

УДК 625.768.5:624.143.36

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАЗРУШЕНИЕ
СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ
НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ**

Инженер **А.В. Бобков**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»),
д-р техн. наук **А.В. Кочетков**
(Пермский национальный
исследовательский политехнический университет),
канд. техн. наук **С.П. Аржанухина**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»)
Контактная информация: bobkov@rosdornii.ru;
nii_eko@mail.ru;
soni.81@mail.ru

При зимнем содержании автомобильных дорог требуется особое внимание дорожных организаций к технологическим особенностям применения противогололедных материалов, с учетом не только их плавящей способности, но и теплофизических характеристик. В статье рассматривается математическая модель распространения тепла от точечного источника теплоты на примере работы хлористого кальция и хлористого натрия. Достоверность математической модели подтверждается проведенными натурными экспериментами.

Ключевые слова: автомобильные дороги, зимнее содержание, противогололедные материалы, теплофизические характеристики, хлористый кальций, хлористый натрий.

В зимний период в ряде случаев возникают условия, ухудшающие дорожное движение. Серьезность проблем во многом зависит от географического положения региона и соответствующих климатологических факторов.

Согласно требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог» [1], к требованиям безопасности на автомобильных дорогах и дорожных сооружениях на них при их эксплуатации в зимний период года относится следующее:

- защита участков автомобильных дорог от снежных заносов;
- предупреждение образования на покрытии автомобильных дорог снежного наката или гололеда;

- ликвидация снежного наката или гололеда, в том числе с использованием противогололедных материалов;
- обеспечение устойчивого функционирования автомобильных дорог.

Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 г. [2] предусматривается:

- увеличение протяженности автомобильных дорог федерального значения, соответствующих нормативным требованиям;
- создание условий для формирования единой дорожной сети с круглогодичным доступом на эту сеть населения;
- увеличение протяженности автомобильных дорог федерального значения, соответствующих нормативным требованиям и входящих в систему международных транспортных коридоров;
- повышение безопасности движения на автомобильных дорогах федерального значения, обеспечение их устойчивого функционирования, а также транспортной безопасности дорожного хозяйства.

Основной задачей зимнего содержания федеральных автомобильных дорог в Российской Федерации является обеспечение бесперебойного, безаварийного движения по автомобильным дорогам [3].

Формирование на дорожных покрытиях снежно-ледяных отложений (образований) (СЛО) в зимних условиях является неизбежным природным явлением, которое во многих регионах наблюдается в течение 2-4 месяцев, а в отдельных регионах доходит до 6-8 месяцев в году. Из-за СЛО повышается скользкость на автомобильных дорогах, снижается скорость движения автотранспорта, возрастает себестоимость перевозок, увеличивается количество ДТП.

В настоящее время в Российской Федерации и за рубежом наблюдается интенсивное развитие технологий зимнего содержания автомобильных дорог. При этом определен основной набор химических противогололедных материалов, нормы их применения минимизируются, совершенствуется дорожная техника, используемая при борьбе со СЛО.

Изучение явления взаимодействия воды с асфальтобетонным дорожным покрытием показало, что лед смерзается с таким покрытием с силой сцепления больше прочности самого льда, что исключает возможность его полного удаления механическим путем без повреждения покрытия. Вследствие этого возникают два пути решения проблемы,

связанной с обеспечением устойчивого функционирования автомобильных дорог [4]:

- эксплуатация отдельных автомобильных дорог с присутствием по всей ширине проезжей части слоя уплотненного снежного покрова (при интенсивности движения до 1500 авт./сут.);
- предупреждение образования снежного наката или гололеда либо уничтожение СЛЮ химическими средствами.

Известны два способа предотвращения снежного наката или гололеда на поверхности дороги при помощи химических средств:

- уменьшение сил смерзания льда с покрытием проезжей части дорог до полного отсутствия сцепления СЛЮ с покрытием;
- расплавление всего снега или льда, присутствующих на дорожном покрытии.

Уменьшение сил смерзания льда с покрытием проезжей части дорог может достигаться введением специальных добавок в состав асфальтобетона на стадии его укладки на автомобильную дорогу или предварительной обработкой проезжей части дороги химическими противогололедными материалами (ПГМ) в твердом, смоченном или жидком виде.

Результаты исследований показали, что благодаря предварительной обработке проезжей части дороги с использованием твердых или смоченных ПГМ в рамках зимнего содержания автомобильных дорог уменьшается расход таких материалов на 20-30% [5]. Использование жидких противогололедных материалов позволяет получить еще больший эффект.

Предварительная обработка проезжей части дорог осуществляется в условиях прогнозируемого снегопада или гололеда и нацелена на недопущение образования СЛЮ. Важную роль здесь играет оперативное и точное получение метеорологической информации.

Кроме того, как при предварительном распределении химических противогололедных материалов, так и при обработке покрытия проезжей части дороги с уже имеющимися СЛЮ или гололеде для получения наибольшего эффекта следует учитывать теплофизические свойства применяемых материалов и температурный диапазон их работы.

Проведенные исследования взаимодействия $CaCl_2$ и $NaCl$ со СЛЮ показали их принципиально разную теплофизическую работу, что необходимо учитывать при зимнем содержании автомобильных дорог.

Рассмотрим пример работы $CaCl_2$ (рис. 1).

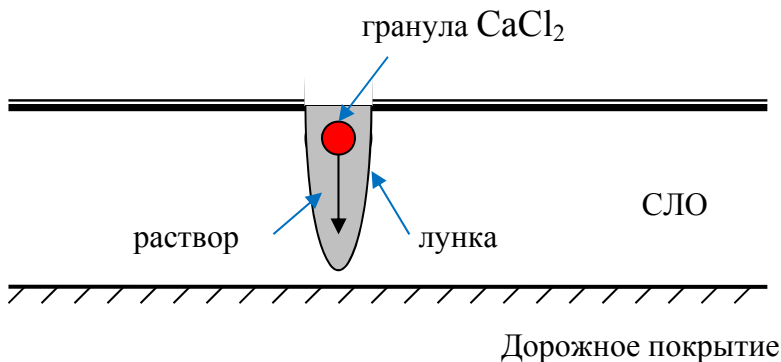


Рис. 1. Схема «прожига» СЛО гранулой $CaCl_2$

Дорожной машиной на обрабатываемом участке со СЛО разбрасываются гранулы $CaCl_2$. Попадая на поверхность СЛО, находящийся в грануле хлористый кальций взаимодействует с молекулой воды. Это взаимодействие начинается одновременно с попаданием гранулы в СЛО. Причем, безводный хлористый кальций ($CaCl_2$), присоединяя по шесть молекул воды, переходит в гидрат хлористого кальция. Такая реакция идет как изотермическая с выделением большого количества тепла, что создает условия для «прожига» лунки.

Для создания математической модели работы хлористого кальция в СЛО была использована теория, разработанная академиком Н.Н. Рыкалиным в области технологической теплофизики для случая распространения тепла от точечного источника теплоты [6].

Теоретические расчеты, выполненные Н.Н. Рыкалиным, позволили математически разделить пространственный процесс теплопроводности на ортогональные составляющие.

Построенная математическая модель работы $CaCl_2$ на основе теории Н.Н. Рыкалина для точечного источника теплоты показала возможность графически представить работу взаимодействия гранулы $CaCl_2$ со СЛО.

Аналогично оказалось возможным представить работу гранулы $NaCl$ со СЛО.

Результаты расчета, полученные на основе математической модели приращения температурного поля в пространстве и времени относительно начальной температуры для процесса взаимодействия ПГМ на

основе безводного хлористого кальция и уплотненного снега, приведены на **рис. 2**.

В качестве исходных данных была рассмотрена работа гранулы хлористого кальция диаметром 5 мм.

Получены временные зависимости температуры в СЛЮ для расстояний (r) 1 и 10 мм от гранулы хлористого кальция в линейном масштабе.

Как видно из представленных графиков (**рис. 2 б, в**), при попадании на лед гранулы $CaCl_2$ происходит гидратация $CaCl_2$ с присоединением 6 молекул H_2O , причем при гидратации резко начинает выделяться тепловая энергия, которая способна поднять теоретически температуру на расстоянии 1 мм от гранулы в СЛЮ на 28 °С.

На расстоянии 10 мм прирост температуры может составить около 6 °С. Затем под воздействием низких температур окружающей среды температура вокруг гранулы начинает постепенно снижаться, выравниваясь по отношению к температуре окружающей среды.

Теоретический расчет (**рис. 2**) был подтвержден натурными опытами, проведенными с аналогичными гранулами $CaCl_2$.

Результаты экспериментов представлены на **рис. 3**.

Резкое увеличение температуры при гидратации $CaCl_2$ в СЛЮ было зафиксировано также тепловизором (**рис. 3 д**).

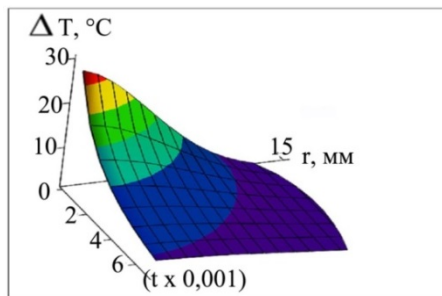
Сухие гранулы безводного $CaCl_2$ при попадании на лед (**рис. 3 а**) мгновенно начинают работать, присоединяя молекулы воды, и уже через 20 с погружаются примерно на 1/3 часть своего диаметра в СЛЮ, через 2 мин. гранула уже глубоко находится в СЛЮ (**рис. 3 б**).

Все опыты проводились при температуре льда и наружного воздуха, равных минус 12 °С. Необходимо отметить, что погружение в лед идет с эффектом «прожига», как видно из **рис. 4**. Лунка вытапливания имеет гладкие оплавленные края, а верхняя ее часть после гидратации $CaCl_2$ остается пустой, незаполненной раствором (**рис. 4**).

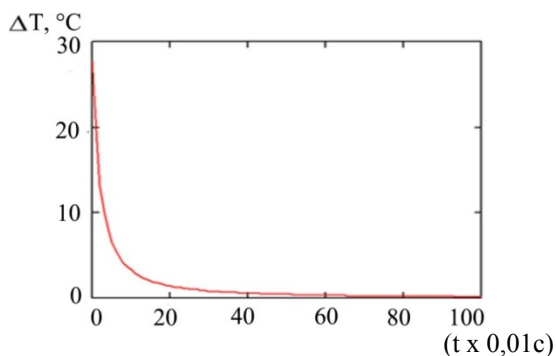
Безводный хлористый кальций, обладая высокой гигроскопичностью, энергично поглощает воду и водяные пары из воздуха и при влажности уже 40% начинает образовывать сначала кристаллогидраты, а затем расплывается в жидкости.

После окончания гидратации соединение $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ растворяется в СЛЮ, происходит постепенное заполнение нижней части лунки раствором (**рис. 3 в, г**). Необходимо отметить, что растворение $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ уже идет с поглощением тепла. Образовавшийся раствор ведет себя очень активно и при наличии во льду микротрещин мгновенно проникает туда, расширяя и углубляя такие трещины, что видно при процессе растворения гранулы справа (**рис. 3 в, г**).

а) график $\Theta(t, r_1)$ $r_1 = 0 \dots 20$ мм



б) график $\Theta(t, r_1)$. $r_1=1$ мм; $t=0 \dots 10^4$ с



в) график $\Theta(t, r_1)$. $r_1=10$ мм; $t = 0 \dots 10^4$ с

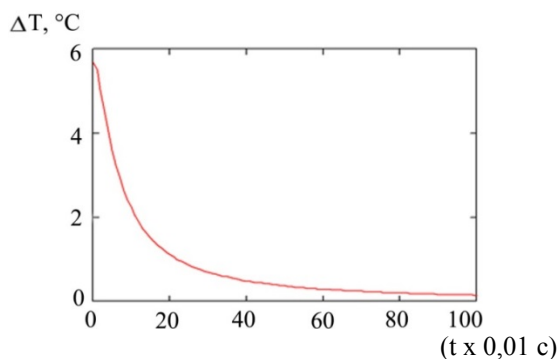


Рис. 2. Расчет распределения приращения температурного поля в пространстве и времени относительно начальной температуры для процесса взаимодействия ПГМ на основе хлористого кальция и уплотненного снега (определяющий дискретность расчета коэффициент приведения времени, равный 0,01)

а) $t = 20$ с



б) $t = 2$ мин.



в) $t = 6$ мин.



г) $t = 27$ мин.



д) температурная карта процесса гидратации гранулы CaCl_2

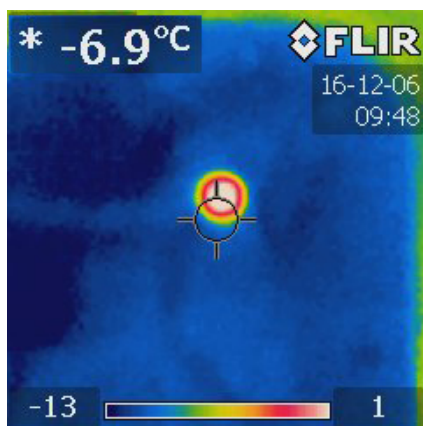


Рис. 3. Процесс «прожигания» и растапливания льда гранулой CaCl_2



Рис. 4. Лунка вытапливания СЛЮ при помощи CaCl_2

Такое поведение CaCl_2 не только создает быстрый «прожиг» в СЛЮ, но и ослабляет его за счет расширения микротрещин. Образовавшийся раствор стекает по дорожному покрытию на обочину. Отсутствие раствора на поверхности СЛЮ предотвращает эффект аквапланирования колеса автомобиля, а образовавшиеся лунки от «прожига» способствуют разрушению СЛЮ под воздействием механического воздействия движущегося колеса автомобиля.

На **рис. 5** представлены данные по эффективной концентрации CaCl_2 для образования раствора в зависимости от температуры СЛЮ и самого раствора [7].

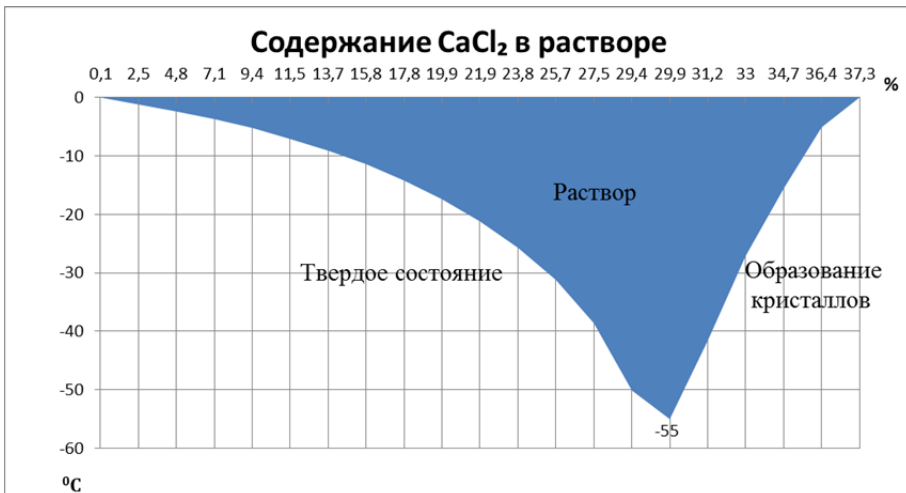


Рис. 5. Изменение состояния раствора в зависимости от температуры раствора и концентрации CaCl_2

Аналогично расчету приращения температурного поля в пространстве и времени относительно начальной температуры для процесса взаимодействия ПГМ на основе хлористого кальция был выполнен расчет для *хлористого натрия и уплотненного СЛО (рис. 6)*.

Расчет проведен в визуальной среде математического моделирования Matcad. Установлены временные зависимости температуры для расстояний (r), равных 1 и 10 мм от гранулы хлористого натрия в линейном масштабе.

При расчете были приняты следующие исходные данные: температура – минус 12 °С, диаметр гранулы хлористого натрия – 5 мм.

Как видно из представленных графиков (**рис. 6**), при попадании на лед гранулы $NaCl$ происходит растворение $NaCl$ в H_2O , причем при растворении резко начинает поглощаться тепловая энергия, которая способна снизить теоретически температуру на расстоянии 1 мм от гранулы в СЛО на 15 °С.

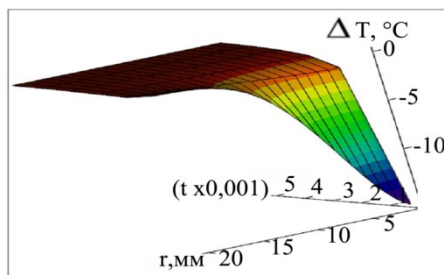
На расстоянии 10 мм снижение температуры может составить около 3 °С и далее под воздействием температуры окружающей среды, температура начинает постепенно повышаться и выравниваться.

Теоретический расчет подтвержден натурными экспериментами, проведенными с гранулой $NaCl$, результаты которых представлены на **рис. 7, 8**.

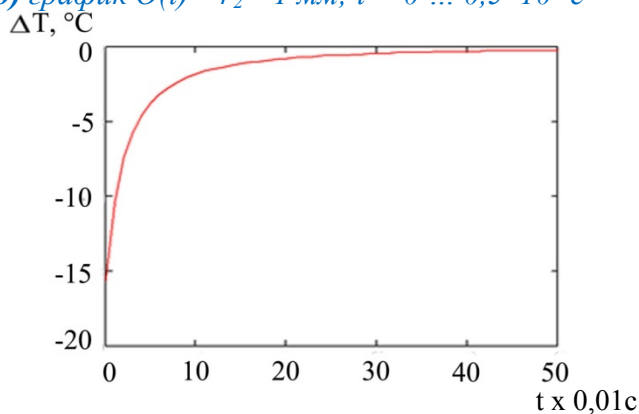
Резкое снижение температуры при растворении в СЛО было зафиксировано тепловизором (**рис. 7 в**).

Как видно из **рис. 6** и **7**, при попадании гранулы $NaCl$ на лед, происходит резкое снижение температуры (**рис. 8**), при этом гранула $NaCl$ перестает работать, до тех пор, пока ее температура не повысится под воздействием температуры окружающей среды и не попадет в диапазон температур (**рис. 9**) [7], при котором образуется водный раствор $NaCl$. Из приведенного графика на **рис. 9** видно, что при температуре окружающей среды минус 14 °С в первые 10 мин. гранула вообще не работает, так как температура в точке соприкосновения гранулы и СЛО понижается ниже минус 21 °С. Исходя из изложенного становится понятным, почему $NaCl$ наиболее эффективно работает при температуре до минус 5-7 °С. При температуре ниже минус 5-7 °С, вплоть до минус 21 °С, $NaCl$ тоже работает, но временной интервал начала образования солевого раствора сдвигается на более поздний период, поскольку требуется значительное время на понижение температуры в СЛО и последующее ее выравнивание с температурой окружающей среды. Кроме того, при растворении в СЛО, концентрация $NaCl$ в растворе начинает понижаться, что приводит к более высоким температурам замерзания солевого раствора.

а) график $\Theta(t, r_2)$ $r_2 = 0 \dots 20$ мм



б) график $\Theta(t)$ $r_2 = 1$ мм; $t = 0 \dots 0,5 \cdot 10^4$ с



в) график $\Theta(t)$ $r_2 = 10$ мм; $t = 0 \dots 0,5 \cdot 10^4$ с

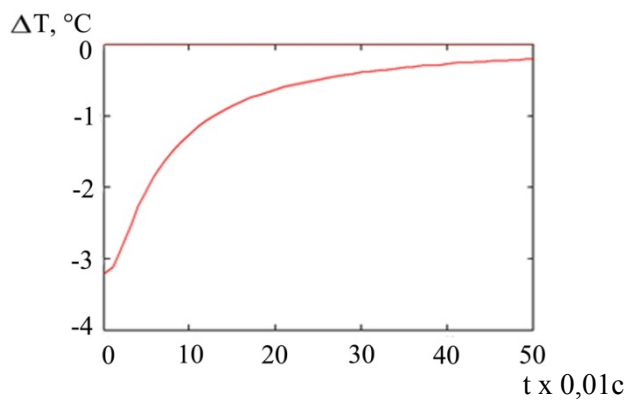


Рис. 6. Расчет приращения температурного поля в пространстве и времени относительно начальной температуры для процесса взаимодействия ПГМ (на основе хлористого натрия) и уплотненного снега

Исходя из **рис. 7 а, б**, иллюстрирующих работу гранулы $NaCl$ в смоченном и сухом виде, очевидно, что смоченная водой гранула начинает работать раньше, чем сухая, растворяясь даже при температуре минус $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, быстрее примерно в 3 раза, чем последняя. Это можно объяснить тем, что смоченная гранула быстрее поглощает тепловую энергию, быстрее нагревается и вследствие чего быстрее растворяется в СЛО.

а) 14 мин.



б) 40 мин.



в) температурная карта процесса растворения гранулы $NaCl$

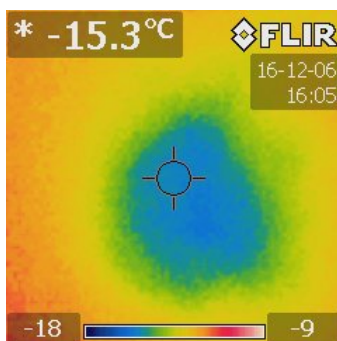


Рис. 7. Процесс растапливания льда гранулой $NaCl$



Рис. 8. Изменение температуры СЛО при введении NaCl в СЛО (натурные измерения)

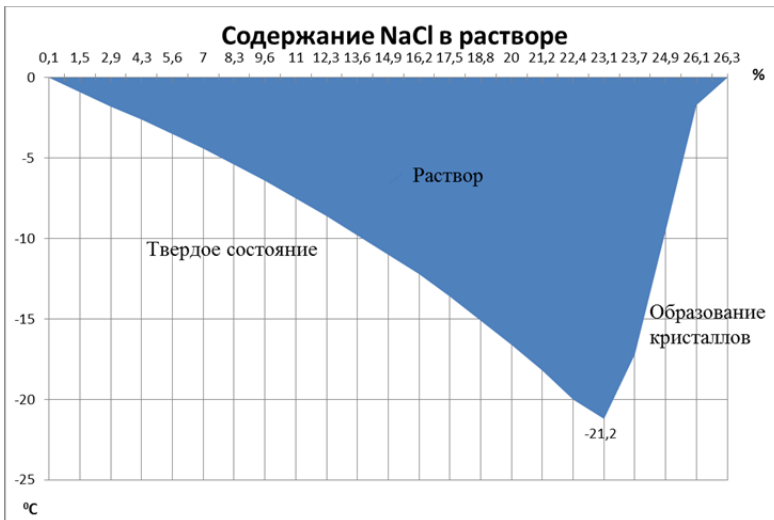


Рис. 9. Изменение состояния раствора в зависимости от температуры раствора и концентрации NaCl

ВЫВОДЫ

Содержание автомобильных дорог в зимний период является наиболее затратным по сравнению с другими периодами года, в связи с чем возникает вопрос о наиболее рациональном расходовании средств на приобретение и использование ПГМ, а также эффективном применении дорожной техники.

По результатам проведенных исследований установлено, что важное значение при использовании ПГМ имеют не только их химические свойства, но и теплофизические характеристики, которые необходимо учитывать для ПГМ разного типа в зависимости от температуры и влажности наружного воздуха, толщины и уплотненности СЛЮ, скорости ветра, в том числе и скорости перемещения воздушных потоков, создаваемых движением транспорта.

Как показали исследования, ПГМ необходимо нормировать не только по плавящей способности, но и более строго, с отклонением в пределах нескольких процентов, по количественному содержанию различных компонентов в грануле многокомпонентного противогололедного материала.

Варьирование величиной диаметра применяемых гранул ПГМ необходимо осуществлять в зависимости от толщины и плотности СЛЮ.

Для обеспечения оптимальной эффективности ПГМ рекомендуется осуществлять подбор требуемых параметров для конкретных дорожных условий с учетом ряда исходных данных (температура воздуха, облачность, состояние покрытия и наличие СЛЮ).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Технический регламент Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС - 014 - 2011).* – Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 г. No 827 // *Ростандарт:[веб-сайт].* – Электрон. дан. – URL: [http://webportalsrv.gost.ru/portal/GostNews.nsf/acaf7051ec840948c22571290059c78f/31df4d876b7c282244257a37003e01d3/\\$FILE/TR_T_S_014-2011_text.pdf](http://webportalsrv.gost.ru/portal/GostNews.nsf/acaf7051ec840948c22571290059c78f/31df4d876b7c282244257a37003e01d3/$FILE/TR_T_S_014-2011_text.pdf) (дата обращения 12.05.2017).
2. *Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г.* – Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 года № 1734-р. – Электрон. дан. – URL: https://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION_ID=2203 (дата обращения 12.05.2017).
3. *ОДМ 218.5.001-2008. Методические рекомендации по защите и очистке автомобильных дорог от снега.* – Утв. Распоряжением Росавтодора от 01.02.2008 N 44-р. – Электрон. дан. – URL:

- https://znaytovar.ru/gost/2/ODM_21850012008_Metodicheskie.html
(дата обращения 12.05.2017).
4. ГОСТ 33181-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к уровню зимнего содержания // Техэксперт: [веб-сайт]. – Электрон. дан. – URL.: <http://docs.cntd.ru/document/1200123497> (дата обращения 12.05.2017).
 5. Борисюк Н.В. Зимнее содержание автомобильных и городских дорог: методические указания к курсовой работе / Н.В. Борисюк. – М.: МАДИ, 2016. – 24 с.
 6. Кокодеева Н.Е. Сравнительное математическое моделирование теплофизического взаимодействия гранул хлоридов кальция и снежно-ледяного образования / Н.Е. Кокодеева, А.В. Бобков, И.Г. Шапков и др. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Т. 8. – № 6. – 14 с. – Электрон. дан. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN616.pdf>. (дата обращения 12.05.2017).
 7. Перельман В.И. Краткий справочник химика / В.И. Перельман. – М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1956. – 622 с.

L I T E R A T U R A

1. Tehnicheskij reglament Tamozhennogo sojuza «Bezopasnost' avtomobil'nyh dorog» (TR TS - 014 - 2011). – Utv. Resheniem Komissii Tamozhennogo sojuza ot 18 oktjabrja 2011 g. No 827 // Rosstandart: [veb-sajt]. – Jelektron. dan. – URL: [http://webportalsrv.gost.ru/portal/GostNews.nsf/acaf7051ec840948c22571290059c78f/31df4d876b7c282244257a37003e01d3/\\$FILE/TR_TS_014-2011_text.pdf](http://webportalsrv.gost.ru/portal/GostNews.nsf/acaf7051ec840948c22571290059c78f/31df4d876b7c282244257a37003e01d3/$FILE/TR_TS_014-2011_text.pdf) (data obrashhenija 12.05.2017).
2. Transportnaja strategija Rossijskoj Federacii do 2030 g. – Utv. rasporyzheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 22 nojabrja 2008 goda # 1734-r. – Jelektron. dan. – URL: https://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION_ID=2203 (data obrashhenija 12.05.2017).
3. ODM 218.5.001-2008. Metodicheskie rekomendacii po zashhite i ochistke avtomobil'nyh dorog ot snega. – Utv. Rasporyzheniem Rosavtodora ot 01.02.2008 N 44-r. – Jelektron. dan. – URL: https://znaytovar.ru/gost/2/ODM_21850012008_Metodicheskie.html (data obrashhenija 12.05.2017).
4. GOST 33181-2014. Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Trebovanija k urovnju zimnego soderzhaniya // Tehjeksper: [veb-sajt]. – Jelektron. dan. – URL.:

- <http://docs.cntd.ru/document/1200123497> (data obrashheniya 12.05.2017).
5. Borisjuk N.V. *Zimnee sodержanie avtomobil'nyh i gorodskih dorog: metodicheskie ukazaniya k kursovoj rabote* / N.V. Borisjuk. – M.: MADI, 2016. – 24 s.
 6. Kokodeeva N.E. *Sravnitel'noe matematicheskoe modelirovanie teplofizicheskogo vzaimodejstviya granul hloridov kal'cija i snezhnol'djanogo obrazovaniya* / N.E. Kokodeeva, A.V. Bobkov, I.G. Shashkov i dr. // *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*. – 2016. – T. 8. – # 6. – 14 s. – *Jelektron. dan.* – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN616.pdf>. (data obrashheniya 12.05.2017).
 7. Perel'man V.I. *Kratkij spravochnik himika* / V.I. Perel'man. – M.: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo himicheskoy literatury, 1956. – 622 s.

**IMPACT OF THERMAL AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF
DEICING AGENTS ON SNOW-AND-ICE BODIES BREAKUP
ON ROADS**

Engineer A.V. Bobkov
(FAI «ROSDORNII»),

Doctor of Engineering A.V. Kochetkov
(Perm National Research Polytechnic University),

Ph. D. (Tech.) S.P. Arzhanukhina
(FAI «ROSDORNII»)

Contact information: nii_eko@mail.ru;
bobkov@rosdornii.ru;
soni.81@mail.ru

When winter road maintenance carrying out special attention of road agencies is needed with regard to technological characteristics of deicing agents usage, taking into account not only melting capacity of applying materials, but also their thermal and physical characteristics. The article dwells upon mathematical model of heat transfer from point heat source based on the example of calcium chloride and sodium chloride work. Mathematical model validity is proved by field experiments.

Key words: *roads, winter maintenance, deicing agents, thermal and physical characteristics, calcium chloride, sodium chloride.*

Рецензент: заведующий Центральнo-испытательной лабораторией Ю.Н. Розов (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 29.03.2017 г.