обеих сторон. Ведущий вал цепной передачи через редуктор соединён с валом двигателя бульдозера, от которого производится отбор мощности. Включение адаптера в работу совершает машинист бульдозера из кабины.

Соединение коленчатых валов обеспечивается при помощи муфт, которые крепятся на двух попарно соединённых валах посредством штифтов через соосные отверстия на концевых участках коленчатых валов и муфт. Ударное устройство для разработки уплотнённой отвальной поверхностью снежного наста или льда состоит из двух полухомутов, соединённых между собой болтами, и устанавливается на каждом промежуточном коленчатом валу. Затяжка болтов регулируется с таким усилием, чтобы было возможным свободное вращение внутренней поверхности хомута относительно цилиндрической поверхности коленчатого вала. При необходимости между полухомутами можно применять металлические прокладки толщиной 0,5–2 мм. К нижнему полухому на одинаковом расстоянии друг от



друга при помощи сварки (электрической) привариваются три втулки с внутренней резьбой. В каждой втулке установлен (закручен) ударник, острие которого предназначено для обработки снежного наста путём нанесения по нему периодических ударов при вращении коленчатого вала.

Конструкция адаптера позволяет изменять положение промежуточных коленчатых валов относительно друг друга.

Достоинства предлагаемой конструкции устройства для борьбы с гололёдными явлениями:

1. Простота конструкции адаптера позволяет собирать его из необходимого числа промежуточных коленчатых валов посредством соединительных муфт обычными соединительными элементами, например, штифтами.

2. Возможность быстрого изменения конструкции коленчатого вала, т.е. относительного расположения промежуточных коленвалов относительно друг друга не только в плоскости, но и в пространстве, в зависимости от прочности и толщины разрабатываемого льда и его состояния.

3. Лёгкость и быстрота обслуживания конструкции адаптера в процессе работы одним человеком (машинистом бульдозера) при замене и в случае поломки ударника (7–10 минут).

4. Возможность изменения глубины разработки снежного наста или льда путём выдвижения ударника в посадочных гнездах.

5. Простота и быстрота выполнения операции.

6. Безопасность производства ремонтных работ, так как при остановке двигателя происходит полная остановка адаптера.

ВЫВОДЫ

1. Разрушение льда, как и любого твёрдого тела, связано с понятием о его прочности — свойством материала в определённых условиях и пределах, не разрушаясь, воспринимать различные механические нагрузки и неравномерные воздействия физических полей.

2. Прочность льда в значительной сте-

пени зависит от многообразия его структурных особенностей. На прочность сильно влияют внешние условия — характер нагрузок, тепловой режим, агрессивность окружающей среды, поверхностные эффекты и т.д.

3. Основной из известных способов борьбы с наледью и снежным накатом при зимнем содержании дорог — снегоочистка — является трудоёмким и дорогостоящим, но механический способ разрушения льда обещает стать наиболее перспективным и надёжным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белянин В. С., Романова Е. К. Жизнь, молекула воды и золотая пропорция // Наука и жизнь. — 2004. — № 10. — С. 2–9.
2. Маэно Н. Наука о льде. — М.: Наука, 1988. — 231 с.
3. Войтковский К. Ф. Механические свойства льда. — М.: АН СССР, 1960. — 100 с.
4. Паундер Э. Физика льда: Пер. с англ. — М.: Мир, 1967. — 189 с.
5. Богородский В. В., Гаврило В. П., Недошин О. А. Разрушение льда. Методы, технические средства. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 232 с.
6. Гайдаенко Е. И. Использование льдов в качестве оснований сооружений. — Новосибирск: Наука, 1978. — 81 с.
7. Мисник Ю. М., Некрасов Л. Б. Электромеханическое разрушение мёрзлых пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1973. — № 5. — С. 27–30.
8. Кассир Г. А., Шперлинг В. И., Темников Е. М. и др. Новые физические методы разрушения минеральных сред. — М.: Недра, 1970. — 423 с.
9. Гидроакустический буй для исследования мирового океана // Патент России N 2005114635. 2005 / Кулаков А. Ф., Костромитинов В. Г.
10. Левицкий В. М. Средства для разрушения льда // Передовой опыт и новая техника. — 1979. — Вып. 4. — С. 57–69.
11. Лезин Д. Л. Ледокольные приставки // Труды НИИВТ. — 1977. — Вып. 126. — С. 3–15.
12. Арбатский А. В., Войнич В. Г., Соломин Р. Г. Ручные виброударные инструменты для производства выморозочных работ // Труды НИИВТ. — 1977. — Вып. 126. — С. 57–62.
13. Наместников В. Д., Монзырев Н. П., Чураков Л. Я. Механизация сколки судов и караванов // Труды НИИВТ. — 1976. — Вып. 119. — С. 35–39.
14. Николаев А. Ф. Исследования и комплекс машин для разработки мёрзлых грунтов, льда и снега. — Горький, 1962. — 62 с.
15. Войнич В. Г. Разрушение льда виброударным инструментом // Труды НИИВТ. — 1977. — Вып. 126. — С. 50–56.
16. Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. — М.: АН СССР, 1955. — 491 с. ●

Координаты авторов: **Сладкова Л. А.** — rich.cat2012@yandex.ru, **Неклюдов А. Н.** — neklyudov.an@gmail.com, **Кузнецов А. Н.** — andrey-k92@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 09.10.2018, принята к публикации 17.12.2018.