

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №6 (2016) <http://naukovedenie.ru/vol8-6.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN616.pdf>

Статья опубликована 07.12.2016

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кокодеева Н.Е., Бобков А.В., Кочетков А.В., Аржанухина С.П., Климов Д.А., Шашков И.Г. Сравнительное математическое моделирование теплофизического взаимодействия гранул хлоридов кальция и натрия и снежно-ледяного образования // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №6 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN616.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.9

Кокодеева Наталия Евсегнеевна

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
Заведующая кафедрой
Доктор технических наук, доцент
E-mail: kokodeewa@mail.ru

Бобков Александр Витальевич

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
Аспирант
E-mail: nii_eko@mail.ru

Кочетков Андрей Викторович¹

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Доктор технических наук, профессор
E-mail: soni.81@mail.ru

Аржанухина Софья Петровна

ФАУ «Российский дорожный научно-исследовательский институт «РОСДОРНИИ», Россия, Москва
Главный специалист
Кандидат технических наук
E-mail: soni.81@mail.ru

Климов Дмитрий Андреевич

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет», Россия, Владимир
Аспирант
E-mail: kda88@inbox.ru

Шашков Игорь Геннадиевич

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия, Воронеж
Преподаватель
Кандидат технических наук
E-mail: igoshashkov@yandex.ru

**Сравнительное математическое моделирование
теплофизического взаимодействия гранул хлоридов
кальция и натрия и снежно-ледяного образования**

¹ 410022, г. Саратов, ул. Азина, д. 38 «В», кв. 4

Аннотация. Выявлены основные особенности применения гранулированных противогололедных материалов на основе хлористого кальция и хлористого натрия в температурном диапазоне от -12°C и ниже. Проведенные исследования позволили уточнить фазовые состояния механизма «теплового иньектора» - взаимодействия тепловыделяющего противогололедного материала и снежно-ледяного образования.

Для решения задач математического моделирования их теплофизического взаимодействия применены методы технологической теплофизики, в частности метод источников теплоты. Проведен сравнительный анализ тепловых эффектов взаимодействия безводного хлористого кальция и хлористого натрия с уплотненным снегом. На основе особенности современных химических противогололедных материалов выделять или поглощать тепловую энергию при соединении с водой проведено математическое моделирование этого процесса в виде интегрирования точечного источника теплоты, что позволило получить конечное решение в виде аналитической формулы и провести расчет распределения температурного поля в пространстве и времени. Полученные результаты объясняют особенности применения тепловыделяющих противогололедных материалов на основе безводного хлористого кальция и эффекты повторного замерзания снежно-ледяного образования после остывания солевого раствора.

Ключевые слова: безводный хлористый натрий; хлористый кальций; противогололедный материал; зимнее содержание; автомобильная дорога; фазовое состояние; уплотненный снег; лед; гололед; источник теплоты; математическое моделирование

Актуальность

Исследования проведены с учетом результатов ранее выполненных работ профессора Н.В. Борисюка из Московского автомобильно-дорожного института и доктора технических наук А.К. Киялбаева из АО «КАЗДОРНИИ». Ими изучалась задача взаимодействия сферической гранулы пескосоляной смеси или песка со СЛЮ. Процесс взаимодействия ограничен только состоянием, когда сфера погружена в СЛЮ (снежноледяные отложения) наполовину. Для этого случая были разработаны номограммы. Причем полученные ими формулы могут быть решены итерационно с помощью вычислительных алгоритмов. В конечном итоге можно определить, сколько СЛЮ будет растоплено частицей теплого песка. Фактически решалась задача вмораживания песка в лед [1-3].

В технологической теплофизике в основу положены усовершенствования математической теории теплообмена, в частности метода источников теплоты. Тепловой процесс в неограниченном теле, вызванный источником теплоты любой формы и интенсивности, действующий постоянно или временно, движущийся или неподвижный, может быть математически изображен как комбинация температурных полей, создаваемых точечными источниками теплоты. Теорема Н.Н. Рыкалина позволяет математически разделять пространственный процесс теплопроводности на ортогональные составляющие. Это позволяет построить функцию Грина для ограниченных тел. Задав начальные и граничные условия: время, температуру льда, теплоемкость, теплопроводность льда, тепловую мощность гранулы ПГМ, есть возможность рассчитать на компьютере в Matlab визуальное представление распределения температурного поля вокруг точечного источника теплоты. Полученные результаты моделирования соответствуют фотоизображению взаимодействия гранулы хлористого кальция со СЛЮ.

Проведенные исследования позволили впервые уточнить фазовые состояния механизма «теплового иньектора» - взаимодействия тепловыделяющего ПГМ со СЛЮ,

перечень которых изображен на рисунке 1, ранее установленные И.Г. Овчинниковым и С.П. Аржанухиной [4-8].

Из справочного материала для математического моделирования выбраны показатели теплопроводности, плотности, теплоемкости льда и снега в зависимости от температуры [4-8].

Известно, что с понижением температуры льда его плотность и удельная массовая теплоемкость уменьшаются, а теплопроводность, напротив, растет.

Постановка задачи

Рассмотрена модель взаимодействия гранулы ПГМ на поверхности СЛЮ.

По оси X отложено направление перемещения гранулы ПГМ на основе безводного хлористого кальция (рисунок 2).

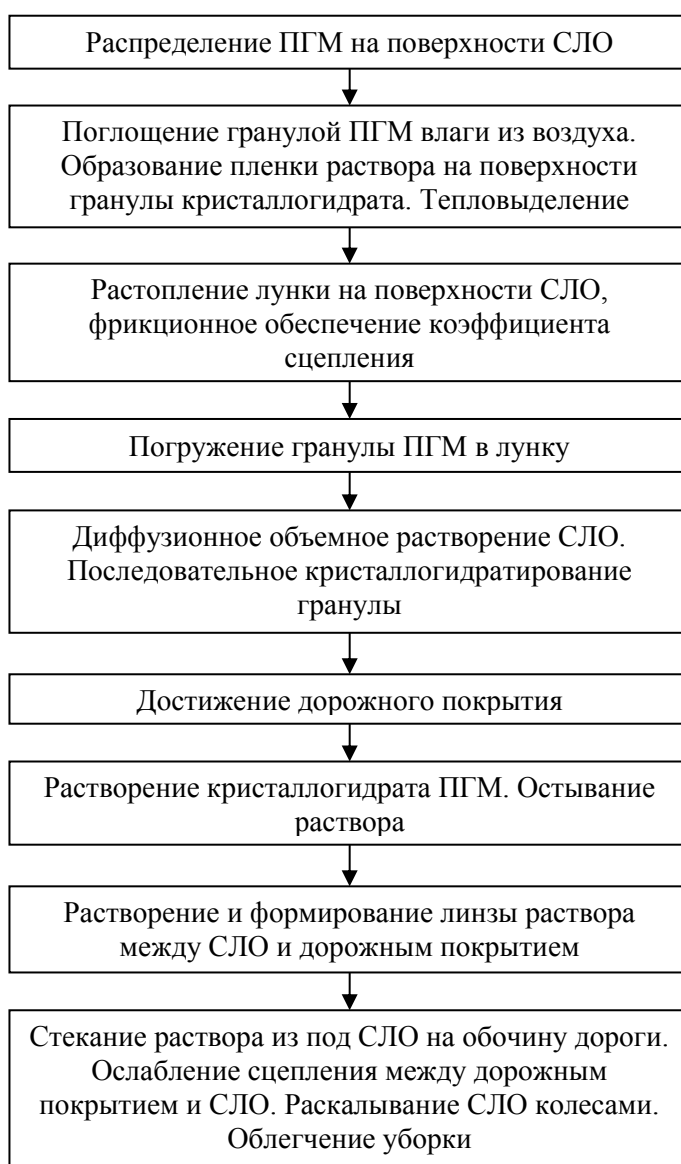


Рисунок 1. Фазовые состояния механизма «теплового иньектора» - взаимодействия тепловыделяющего ПГМ со СЛЮ (рис. авт.)

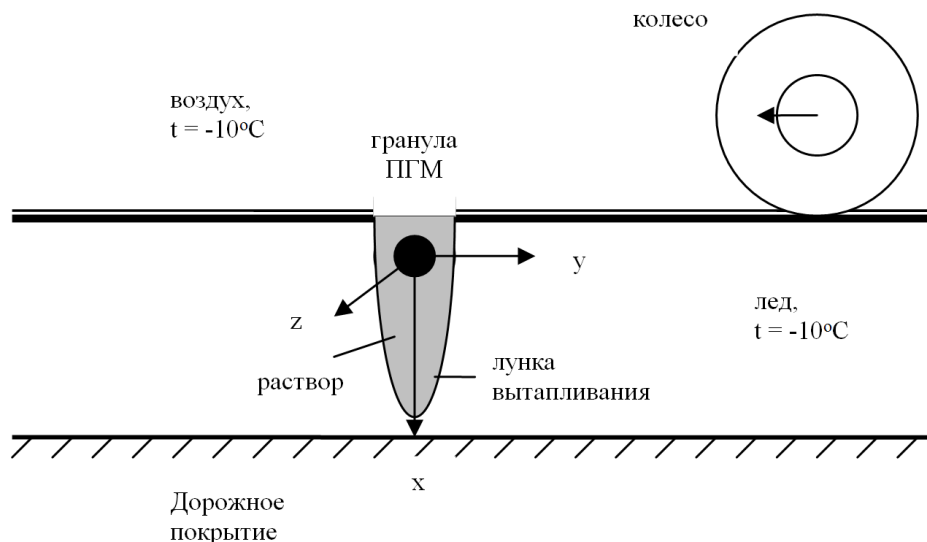


Рисунок 2. Расчетная схема процесса взаимодействия гранулы тепловыделяющего ПГМ со льдом (рис. авт.)

При математическом моделировании использовалась уточненная методика С.П. Аржанухиной [5]. Теплота растворения хлорида кальция зависит от количества растворенного вещества и количества растворителя и может быть выражена эмпирической формулой для теплоты растворения $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в n молях воды на 1 моль хлористого кальция [5]:

$$Q_n = 800 - 5023 \frac{n - 10}{n + 11,24} \text{ кал} \quad (1)$$

Из этой формулы следует, что при растворении 1 моля $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в очень большом количестве воды $n = \infty$ выделяется 4223 калории, при $n = 10$ $Q = 0$.

Процесс таяния льда протекает с поглощением тепла. Количество теплоты плавления льда $Q_{пл} = m\lambda$, где λ - удельная теплота плавления, для воды $\lambda = 1,4$ ккал/г или 80 кал/моль, m - масса льда. Хлористый кальций в твердом состоянии абсорбирует влагу до тех пор, пока не растворится. Например, при растворении 111 г хлористого кальция в 72000 г воды выделяется 17990 калорий теплоты, а при растворении хлористого натрия 2400 калорий теплоты поглощается.

Коэффициент теплопроводности льда при $-10^\circ\text{C} = 1,935$ ккал/м. час. град, при $0^\circ\text{C} = 2,20$ Вт/(м·К). Теплопроводность воды - 0,55 Вт/(м·К). С понижением температуры плотность льда увеличивается, а объем уменьшается. В зависимости от температуры плотность и удельный объем льда можно рассчитать по формулам Б.П. Вейнберга [5]:

$$\begin{aligned} \rho &= 917 (1 - 0,000158t)(1 - n); \\ V &= 1090 (1 + 0,000158t), \end{aligned} \quad (2)$$

где n - пористость льда.

Зная плотность льда при 0°C (917 кг/м^3), можно определить его пористость:

$$n = 1 - r_{л}/r_{л} \quad (3)$$

Плотность льда, образовавшегося в результате замерзания соленой воды (морской или озерной), зависит не только от его температуры и количества воздушных пузырьков в нем, но еще и от содержания солей в прослойках между кристаллами льда и от количества в этих

прослойках рассола. Это определяется быстротой замерзания и от возраста льда. Соленость льда всегда меньше солености воды, из которой он образовался.

Плавление льда при постоянном внешнем давлении протекает при определенной температуре, называемой температурой плавления.

Плавление льда при атмосферном давлении происходит при температуре плавления $t_{пл} = 0,01^{\circ}\text{C}$ (в практических расчетах принимают равным 0°C).

Количество теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг льда, находящемуся при температуре плавления, для превращения его в воду, называют удельной теплотой плавления $L_{пл}$. Удельная теплота плавления пресноводного льда при нормальных условиях равна удельной теплоте кристаллизации воды $33,3 \cdot 10^4$ Дж/кг. Удельная теплота сублимации (возгонки) льда равна сумме удельной теплоты плавления льда и удельной теплоты испарения воды; при 0°C она равна:

$$L_{воз} = 33,3 \cdot 10^4 + 250 \cdot 10^4 = 283,3 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг.}$$

Коэффициент теплопроводности льда λ принимают в среднем равным $2,24 \text{ Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$. С повышением температуры λ уменьшается незначительно и линейно. Удельную теплоемкость льда вычисляют по формуле Б.П. Вейнберга [5]:

$$c = 2,12 (1 + 0,0037t). \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности для точечного источника тепла с различными коэффициентами теплопроводности в различных направлениях [4-8]:

$$c\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right); \quad (5)$$

тепловые потоки (количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади в направлении оси) через три плоскости, перпендикулярные координатным осям, будут равны (соотношения Фурье) [7]:

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial \Theta}{\partial x}; \quad q_y = -\lambda_y \frac{\partial \Theta}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda_z \frac{\partial \Theta}{\partial z}, \quad (6)$$

где: q – тепловой поток, Θ – температура, λ – коэффициент теплопроводности.

Закон Фурье показывает, что тепло распространяется от более высоких температур к более низким. Изменение температуры считается пропорциональным изменению по координате и что решения можно складывать.

В предположении, что теплопроводность во всех направлениях одинакова $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ уравнение теплопроводности для точечного источника теплоты имеет вид [7]:

$$c\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

В конечном виде для полупространства имеем следующий вид [5]:

$$\Theta(x, y, z, t) = \frac{q}{c\rho \left[4\pi a \left(t + \frac{R^2}{4ak} \right) \right]^{3/2}} \exp \left[- \frac{r^2}{4a \left(t + \frac{R^2}{4ak} \right)} \right], \quad (8)$$

где κ – коэффициент сосредоточенности.

Разработана программа расчета приращения температурного поля относительно начальной температуры (например, -10°C , -20°C (исходного расчетного значения) по математической модели точечного источника теплоты для процесса взаимодействия ПГМ на основе хлористого кальция и льда. Выбран безводный хлористый кальций, выделяющий тепло при взаимодействии с влагой воздуха и растворении в СЛЮ, и хлористый натрий, поглощающий тепло.

Для сравнительных расчетов примем исходную влажность воздуха 80%.

Коэффициент температуропроводности = 0,00143 принят с сайта http://thermalinfo.ru/publ/tverdyeveshhestva/raznye/led_sneg_teploprovodnost_plotnost_teploemkos_t_v_zavisimosti_ot_temperatury/20-1-0-36.

Расчет приращения температурного поля в пространстве и времени относительно начальной температуры для процесса взаимодействия ПГМ на основе **безводного хлористого кальция** и уплотненного снега приведен на рисунке 3.

Исходные данные: температура = -12°C , коэффициент концентрации $k=0,1$.

Теплофизические свойства снега: плотность $\rho = 600 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость $c = 2,1 \text{ Кдж/(кг*град)}$, теплопроводность $\lambda = 0,64 \text{ Вт/м*град}$.

Характеристики CaCl_2 : радиус $r_2 = 0,0025 \text{ м}$ (5 мм), плотность $\rho_c = 2150 \text{ кг/м}^3$, теплота растворения $q = 674,082 \text{ кДж/кг}$.

http://thermalinfo.ru/publ/tverdyeveshhestva/raznye/led_sneg_teploprovodnost_plotnost_teploemkost_v_zavisimosti_ot_temperatury/20-1-0-36.

Произведен расчет в Matcad на уплотненный снег.

Выполнены временные зависимости температуры для расстояний 1 и 10 мм в линейном масштабе:

снег - зависимость q от t , $r=1 \text{ мм}$, линейная шкала.gif.

снег - зависимость Q от t , $r=10 \text{ мм}$, линейная шкала.gif.

$$T_{\text{sn}} := -10.$$

$$c := 2.12(1 + 0,0037 * T_{\text{sn}}) = 2,042.$$

$$\rho := 600.$$

$$\lambda := 0,64.$$

$$a := \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = 5,079 \times 10^{-4}.$$

$$k := 0,1.$$

$$r_1 := 1 \dots 50.$$

$$r_2 := 0,005.$$

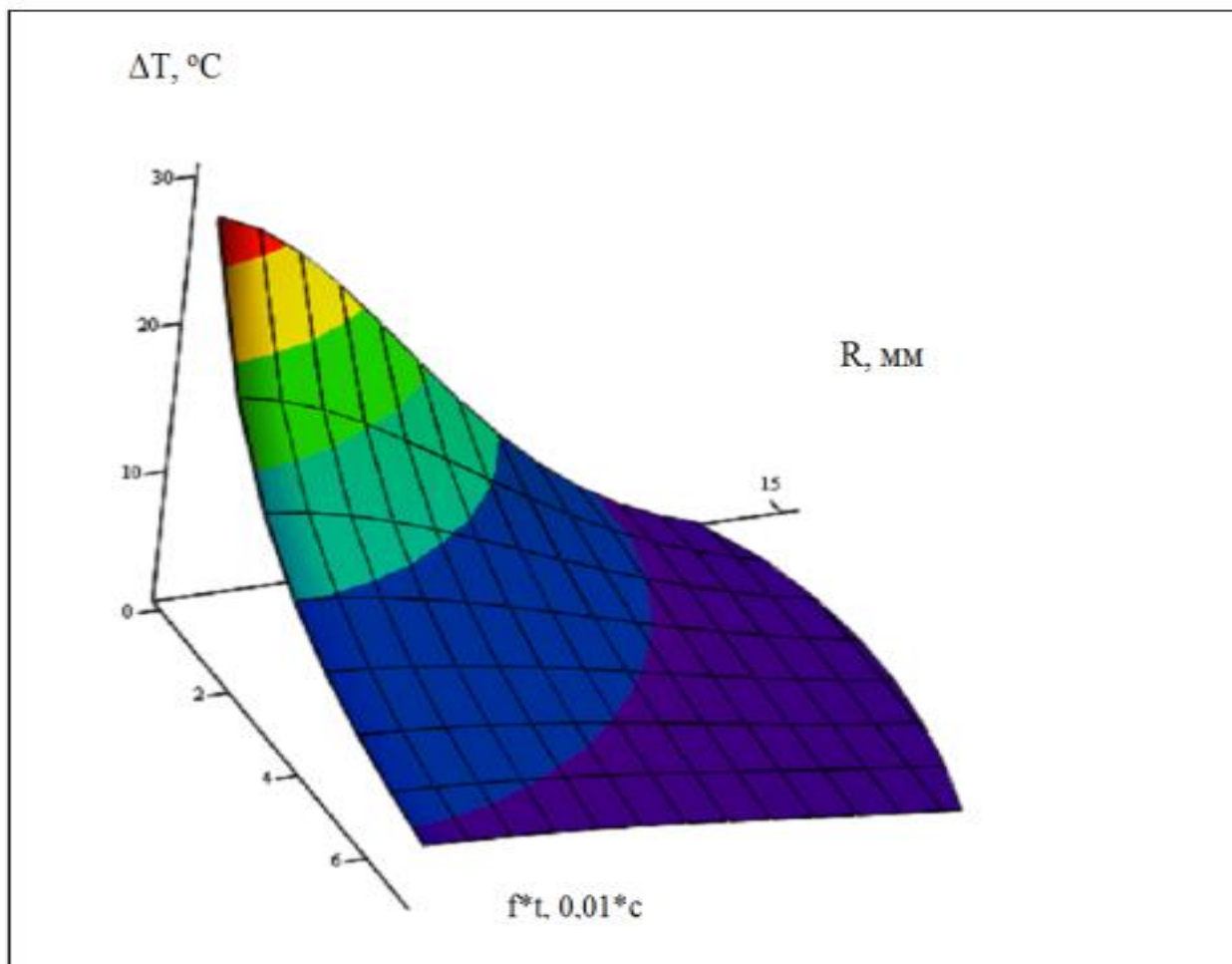
$$t := 0 \dots 300.$$

$$\rho_c := 2150.$$

t =	r ₁ =	Q _{t,r1} =
0	1	28.698
1	2	3.200
2	3	1.367
3	4	0.797
4	5	0.537
5	6	0.392
6	7	0.303
7	8	0.249
8	9	0.200
9	10	0.169
10	11	0.145
11	12	0.126
12	13	0.798
13	14	0.715
14	15	0.646
...

$$q := 674.082 \cdot \frac{4}{3} \cdot \rho_c \cdot \pi \cdot r_2^2 = 0.095$$

$$\Theta_{t,r1} := \frac{q \cdot e^{\left[\frac{-\left(\frac{r_1}{1000}\right)^2}{4a\left(\frac{t}{10} + \frac{r_2^2}{4a \cdot k}\right)} \right]}}{c \cdot \rho \cdot \left[4 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(\frac{t}{10} + \frac{r_2^2}{4 \cdot a \cdot k} \right) \right]^{\frac{3}{2}}}$$



a

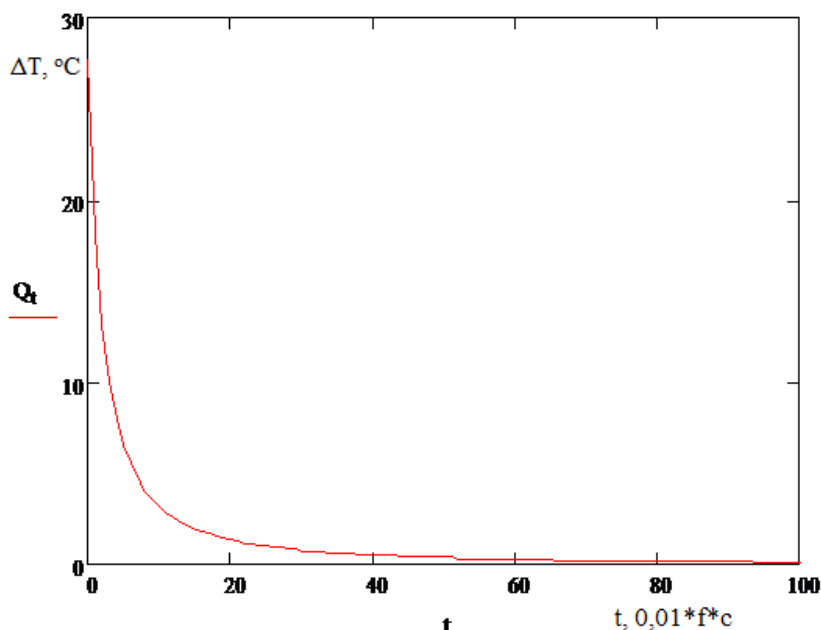


График на расстоянии 1 мм
График $\Theta(t)$
 $t = 0 \dots 1 \text{ с}$
б

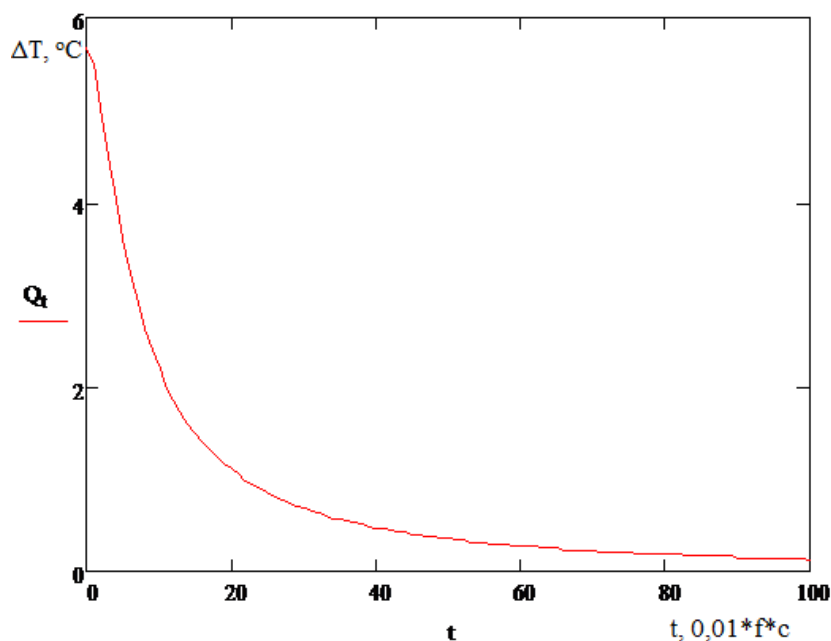


График на расстоянии 10 мм $t = 0 \dots 1 \text{ с}$
в

Рисунок 3. Расчет распределения приращения температурного поля в пространстве и времени относительно начальной температуры для процесса взаимодействия ПГМ на основе хлористого кальция и уплотненного снега (коэффициент 0,01 при времени определяет дискретность расчета в программе Matcad, f – коэффициент приведения времени расчета) (рис. авт.)

Сравнительный расчет приращения температурного поля в пространстве и времени относительно начальной температуры для процесса взаимодействия ПГМ на основе хлористого натрия и уплотненного снега приведен на рисунке 4.

Исходные данные: температура = -12°C, коэффициент концентрации $k=0,1$.

Теплофизические свойства снега: плотность $\rho = 600 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость $c = 2,1 \text{ Кдж/(кг*град)}$, теплопроводность $\lambda = 0,64 \text{ Вт/м*град}$.

Характеристики NaCl: радиус $r_2 = 0,0025 \text{ м}$, плотность $\rho_c = 2165 \text{ кг/м}^3$, теплота растворения $q = -389,736 \text{ кДж/кг}$.

http://thermalinfo.ru/publ/tverdyeveshhestva/raznye/led_sneg_teploprovodnost_plotnost_teploemkost_v_zavisimosti_ot_temperatury/20-1-0-36.

Произведен расчет в Matcad на уплотненный снег. Выполнены временные зависимости температуры для расстояний 1 и 10 мм в линейном масштабе:

Снег - зависимость Q от t, $r=1 \text{ мм}$, линейная шкала.gif.

Снег - зависимость Q от t, $r=10 \text{ мм}$, линейная шкала.gif.

$$\rho := 600, \lambda := 0,64, c := 2,1, a := \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = 5,079 \times 10^{-4}$$

$$k := 0,1, r_1 := 1 \dots 50, r_2 := 0,0025.$$

$$t := 0 \dots 3000.$$

теплота растворения -5,44 ккал/моль.

1 ккал = 4,1868 кДж.

$q_{\text{моль}} = -5,44 * 4,1868 = -22,776 \text{ кДж/моль}$.

$q_{\text{моль}}$ – теплота растворения 1 моля.

$m_{\text{моль}}$ – молярная масса.

$$q_{\text{кг}} = \frac{q_{\text{моль}}}{m_{\text{моль}}} = -389,736$$

$q_{\text{кг}}$ – теплота растворения 1 кг соли.

$\rho_c := 2165$ плотность соли, кг/м^3 .

Тепло, выделенное одной гранулой хлористого натрия радиусом 2,5 мм:

$q = q_{\text{кг}} * 4/3 * \rho_c * \pi * r_2^3 = -0.055$.

$$q := (-389.736) \cdot \frac{4}{3} \cdot \rho_c \cdot \pi \cdot r_2^3 = -0.055$$

$$\Theta_{t,r1} := \frac{q \cdot e^{\left[\frac{-\left(\frac{r_1}{1000}\right)^2}{4a\left(\frac{t}{10} + \frac{r_2^2}{4a \cdot k}\right)} \right]}}{c \cdot \rho \cdot \left[4 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(\frac{t}{10} + \frac{r_2^2}{4 \cdot a \cdot k} \right) \right]^{\frac{3}{2}}}$$

t =	r ₁ =		Q _{t,r1} =
0	1	0	-15.641
1	2	1	-1,807
2	3	2	-0.772
3	4	3	-0.45
4	5	4	-0.303
5	6	5	-0.222
6	7	6	-0.918
7	8	7	-0.171
8	9	8	-0.137
9	10	9	-0.113
10	11	10	-0.095
11	12	11	-0.082
12	13	12	-0.071
13	14	13	-0.063
14	15	14	-0.056
...

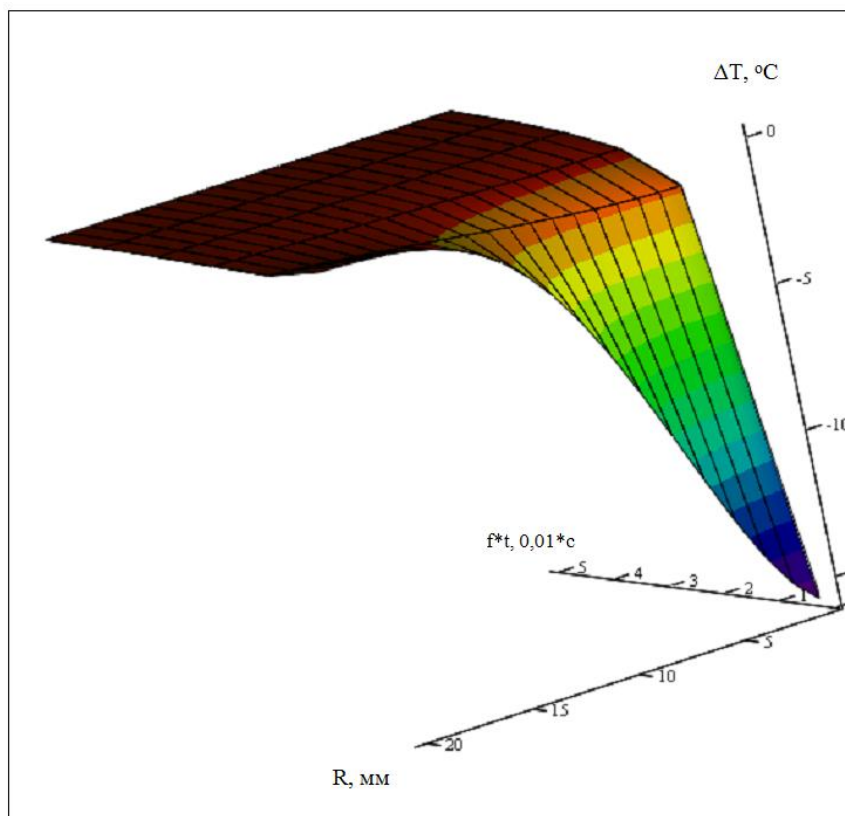


График $\Theta(t, r_1)$. $t = 0 \dots 0,5$ с. $r_1 = 0 \dots 20$ мм
а

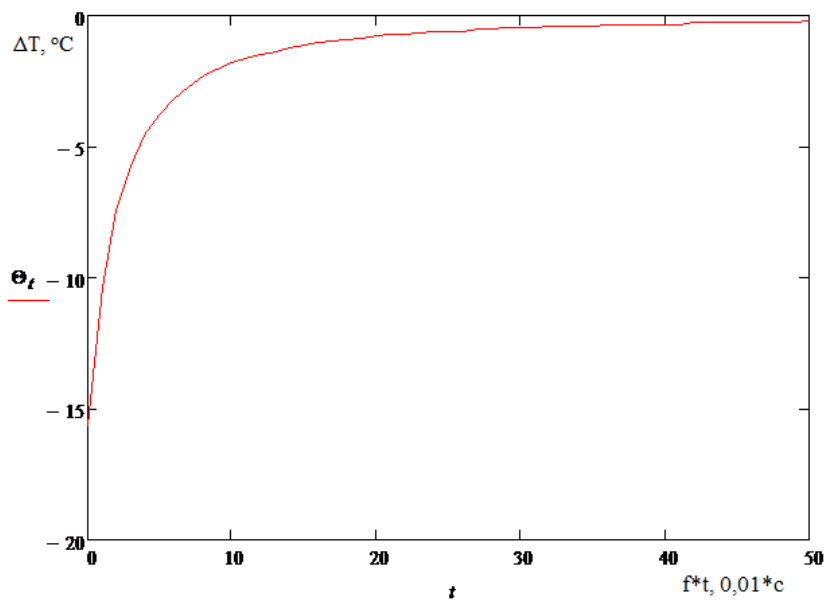


График $\Theta(t)$ $t = 0 \dots 0,5$ с $r_1 = 1$ мм
б

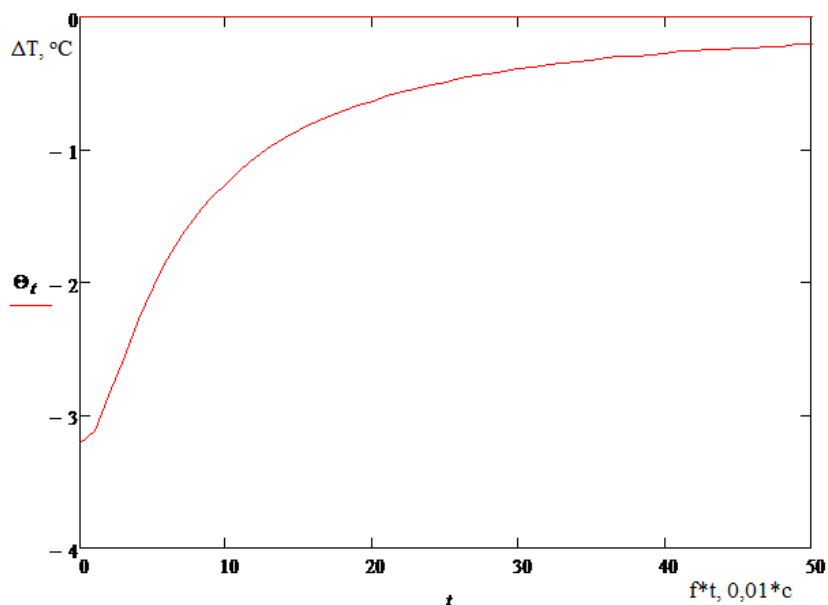


График $\Theta(t)$ $t = 0 \dots 0,5$ с $r_1 = 10$ мм

В

Рисунок 4. Расчет приращения температурного поля в пространстве и времени относительно начальной температуры для процесса взаимодействия ПГМ на основе хлористого натрия и уплотненного снега (рис. авт.)

Обсуждение результатов

Безводный хлористый кальций. На графиках приращения температуры зарегистрировано наличие переходного этапа (меньшего угла наклона на начальном участке графика). Это соответствует реальному физическому процессу взаимодействия ПГМ со льдом.

Температура в малой окрестности возрастает на 28°C . Это расчетным путем показывает практическую эффективность применения безводного хлористого кальция до температур не ниже -28°C . Температура уплотненного снега поднимается от исходной, он сначала превращается в воду, а потом в теплый солевой раствор. После чего солевой раствор остывает до исходной температуры, при этом оставаясь в жидком состоянии. Эффективное расстояние в уплотненном снеге на которое может оказать тепловой эффект гранула безводного хлористого кальция составляет до 14 мм.

Хлористый натрий. На графиках приращения температуры также зарегистрировано наличие переходного этапа (меньшего угла наклона на начальном участке графика). Это также соответствует реальному физическому процессу взаимодействия ПГМ со льдом. Температура уплотненного снега в малой окрестности уменьшается на 15°C . Он сначала превращается в солевой раствор. После чего раствор нагревается до исходной температуры, при этом оставаясь в жидком состоянии. Эффективное расстояние, на которое оказывает тепловой эффект понижения температуры гранула хлористого натрия составляет до 25 мм. Соответственно это определяет требования к расстоянию и однородности распределения гранул ПГМ на основе безводного хлористого кальция.

Анализ графиков потребовал провести приведение времени действия тепловых эффектов к реальным экспериментальным данным. С учетом времени переходного этапа взаимодействия гранул безводного хлористого кальция во влажном уплотненном снеге в

районе 1-2 минут, установленного с учетом работ С.П. Аржанухиной, коэффициент f приведения времени составляет $f = 100 \div 200$. Такой диапазон коэффициента f приведения времени определяется значительной вариативностью и сочетанием температуры и влажности окружающего воздуха, коэффициента уплотнения, температуры и влажности уплотненного снега. Полученные результаты вполне объясняют особенности применения тепловыделяющих ПГМ на основе безводного хлористого кальция и эффекты повторного замерзания СЛЮ после остывания солевого раствора. Это определяет необходимость своевременной уборки продуктов работы этих ПГМ в течение 1-2 часов после распределения. Специфика применения хлористого натрия показывает, что отрицательная температура является стабилизирующим фактором одновременного действия всех гранул, фактически обеспечивает однородное растворение СЛЮ по направлению сверху вниз с образованием жидкой пленки на поверхности растворяемого СЛЮ. До полного растворения СЛЮ коэффициент сцепления остается меньше минимально допустимых показателей и близок к нулю.

В отличие от работ С.П. Аржанухиной [5-8] проведено уточнение исходных показателей расчета, проведен переход от льда к уплотненному снегу, учтено влияние влажности окружающего воздуха и СЛЮ, произведены сравнительные расчеты взаимодействия гранулы ПГМ и СЛЮ для безводного хлористого кальция и хлористого натрия (гранулы выпарной соли).

Выводы

1. Выявлены основные особенности применения гранулированных ПГМ на основе хлористого кальция в температурном диапазоне от -12°C и ниже. Проведенные исследования позволили уточнить фазовые состояния механизма «теплового инъектора» - взаимодействия тепловыделяющего ПГМ со СЛЮ.
2. Для решения задач математического моделирования теплофизического взаимодействия тепловыделяющей гранулы ПГМ и СЛЮ применены методы технологической теплофизики, в частности метод источников теплоты. Проведен сравнительный анализ тепловых эффектов взаимодействия безводного хлористого кальция и хлористого натрия с уплотненным снегом.
3. На основе особенности современных химических ПГМ выделять тепловую энергию при соединении с водой проведено математическое моделирование этого процесса в виде интегрирования точечного источника теплоты, что позволило получить конечное решение в виде аналитической формулы и провести расчет распределения температурного поля в СЛЮ в пространстве и времени.
4. Важным результатом является оценка коэффициента f приведения времени в методе расчета. Данный показатель обосновывает возможность математического моделирования гранулы ПГМ как мгновенного точечного источника теплоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киялбаев, А.К. Экологическая безопасность при эксплуатации автомобильных дорог и городских улиц / А.К. Киялбаев. – Алматы: НИЦ «Гылым», 2003. – 300 с.

2. Борисюк, Н.В. Факторы, влияющие на экологическое состояние городских дорог и улиц / Н.В. Борисюк, А.К. Киялбаев // Автомобильные дороги. Информационный сборник. – М.: Информавтодор. – 1993. №7. – С. 20 - 50.
3. Борисюк, Н.В. Зимнее содержание городских дорог / Н.В. Борисюк. – М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2014. - 132 с.
4. Аржанухина, С.П. Сравнительный анализ эксплуатационных свойств противогололедных материалов для зимнего содержания автомобильных дорог / С.П. Аржанухина // Дороги и мосты. - 2011. - №26. - С. 123-138.
5. Аржанухина, С.П. Отраслевые особенности применения хлорида кальция / С.П. Аржанухина // Строительные материалы. - 2010. - №10. - С. 60-61.
6. Аржанухина, С.П. Сравнительные демонстрационные испытания противогололедных материалов на основе хлоридов / С.П. Аржанухина // Строительные материалы. - 2009. - №5. - С. 14-16.
7. Аржанухина, С.П. Совершенствование технологий применения противогололедных материалов при зимнем содержании автомобильных дорог. – Волгоград: ВолГАСУ. Диссертация ... уч. степ. канд. техн. наук. 2009. – 160 с.
8. Аржанухина, С.П. / Теоретические и правовые основы применения чистых противогололедных материалов на основе хлоридов кальция и натрия // И.Г. Овчинников, С.П. Аржанухина, А.В. Кочетков / Дорожная держава. - 2009. - №16. – С. 58 – 63.
9. Барац, Я.И. Математические модели технологической теплофизики и физических взаимодействий / Я.И. Барац, И.А. Маслякова, Ф.Я. Барац. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. – 92 с.
10. Барац, Я.И. Математические модели технологической теплофизики и физических взаимодействий / Я.И. Барац, И.А. Маслякова, Ф.Я. Барац. Саратов: СГТУ, 2002. - 92 с.
11. Барац, Я.И. Применение принципа пространственно-временного соответствия в решении дифференциального уравнения теплопроводности для линейного источника теплоты / Я.И. Барац, Л.Р. Милованова // Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства: материалы Междунар. конф.: в 2 ч. Волгоград: ВГТУ, 2003. Ч. 1. С. 73-76.
12. Барац, Я.И. Метод расщепления уравнения теплопроводности при решении теплофизических задач, возникающих при механической обработке / Я.И. Барац, Л.Р. Милованова // Вестник СГТУ. – 2010. – №1 (44). – С. 28-34.
13. Бобков, А.В. Выбор требований к противогололедным материалам для зимнего содержания автомобильных дорог мегаполиса / А.В. Бобков, С.П. Аржанухина, А.В. Кочетков и др. // Вода: Химия и технология. – 2013. – №4. – С. 106-115.
14. Бобков, А.В. Совершенствование технологий зимнего содержания дорог на основе применения безводного хлористого кальция / А.В. Кочетков, С.П. Аржанухина, А.В. Бобков // Грузовик. - 2014. - №5. - С. 42-48.
15. Бобков, А.В. Совершенствование рецептур противогололедных материалов / А.В. Кочетков, Л.В. Янковский, А.В. Бобков и др. // Идентификационный номер статьи в журнале: 77TVN315 Интернет-журнал «Наукоедение» Том 7, №3 (2015) URL статьи <http://naukovedenie.ru/PDF/77TVN315.pdf>; DOI: 10.15862/77TVN315 (<http://dx.doi.org/10.15862/77TVN315>).

Kokodeeva Natalia Evsegneevna

Saratov state technical university of Gagarin Yu.A., Russia, Saratov
E-mail: kokodeewa@mail.ru

Bobkov Altkhsandr Vitalievich

Saratov state technical university of Gagarin Yu.A., Russia, Saratov
E-mail: nii_eko@mail.ru

Kochetkov Andrey Viktorovich

Perm national research polytechnical university, Russia, Perm
E-mail: soni.81@mail.ru

Arganuhina Sofia Petrovna

Federal autonomous institution «Russian road research institute «ROSDORNII», Russia, Moscow
E-mail: soni.81@mail.ru

Klimov Dmitry Andreevich

Vladimir state university, Russia, Vladimir
E-mail: kda88@inbox.ru

Shashkov Igor Gennadiyevich

Military and air academy of a name of professor N.E. Zhukovskogo and Yu.A. Gagarin, Russia, Voroneg
E-mail: igoshashkov@yandex.ru

Comparative mathematical modeling of heatphysical interaction of granules of chlorides of calcium and sodium and snow ice formation

Abstract. The main features of use of the granulated deicing materials on the basis of chloride calcium and chloride sodium in the temperature range from - 120s are revealed below. The conducted researches allowed to specify phase conditions of the mechanism of "a thermal injektor" - interactions of heatallocating protivogoledny material and a snow ice formation.

Methods of technological thermophysics, in particular method of sources of warmth are applied to the solution of problems of mathematical modeling of their heatphysical interaction. The comparative analysis of thermal effects of interaction of waterless chloride calcium and chloride sodium with condensed snow is carried out.

On the basis of feature of modern chemical deicing materials to allocate or absorb thermal energy at connection with water mathematical modeling of this process in the form of integration of a dot source of warmth that allowed to receive the final decision in the form of an analytical formula and to carry out calculation of distribution of a temperature field in space and time is carried out. The received results explain features of use of the materials heatallocating the protivogolednykh on the basis of waterless chloride calcium and effects of repeated freezing of a snow ice formation after cooling of salt solution.

Keywords: waterless chloride sodium; chloride calcium; deicing material; the winter contents; the highway; phase state; the condensed snow; ice; ice; warmth source; mathematical modeling