

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2021, №3, Том 8 / 2021, N 3, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-3-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS321.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS321 (<https://doi.org/10.15862/06SATS321>)

Разработка системы термостабилизации одежды ездового полотна с использованием низкотемпературной геотермальной энергии

Костенко С.А., Пискунов А.А., Ганин Н.А.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Костенко Сергей Александрович, e-mail: skostenko1973@mail.ru

Аннотация. Многоуровневые транспортные развязки играют решающую роль в автодорожной инфраструктуре как во всем мире, так и в России. Существенные проблемы безопасной эксплуатации многоуровневых магистралей в общей системе транспортного потока мегаполиса и территории страны в целом связаны с необходимостью их тщательной расчистки от снега и льда в периоды зимы и межсезонья. Наиболее простым, очевидным и исторически проверенным способом немеханической борьбы с гололедом является применение смесей химических реагентов. Несмотря на то, что качество исходной антигололёдной химической продукции постоянно совершенствуется, обновляется состав реагентов, направленность их действия остаётся неизменной — снижение температурной точки плавления льда и снега. К сожалению, в процессе плавления при обильном снегопаде концентрация и, соответственно, вязкость рассола увеличиваются, приводя к «замазыванию» асфальтового покрытия, тем самым ухудшая и без того сложную обстановку на дороге. Одним из привлекательных способов содержания дорожного полотна в надлежащем состоянии является его подогрев для избавления от наледи. Методы прямого теплоподвода такие как системы центрального отопления или электроподогрев являются слишком

дорогостоящими и экономически неоправданными. Перспективным представляется использование низкотемпературной геотермальной энергии, позволяющее существенно снизить энергозатраты и повысить экономическую привлекательность транспортных проектов. Настоящая работа посвящена исследованию практической применимости технологии термостабилизации одежды ездового полотна с использованием низкотемпературной геотермальной энергии в рамках внедрения концепции «Наилучших доступных технологий» в соответствии с ГОСТ Р 56828.15-2016 в части энергоэффективности инфраструктурных объектов. По итогам работы авторами статьи приводятся результаты проведённого исследования и численного моделирования, а также их сравнения. Результаты, представленные в данной статье, являются частью диссертационного исследования «Разработка новых технологических решений одежды ездового полотна на транспортных развязках» Костенко С.А.

Ключевые слова: многоуровневые транспортные развязки; низкотемпературная геотермальная энергия; наилучшие доступные технологии; дорожная одежда ездового полотна; тепловой насос; термостабилизация; экологическая безопасность

Heat setting system development of bridge floor surface using low-temperature geothermal energy

Sergey A. Kostenko, Aleksandr A. Piskunov, Nikita A. Ganin

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: Sergey A. Kostenko, e-mail: skostenko1973@mail.ru

Abstract. Multilevel transport interchanges play a decisive role in the road infrastructure both throughout the world and in Russia. Significant problems of the safe operation of multi-level highways in the general metropolitan traffic system and the country territory, in general, are associated with the need to thoroughly clear them of snow and ice during winter and off-season periods. The simplest, most obvious, and historically proven non-mechanical ice control method is using the chemical reagents mixtures. Despite the fact that the quality of the original anti-ice chemical products is constantly being improved, the reagents composition is updating, the target operation remains unchanged — a decrease in the ice and snow melting temperature point. Unfortunately, in the process of melting with heavy snowfall, the concentration and, accordingly, the brine viscosity increases, leading to "oiling" of the asphalt pavement, thereby worsening the already difficult situation on the road. One of the attractive ways to keep the roadway in proper condition is to heat it to get rid of ice. Direct heating methods such as central heating or electric heating are too costly

and economically unfeasible. It seems promising to use low-temperature geothermal energy, which will significantly reduce energy costs and increase the transport projects' economic attractiveness. This work is devoted to the study of the practical applicability of the bridge floor surface heat setting technology using low-temperature geothermal energy as part of the "Best available technologies" concept implementation in accordance with GOST R 56828.15-2016 in terms of infrastructure facilities energy efficiency. Based on the work results, the authors provide the study results and numerical modeling, as well as their comparison. The results presented in this article are a part of the dissertation research "New technological solutions development for the bridge floor surface at transport interchanges" Kostenko S.A.

Keywords: multilevel transport interchanges; low-temperature geothermal energy; best available technologies; bridge floor surface; heat pump; heat setting system; environmental safety

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons "Attribution" («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons "Attribution" 4.0 Global License



Введение

Introduction

В современных мегаполисах мира стремительными темпами расширяется строительство транспортных сооружений и развязок, связанное с постоянным развитием промышленности, интенсификацией производственных отношений и приростом населения, что, как следствие, приводит к увеличению количества транспортных средств и загруженности дорог.

Максимальные затраты дорожных служб приходятся на холодный период года из-за необходимости содержания дорог с надлежащим обеспечением безопасности движения ([распоряжение Минтранса России от 16.06.2003 № ОС-548-р](#) «Руководство по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах», СТО 26233397 Мосавтодор.1.2.1.02-2014 «Требования к качеству содержания автомобильных дорог регионального или межмуниципального значения московской области»).

Основным транспортно-эксплуатационным показателем, относящимся к потребительским свойствам автодорог, считается проектная скорость движения транспорта. Сложнее всего обеспечивать расчетную скорость в осенне-зимний период, когда зимняя скользкость приводит к снижению фактической скорости и заторам, что в свою очередь ведет к уменьшению пропускной способности, значительному увеличению времени нахождения автотранспорта в пути, ухудшению придорожной экологической обстановки и возрастанию стоимости перевозок.

Зимняя скользкость в соответствии с нормативными документами классифицируется по трем категориям: снежный накат, рыхлый снег и стекловидный лёд.

- снежный накат состоит из уплотнённого слоя снега плотностью до $\approx 300\text{--}600 \text{ кг/м}^3$, с коэффициентом сцепления $0,1\text{--}0,25$;
- рыхлый снег, наслаивающийся равномерным слоем в случае выпадения в спокойную погоду, плотностью до $\approx 60\text{--}200 \text{ кг/м}^3$, с коэффициентом сцепления до $0,2$;
- стекловидный лёд представляет из себя твёрдый покров плотностью до $\approx 700\text{--}900 \text{ кг/м}^3$, с коэффициентом сцепления $0,08\text{--}0,15$.

Применение профилактического способа борьбы со снежно-ледяными наслоениями в Российской Федерации сдерживается недостатком в дорожных организациях современной техники для

разнесения противогололёдных химических реагентов с минимальным расходом (до 0,01 кг/м²) и высокой точностью дозирования [1].

Сегодня, как никогда, исследователи и инженеры в области мостостроения заинтересованы в разработке новых антигололёдных систем, обеспечивающих безопасный и комфортный проезд по транспортным развязкам в зимний период [1; 2]. В настоящее время существует несколько способов, в той или иной степени решающих эту проблему¹.

1. Традиционный механический способ уборки комбинированный с применением химических реагентов². Однако, для того чтобы гарантировать нескользкую поверхность дороги снегоуборочной технике необходимо перемещаться постоянно, что дополнительно затрудняет движение автотранспорта и не позволяет проводить очистку полотна одномоментно и одновременно из-за ограниченности количества спецтехники и обслуживающего её персонала [3]. Данный метод также негативно влияет на покрышки и на металлические части автомобилей за счёт возникающего после обработки дорожного полотна солевого рассола. При этом такая уборка нередко формирует на краю автотрассы снежные отвалы, которые после обильных снегопадов затрудняют как магистральное движение, так и съезды на транспортные развязки. Фрикционные материалы, заключенные в смесях, сносятся с проезжей части, засоряют края придорожной полосы, что приводит к необходимости выполнения весной дополнительных работ по очистке дорог и примыкающих придорожных площадей [4; 5].

2. Установка распылителей жидких или эмульгированных химических реагентов в основание одежды ездового полотна [6]. Эта технологически сложная модуль-система, задачей которой является обработка дорожного полотна химическими реагентами в автоматическом режиме². При этом плотность рассеивания рассчитывается на основании эмпирических оценок, не всегда являющихся оптимальными [7].

Несмотря на то, что качество применяемой антигололёдной химической продукции постоянно совершенствуется, обновляется состав реагентов, направленность их действия остаётся неизменной — снижение температурной точки плавления льда и снега [8; 9].

¹ Russell G. Alger. Anti-Icing Coatings And Methods. // Michigan Tech Patents. 122. — 2014. — URL: <https://digitalcommons.mtu.edu/patents/122> (дата обращения: 03.08.2021).

² Sell Stephan. Anti-Icing Coatings And De-Icing Technical Approaches And Status / Stephan Sell, Nadine Rehfeld // Prepared for Winterwind Östersund, 12th February 2013. — URL: https://windren.se/WW2013/52_Sell_Stephan_Winterwind_2013.pdf (дата обращения: 03.08.2021).

При попадании антигололёдных химических реагентов на поверхность снега и льда их кристаллы начинают поглощать из внешней среды влагу. При экзотермическом фазовом переходе из твёрдой фазы в жидкую происходит выделение тепла, которое дополнительно тратится на плавление льда и снега. Появляющийся рассол имеет температуру ниже температуры замерзания чистой воды. В процессе плавления при обильном снегопаде концентрация и, соответственно, вязкость рассола увеличиваются, приводя к «замасливанию» асфальтового покрытия, тем самым ухудшая и без того сложную обстановку на дороге.

В последнее время установлено, что химические реагенты на основе ацетата аммония, в которых присутствует азот, чрезвычайно опасны. Безвредные нитрифицирующие бактерии, которые живут в почве и находятся в спящем состоянии, не агрессивны, но им достаточно соприкоснуться с азотсодержащими соединениями, как они начинают репродуцироваться и модифицировать аммоний во вредные нитраты и нитриты.

Весь процесс окисления аммония в нитраты идёт в несколько стадий и формированием различных соединений, где азот обладает разной степенью окисления, включая гидросиламин и закись азота [10; 11].

Очевидно, что такие комбинированные химические реагенты не целесообразно даже тестировать, поскольку они достаточно опасны. Крупные города уже перегружены всевозможными выбросами — промышленными, транспортными и микробиологическими [12].

Оба вышеперечисленных подхода не лишены крайне серьёзных недостатков, основными из которых являются следующие:

- ограниченный срок воздействия химического реагента [3];
- необходимость наличия квалифицированного обслуживающего персонала [5];
- коэффициент сцепления автомобильных покрышек с дорожным покрытием падает на 30 % даже по сравнению с влажным покрытием [13; 14];
- применяемые химические реагенты являются биотоксикантами и аллергенами [10–12];
- разбрызгиваемый движущимся транспортом маслянистый рассол, который образуется после плавления льда и снега, затрудняет обзор и способствует увеличению мелких дорожно-транспортных происшествий [15; 16].

В настоящее время правительством России провозглашены новые приоритетные курсы развития в области энергоэффективности, которые

был обновлены в 2020 году с началом осуществления национальных программ «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры» и «Безопасные и качественные автодороги» (БКАД).

В соответствии с вышеперечисленными приоритетными направлениями развития авторы предлагают иной подход к решению проблемы антиобледенения дорог при отрицательных температурах — низкотемпературную геотермальную термостабилизацию одежды ездового полотна с применением тепловых насосов.

Настоящая работа посвящена исследованию практической применимости технологии термостабилизации в рамках внедрения концепции «Наилучших доступных технологий» в соответствии с ГОСТ Р 56828.15-2016.

Экспериментальная модель и оборудование

Design of experiments and equipment

На базе научно-исследовательской лаборатории ФГАОУ ВО «РУТ (МИИТ)» коллективом авторов кафедры «Мосты и тоннели» разработана экспериментальная модель одежды ездового полотна размером $\approx 1,15 \text{ м}^2$, выполненная в масштабе 1:20 по отношению к размерам моделируемого предмета (рис. 1, 2), и управляющая процессом термостабилизации установка (рис. 3).

Настоящая модель вместе с модификациями управляющей установки использовалась для экспериментов как с нагревом в зимний период, так и с охлаждением — в летний [17].

Модель — это прямоугольная тепло- и гидроизолированная бетонная плита с фанерной обечайкой, габаритами в плане 1520×755 мм и высотой 220 мм.

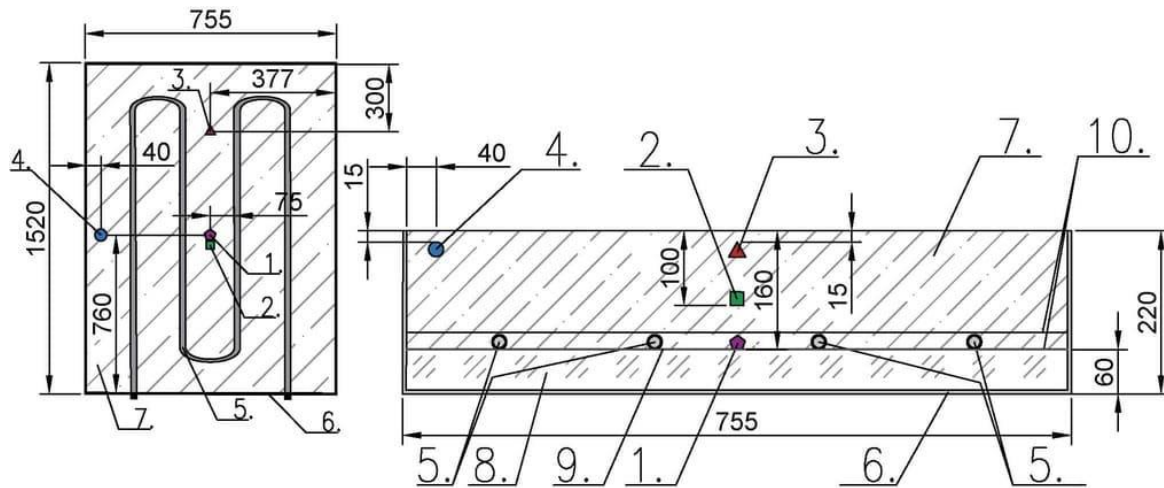
Для исключения теплообмена при термостабилизации на дно уложен лист теплоизолятора (пеностекла), толщиной 60 мм. Для пеностекла: теплопроводность $\lambda = 0,058 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, плотность $\rho = 200\text{--}400 \text{ кг}/\text{м}^3$, прочность при сжатии $R_{\text{сж}} = 2,5\text{--}4 \text{ МПа}$. Для обеспечения гидроизоляции и защиты пеностекляного стройматериала от щелочного воздействия бетона на лист пеностекла уложена плёнка полиэтилена толщиной 0,3 мм в 1 слой.

При заливке в плиту были вмонтированы четыре дистанционных термодатчика, работающих по протоколу АНТ+ с точностью измерений 0,5 °С. Датчики располагались: в нижнем слое на уровне теплоносителя (термодатчик № 1, 160 мм от поверхности), в верхних слоях изделия на

глубине 15 мм от поверхности (термодатчики № 3 и № 4), в средних слоях на глубине 100 мм от поверхности (термодатчик № 2).

Трубу из металлопласта (металлополимера) Henco Rex-Al-Rex d20x2 мм уложили змейкой. Расстояние между трубами 150 мм, отступ от края деревянного каркаса 110 мм.

Для заливки использовался пескобетон М-400 крупнозернистый ГОСТ 7473-2010.



1-4 — Дистанционные термодатчики; 5 — Металлополимерная труба d20×2 мм; 6 — Фанерная обечайка; 7 — Пескобетон; 8 — Теплоизолирующий лист; 9 — Плёнка полиэтилена 0,3 мм; 10 — Строительная стальная сетка ячейкой 70×70 мм

1-4 — Remote heat sensors; 5 — Metal-polymer pipe d20×2 mm; 6 — Plywood shell; 7 — Sand concrete; 8 — Heat insulating sheet; 9 — Polyethylene film 0.3 mm; 10 — Construction steel mesh with cell size 70×70 mm

Рисунок 1. Схема экспериментальной модели одежды ездового полотна и расстановки дистанционных термодатчиков. Вид сверху и в горизонтальной плоскости (рисунок авторов)

Figure 1. Experimental model diagram of the bridge floor surface and the placement of remote temperature sensors. Top and horizontal view (drawing by the authors)



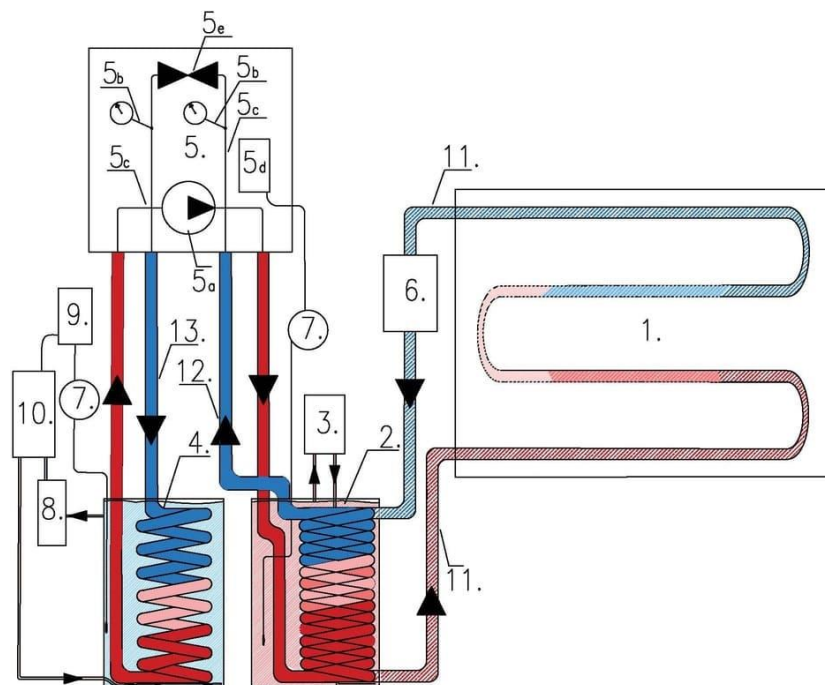
Рисунок 2. Вид экспериментальной модели одежды ездового полотна до и после заливки пескобетоном (фотография авторов)

Figure 2. View of the bridge floor surface experimental model before and after pouring with sand concrete (photo by the authors)

С поверхности экспериментальной модели и с ее нижней части температурные показатели считывались инфракрасным пирометром Fluke-59MAX с интервалом времени 7–8 мин. Погрешность измерений при отрицательных температурах — ± 2 °C, воспроизводимость — ± 1 %, разрешение дисплея — 0,1 °C.

Для измерения температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах использовались образцовые лабораторные ртутные термометры ТЛ-4 со шкалой 0–55 °C и ценой деления 0,1 °C.

Принципиальная схема установки для термостабилизации приведена на рисунке 3.



1 — Модельная плита; 2 — Теплообменник нагревательного контура; 3, 8 — Миксеры; 4 — Теплообменник теплосъемного контура; 5 — Компрессорный блок; 6 — Циркуляционный насос; 7 — Терморегулятор; 9 — Силовой контактор; 10 — Проточный водонагреватель; 11 — Нагревательный контур модельной плиты; 12 — Теплоподающий контур компрессора (конденсатор); 13 — Теплоотбирающий контур компрессора (испаритель)

1 — Model board; 2 — Heating circuit heat exchanger; 3, 8 — Mixers; 4 — Heat removal circuit heat exchanger; 5 — Compressor block; 6 — Circulation pump; 7 — Thermostat; 9 — Power contactor; 10 — Instantaneous water heater; 11 — The heating circuit of the model board; 12 — Compressor heat supply circuit (condenser); 13 — Compressor heat removal circuit (evaporator)

Рисунок 3. Принципиальная схема экспериментальной установки (рисунок авторов)

Figure 3. Schematic diagram of the experimental setup (drawing by the authors)

В эксперименте за термостабилизацию исследовательской модели одежды ездового полотна отвечал собранный стенд, в котором нагрев теплоносителя (воды) в закрытом циркуляционном контуре модельной плиты производился по теплообменной схеме в теплоизолированном теплообменном резервуаре. Нагнетание тепла в этот теплообменник происходило за счёт теплопереноса, осуществляемого компрессором.

Отбор компрессором тепла производился из другого теплообменника, имитирующего геотермальный источник с поддерживаемой температурой на уровне 11 ± 1 °С. Термостатирование (тепловая подпитка) этого теплообменника осуществлялось проточным нагревателем.

Предварительные расчёты теплообменников проводились по формуле [18]:

$$Nu_{дж} = 1,4 \left(Re_{дж} \frac{d}{l} \right)^{0,4} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \cdot (Pr_{ж}/Pr_{с})^{0,25} \quad (1)$$

где:

$Nu_{дж}$ — число Нуссельта для системы;

$Re_{дж}$ — число Рейнольдса для течения воды в трубке;

$Pr_{ж}$ — критерий Прандтля для воды в трубке (6,52 при 22 °С);

$Pr_{с}$ — критерий Прандтля для воды в резервуаре (3,93 при 45 °С).

Поправка на изогнутость трубки производилась введением в качестве множителя поправочного коэффициента, который для змеевиковых труб определяется соотношением:

$$\varepsilon_r = 1 + 1,77 \frac{d}{R} \quad (2)$$

где:

d — диаметр трубки ($1,5 \cdot 10^{-2}$ м);

R — радиус змеевика (0,2 м).

Расчёты показали, что медного трубчатого теплообменника диаметром 15 мм и протяженностью 15 м достаточно для снятия/отдачи тепла на уровне 7 кВт.

Температура в 45 °С в теплообменнике модельной плиты поддерживалась постоянной с помощью терморегулятора. Температура 11 ± 1 °С, поддерживаемая постоянной в теплообменнике компрессора, имитирует реальную температуру геотермальных источников. Таким образом, выбранный тепловой режим установки соответствует стандартной тепловой нагрузке, максимально приближенной к натурным условиям.

Объем воды в контуре модельной плиты составил около 6 литров, в емкостях теплообменников — около 80 литров.

Такая схема экспериментального стенда была необходима для отработки конструкционных узлов модели и теплофизической оценки всей схемы в целом, включая тепловые нагрузки и потери.

Экспериментальная часть

Experimental procedure

За 20 часов до начала исследовательского эксперимента модельную плиту переместили на улицу (при температуре $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$), поверхность залили водой, тем самым проведя имитацию обледенения одежды ездового полотна. Толщина ледяного покрова составила от 0,7 до 1,5 мм, продольный уклон поверхности — 30 ‰ (рис. 4).



Рисунок 4. Вид экспериментальной модели одежды ездового полотна до и после выполнения исследовательского эксперимента с имитацией обледенения (фотография авторов)

Figure 4. View of an experimental model of a bridge floor surface before and after a research experiment with icing imitation (photo by the authors)

Скорость ветра в день в области измерений составила 3–5 м/с.

Для контроля и измерения объёма проходящего по системе теплоносителя использовался бытовой счётчик расхода воды.

Разница температур теплоносителя в питающей и обратной ветках в устоявшемся стационарном режиме (после ~ 4 часов от начала эксперимента) составляла 0,3–0,4 $^{\circ}\text{C}$.

График изменения разницы температур теплоносителя от времени (симбатный со снимаемой внешним контуром мощностью нагрева) представлен на рисунке 6. Расчетная снимаемая мощность изменялась в примерном диапазоне от 4,2 до 0,5 кВт.

Результаты эксперимента показали, что начало оттаивания льда происходило через $t_{\text{эксп}} \approx 2\text{--}2,5$ часа, а на полное оттаивание поверхности экспериментальной модели одежды ездового полотна потребовалось $t_{\text{эксп}} \approx 4\text{--}4,5$ часа (рис. 6).

Как следует из приводимых графиков изменения температур (рис. 5, 6) процесс распространения тепловой волны в теле модели является нестационарным и в общем случае может быть описан

достаточно сложной системой дифференциальных уравнений при задании определенных краевых условий [19; 20].

По прошествии 4–4,5 часов эксперимента процесс теплопередачи приобретает характер стационарного.

После 6 часов с начала исследований эксперимент остановлен и завершён.

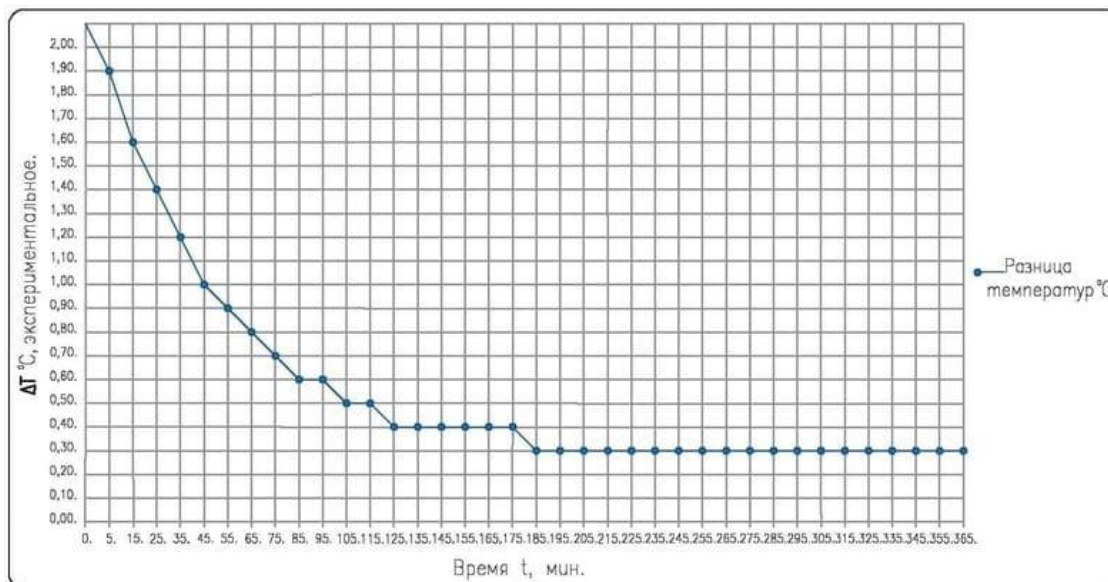


Рисунок 5. График изменения разницы температур теплоносителя (прямая/обратная подачи) во времени (рисунок авторов)

Figure 5. Graph of the temperature difference change of the coolant (forward/reverse flow) over time (drawing by the authors)

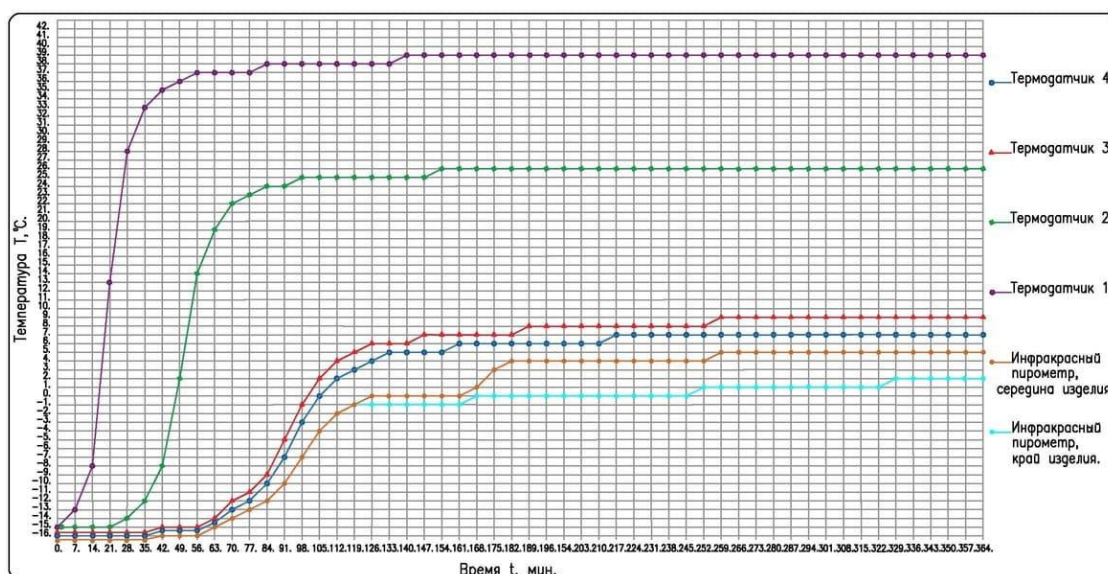


Рисунок 6. График процесса изменения температуры на поверхностях и в слоях во времени на экспериментальной модели одежды ездового полотна (рисунок авторов)

Figure 6. Graph of the temperature changes processes on surfaces and in layers over time on an experimental model of bridge floor surface (drawing by the authors)

Аналитическое решение

Analytical solution

Для описания процесса термостабилизации экспериментальной модели одежды ездового полотна в зимний период при оттаивании поверхностной наледи проведены оценочные расчёты тепловых потоков для установления корреляции с вышеприведенными экспериментальными результатами.

Поскольку расчёты являются оценочными, то были приняты следующие допущения:

1. В период после установления стационарного теплового потока зависимость температуры от вертикальных координат описывается линейной зависимостью; градиент температуры — постоянен.
2. Радиационное тепловое излучение нагретой поверхностью блока в окружающую воздушную среду не учитывается в силу незначительности.
3. Для учёта неравномерности нагрева по горизонтальной координате бетонный блок может быть представлен как суперпозиция 3-х элементов теплоизолированных по периметру и не взаимодействующих друг с другом через боковые стенки.
4. Уравнения теплопереноса рассматриваются в интегральном виде.
5. Нагрев нижней части блока — равномерен по всей поверхности.
6. Значения термодинамических коэффициентов принимаются усреднёнными табличными [21].

С учетом принятых допущений схема распределения стационарного теплового потока для параллелепипеда с теплоизолированными боковыми стенками (без учета фазовых переходов) состоит из:

1. Теплопередача от нагревателя через толщину бетона к поверхности.
2. Конвективный перенос тепла от поверхности блока к воздуху.

Таким образом, уравнение стационарного состояния системы для каждого выделенного элемента должно удовлетворять равенству двух тепловых потоков — теплопроводного через объем бетонного параллелепипеда (уравнение Фурье) и далее — конвективного через пограничный слой (уравнение Ньютона-Рихмана) [18; 22; 23]:

$$P = (\lambda \cdot S \cdot (T_2 - T_1))/h = \alpha \cdot S \cdot (T_1 - T_b) \quad (3)$$

где:

P — полная мощность тепловых потерь (тепловой поток), Вт;

S — площадь сечения параллелепипеда (блока), м²;
 T_2 — температура нагреваемой (нижней) грани блока, К;
 T_1 — температура поверхностной (верхней) грани блока, К;
 T_b — температура окружающего воздуха, К;
 h — высота блока, м;
 λ — коэффициент теплопроводности (удельная теплопроводность), Вт/(м·К);
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Из этого уравнения можно найти температуру поверхности блока при установившемся процессе теплопереноса:

$$T_1 = (\lambda \cdot T_2 + h \cdot \alpha \cdot T_b) / (h \cdot \alpha + \lambda) \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи α — рассчитывается в соответствии с требованиями СНиП 2.03.04.84 часть 2 по формуле:

$$\alpha = 5,8 + 11,6\sqrt{v} \quad (5)$$

где v — скорость ветра в м/с.

В соответствии с формулой (4) расчетная температура верхней поверхности блока должна установиться на уровне +5,7 °С, что коррелирует с экспериментальными данными $\approx +5-5,5$ °С в центральной части и подтверждает правильность оценочных расчетов.

Установившийся удельный поток тепла P (удельное теплотребление) составит в соответствии с формулой (3) — около 0,5 кВт/м².

Удельное количество тепла, отданного теплоносителем за промежуток времени Δt составит:

$$Q = V_{уд} \cdot \rho \cdot c_{уд} \cdot \Delta T \cdot \Delta t \quad (6)$$

где:

Q — общее количество отданного тепла, Дж;

$V_{уд}$ — удельный объем (расход) проходящего теплоносителя, м³;

ρ — плотность теплоносителя, кг/м³;

$c_{уд}$ — удельная теплоёмкость теплоносителя, кДж/(кг·град);

ΔT — изменение температуры теплоносителя, К.

Отсюда можно оценить расчетный расход теплоносителя для установившегося стационарного режима теплопереноса, который должен

составить $1,64 \text{ м}^3/\text{час}$. За время с 4-го по 6-ой час прошедший объем теплоносителя составил $3,55 \text{ м}^3$, что коррелирует с расчётными $3,28 \text{ м}^3$.

Процесс таяния поверхностного слоя снега/льда, требующий дополнительных теплотрат, разбивается на 3 стадии:

- нагрев льда от $T_{\text{в}}$ до $0 \text{ }^\circ\text{C}$;
- фазовый переход;
- нагрев воды от $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до T_1

Расчётная величина поправки на удельные теплотери, связанные с таянием поверхностного слоя наледи толщиной 1 мм, составляет около $95 \text{ Вт}\cdot\text{час}$.

Если принять выше рассчитанную удельную мощность для установившегося потока теплообмена $500 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (т. е. энергопотребление $0,5 \text{ кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^2$), то энергопотребление в случае таяния тонкой корки льда в 1 мм возрастает примерно до $0,6 \text{ кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^2$ или на 20 %.

Приняв плотность свежеснегавшего сухого снега $40\text{--}60 \text{ кг}/\text{м}^3$ [24; 25], можно сказать, что энергопотребление возрастает на 20 % на каждые 15 мм осадков в зимний период при температурах ниже $-10 \text{ }^\circ\text{C}$.

В стационарном режиме энергопотребление всего модельного объекта за 2 последних часа эксперимента должно составить $\sim 1,15 \text{ кВт}\cdot\text{час}$ (удельная мощность теплосъёма $\sim 500 \text{ Вт}/\text{м}^2$, площадь поверхности плиты $\sim 1,15 \text{ м}^2$, время измерений — 2 часа). Экспериментально зафиксированное интегральное энергопотребление компрессора (измеряемое электросчетчиком прямого включения) составило $0,33 \text{ кВт}\cdot\text{час}$. Таким образом, повышающий коэффициент теплового насоса в эксперименте составил $\sim 3,5$.

Выводы

Conclusions

1. Полученные в эксперименте результаты по термостабилизации опытного образца одежды ездового полотна в совокупности с проведенным анализом эффективности подземных теплосъемных коллекторов позволяют судить о возможности практического применения предложенного метода.

2. Наиболее приемлемыми для охлаждения и обогрева одежды ездового полотна многоуровневой транспортной развязки в средней полосе России будут являться схемы, использующие коллекторы корзиночного типа, так как бурение скважин на большую глубину могут представлять серьезные проблемы. Наиболее оптимальным

представляется подход, основанный на проектировании и изготовлении нескольких стандартных типоразмеров «корзин», соответствующих наиболее часто встречающимся вариантам укладки и адаптированных к различным грунтам, глубинам залеганий и мощностям теплосъема [26].

3. Как следует из результатов эксперимента, при среднестатистическом зимнем температурном диапазоне в средней полосе России потребная энергетическая нагрузка для поддержания дорожного полотна в безопасном состоянии составляет около $0,5 \text{ кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^2$.

4. Дальнейшее развитие технологии термостабилизации с применением современных геотермальных тепловых насосов, имеющих коэффициент эффективности до 4,5–5,5, в перспективе позволит снизить энергопотребление в 4–5 раз и выйти на показатели $100\text{--}150 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в час.

5. Полученные экспериментальные результаты удовлетворительно коррелируют с расчётными, что говорит об экономической эффективности, целесообразности внедрения и практического применения технологии термостабилизации в целях безопасной эксплуатации мостовых сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нюдь, А.С.** Существующие проблемы выявления и ликвидации зимней скользкости на автомобильных дорогах и мостовых сооружениях / А.С. Нюдь, Е.И. Киряков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2013. — № 2. — С. 354–361. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19092972> (дата обращения: 17.06.2021).
2. **Гуляев, К.М.** Автоматическая противогололедная система фирмы Boschung Mecatronic / К.М. Гуляев, И.С. Григорьев // Молодой ученый. — 2019. — № 27. — С. 46–52. — URL: <https://moluch.ru/archive/265/61453/> (дата обращения: 17.06.2021).
3. **Гончаревич, А.А.** Сравнительная оценка эффективности и последствий применения противогололедных реагентов / А.А. Гончаревич, Т.М. Клокова, Е.Д. Ушакова, Г.Н. Заичко // Успехи в химии и химической технологии. — 2013. — Т 27. — № 5. — С. 126–132. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20382871> (дата обращения: 17.06.2021).
4. **Сахапов, Р.Л.** Обзор исследований по взаимодействию снежного покрова с различными рабочими органами коммунальных машин / Р.Л. Сахапов, М.М. Махмутов, М.М. Махмутов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2016. — Т 18. — № 1–2. — С. 432–434. — URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_1_432_434.pdf (дата обращения: 17.06.2021).
5. **Агарков, А.М.** Анализ машин с механическим способом воздействия на гололед / А.М. Агарков, Э.С. Цакалиди // Инновационная наука. — 2017. — Т 1. — № 3. — С. 13–14. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28798463> (дата обращения: 17.06.2021).
6. **Синицын, Л.А.** Безопасность движения. Автоматическая противогололедная установка / Л.А. Синицын, А.Г. Макушев, С.К. Котов // Транспорт Российской Федерации. — 2006. — № 7. — С. 58–59. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11748680> (дата обращения: 17.06.2021).
7. **Бессарабов, А.М.** Компьютерный менеджмент качества противогололедных материалов для автомобильных дорог / А.М. Бессарабов, А.Н. Глушко, Т.И. Степанова, Е.Л. Гордеева // Известия МГТУ МАМИ. — 2012. — Т 4. — № 2. — С. 121–125. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18787612> (дата обращения: 17.06.2021).

8. **Laturkar, S.V.** Superhydrophobic coatings using nanomaterials for anti-frost applications — review / S.V. Laturkar, P.A. Mahanwar. — DOI <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2016-7-4-650-656> // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. — 2016. — Т 7. — № 4. — С. 650–656. — URL: <http://nanojournal.ifmo.ru/en/articles-2/volume7/7-4/paper16/> (дата обращения: 17.06.2021).
9. **Глушко, А.Н.** Системные исследования плавающей способности противогололедных реагентов / А.Н. Глушко, А.М. Бессарабов, Г.А. Заремба, А.А. Гладкая, О.В. Стоянов // Вестник Технологического университета. — 2015. — Т 18. — № 1. — С. 119–122. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23005124> (дата обращения: 17.06.2021).
10. **Мальшева, А.Г.** Эколого-гигиенические проблемы применения противогололедных реагентов в условиях крупного мегаполиса (на примере территории города Москвы) / А.Г. Мальшева, О.В. Шелепова, М.А. Водянова [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-11-1032-37> // Гигиена и санитария. — 2018. — Т 97. — № 11. — С. 1032–1037. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36552146> (дата обращения: 17.06.2021).
11. **Крятов, И.А.** Методические подходы к обоснованию гигиенических требований к применению противогололедных материалов / И.А. Крятов, Н.И. Тонкопий, М.А. Водянова [и др.] // Гигиена и санитария. — 2014. — Т 93. — № 6. — С. 52–54. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22804041> (дата обращения: 29.06.2021).
12. **Trujillo-González, J.M.** Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses / J.M. Trujillo-González, M.A. Torres-Mora, S. Keesstra, E.C. Brevik, R. Jiménez-Ballesta. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.101> // Science of The Total Environment. — 2016. — Т 533. — С. 636–642. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716303126> (дата обращения: 29.06.2021).
13. **Сакута, Н.Б.** Формирование концептуальной модели организации работ по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах / Н.Б. Сакута, Ю.В. Коденцева, И.Н. Гайнулина // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. — 2016. — № 3. — С. 80–86. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26087147> (дата обращения: 29.06.2021).
14. **Casey, P.C.** Impacts of Using Salt and Salt Brine for Roadway Deicing / P.C. Casey, C.W. Alwan, C.F. Kline, G.K. Landgraf, K.R. Linsenmayer. — Айдахо: CTC & Associates LLC, 2014. — 140 с. — URL: <https://professionalsnowfightersassociation.org/wp-content/uploads/2019/04/saltimpacts-copy.pdf> (дата обращения: 29.06.2021).
15. **Payne, V.F.** Oil and Gas Well Brines for Dust Control on Unpaved Roads — Part 1: Ineffectiveness / V.F. Payne. — DOI <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n27p398> // European Scientific Journal, ESJ. — 2018. — Т 14. — № 27. — С. 398. — URL: <https://ejournal.org/index.php/esj/article/view/11309> (дата обращения: 29.06.2021).
16. **Кочетков, А.В.** Совершенствование рецептур низкотемпературных противогололедных материалов / А.В. Кочетков, Л.В. Янковский, С.П. Аржанухина [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/77TVN315> // Интернет-журнал «Науковедение». — Интернет-журнал «Науковедение». — Т 7. — № 3. — С. 77TVN315 — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/77TVN315.pdf> (дата обращения: 29.06.2021).
17. **Костенко, С.А.** Разработка системы холодильной термостабилизации одежды ездового полотна на транспортных развязках с реверсивным использованием низкотемпературной геотермальной энергии / С.А. Костенко, А.А. Пискунов // Инновации и инвестиции. — 2021. — № 7. — С. 82–88. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46412096> (дата обращения: 29.06.2021).
18. **Михеев, М.А.** Основы теплопередачи / Михеев М.А., Михеева И.М. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
19. **Кудряшов, Н.А.** Приближенные решения одной задачи нелинейной теплопроводности / Н.А. Кудряшов // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2005. — Т 45. — № 11. — С. 2044–2051. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9144795> (дата обращения: 12.07.2021).
20. **Формалев, В.Ф.** Теплопроводность анизотропных тел. Аналитические методы решения задач / В.Ф. Формалев. — М.: Физматлит, 2015. — 312 с.
21. **Гурвич, Л.В.** Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев [и др.]. — М.: Наука, 1982. — 823 с.

22. Давидзон, М.И. О законе охлаждения Ньютона — Рихмана / М.И. Давидзон // Вестник Ивановского государственного университета. Серия: Естественные, общественные науки. — 2010. — № 2. — С. 70–75. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15203722> (дата обращения: 12.07.2021).
23. Auriault, J.-L. The paradox of fourier heat equation: A theoretical refutation / J.-L. Auriault. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jengsci.2017.06.006> // International Journal of Engineering Science. — 2017. — Т 118. — С. 82–88. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020722516310333> (дата обращения: 12.07.2021).
24. Шмакин, А.Б. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции / А.Б. Шмакин, Д.В. Турков, А.Ю. Михайлов // Криосфера Земли. — 2009. — Т 13. — № 4. — С. 69–79. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13009709> (дата обращения: 12.07.2021).
25. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. — М.: Советская школа, 2005. — 608 с.
26. Костенко, С.А. Организация укладки подземного контура теплообменника при использовании низкотемпературной геотермальной системы для термостабилизации дорожного полотна на многоуровневых транспортных развязках / С.А. Костенко, А.А. Пискунов, Н.А. Ганин // Инновации и инвестиции. — 2021. — № 3. — С. 307–313. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45427388> (дата обращения: 12.07.2021).

Сведения об авторах:

Костенко Сергей Александрович — аспирант кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: skostenko1973@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7541-6826>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1072926

Пискунов Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: a.piskunov52@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5552-5419>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Ганин Никита Алексеевич — аспирант кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: nikitocg2140@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0171-4959>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1082443

Статья получена: 09.08.2021. Принята к публикации: 20.10.2021. Опубликовано онлайн: 03.11.2021.

REFERENCES

1. Nyud A.S., Kiryakov E.I. Existing Problems of Revealing and Removing the Winter Slipperiness on Highways and Bridge Constructions. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013; (2): 354–361. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19092972> (accessed 17th June 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Gulyayev K.M., Grigor'yev I.S. [Automatic deicing system from Boschung Mecatronic]. *Young scientist*. 2019; (27): 46–52. Available at: <https://moluch.ru/archive/265/61453/> (accessed 17th June 2021). (In Russ.).
3. Goncharevich A.A., Klokov T.M., Ushakova E.D., Zaichko G.N. [Comparative assessment of the effectiveness and consequences of the use of deicing reagents]. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2013; 27(5): 126–132. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20382871> (accessed 17th June 2021). (In Russ.).

4. Sakharov R.L., Makhmutov M.M., Makhmutov M.M. Review of Researches on Interaction of Snow Cover by Various Working Bodies of Utility Machines. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016; 18(1–2): 432–434. Available at: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_1_432_434.pdf (accessed 17th June 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Agarkov A.M., Tsakalidi E.S. [Analysis of machines with mechanical impact on ice]. *Innovative Science*. 2017; 1(3): 13–14. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28798463> (accessed 17th June 2021). (In Russ.).
6. Sinitsyn L.A., Makushev A.G., Kotov S.K. [Traffic safety. Automatic deicing device]. *Transport of the Russian Federation. A magazine of science, economy and practice*. 2006; (7): 58–59. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11748680> (accessed 17th June 2021). (In Russ.).
7. Bessarabov A.M., Glushko A.N., Stepanova T.I., Gordeyeva E.L. Computer management of the quality of anti-icing materials for highways. *Vehicles And Power Plants*. 2012; 4(2): 121–125. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18787612> (accessed 17th June 2021). (In Russ.).
8. Laturkar S.V., Mahanwar P.A. Superhydrophobic coatings using nanomaterials for anti-frost applications — review. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2016; 7(4): 650–656. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2016-7-4-650-656>.
9. Glushko A.N., Bessarabov A.M., Zaremba G.A., Gladkaya A.A., Stoyanov O.V. Systemic studies of the melting ability of anti-icing agents. *Bulletin of the Technological University*. 2015; 18(1): 119–122. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23005124> (accessed 17th June 2021). (In Russ.).
10. Malysheva A.G., Shelepova O.V., Vodyanova M.A., Donerian L.G., Ushakova O.V., Yudin S.M. Ecological and Hygienic Problems of The Application of Anti-Icing Agents in A Large Metropolis (For Example, The Territory of Moscow). *Hygiene and sanitation*. 2018; 97(11): 1032–1037. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-11-1032-37>.
11. Kryatov I.A., Tonkopiyy N.I., Vodyanova M.A., Rusakov N.V., Doneryan L.G. et al. Methodical Approaches to The Substantiation of Hygienic Requirements for The Application of Deicing Materials. *Hygiene and Sanitation*. 2014; 93(6): 52–54. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22804041> (accessed 29th June 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Trujillo-González J.M., Torres-Mora M.A., Keesstra S., Brevik E.C., Jiménez-Ballesta R. Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses. *Science of The Total Environment*. 2016; 533: 636–642. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.101>.
13. Sakuta N.B., Kodentseva Y.V., Gaynulina I.N. Basic Principles of Forming of Conceptual Model of Organization of Works on Fight Against Winter Slipperiness on Highways. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; (3): 80–86. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26087147> (accessed 29th June 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Casey P.C., Alwan C.W., Kline C.F., Landgraf G.K., Linsenmayer K.R. Impacts of Using Salt and Salt Brine for Roadway Deicing. Idaho: CTC & Associates LLC; 2014. Available at: <https://professionalsnowfightersassociation.org/wp-content/uploads/2019/04/saltimpacts-copy.pdf> (accessed 29th June 2021). (In Eng.).
15. Payne B.F. Oil and Gas Well Brines for Dust Control on Unpaved Roads — Part 1: Ineffectiveness. *European Scientific Journal, ESJ*. 2018; 14(27): 398. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n27p398>.
16. Kochetkov A.V., Yankovskiy L.V., Arganuchina S.P., Shashkov I.G., Bobkov A.V. Low-temperature deicing means. *Naukovedenie*. 2015; 7(3): 77TVN315 (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/77TVN315>.
17. Kostenko S.A., Piskunov A.A. Development of a cooling thermal stabilization system for dressing clothes on transport interchanges with reversible use of low-temperature geothermal energy. *Innovation and Investment*. 2021; (7): 82–88. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46412096> (accessed 29th June 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
18. Mikheyev M.A., Mikheyeva I.M. [Heat Transfer Basics]. Moscow: Energiya; 1977. (In Russ.).

19. Kudryashov N.A. Approximate solutions to a nonlinear heat conduction problem. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2005; 45(11): 1965–1972. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13480690> (accessed 12th July 2021). (In Eng.).
20. Formalev V.F. [Thermal conductivity of anisotropic bodies. Analytical Problem Solving Methods]. Moscow: Fizmatlit; 2015. (In Russ.).
21. Gurvich L.V., Veyts I.V., Medvedev V.A. et al. [Thermodynamic Properties of Individual Substances: A Reference Book]. Moscow: Nauka; 1982. (In Russ.).
22. Davidzon M.I. [On Newton — Richmann's Law of Cooling]. *Ivanovo State University Bulletin. Series «Natural, Social Sciences»*. 2010; (2): 70–75. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15203722> (accessed 12th July 2021). (In Russ.).
23. Auriault J.-L. The paradox of fourier heat equation: A theoretical refutation. *International Journal of Engineering Science*. 2017; 118: 82–88. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2017.06.006>.
24. Shmakin A.B., Turkov D.V., Mikhailov A.Yu. Model Of Snow Cover with Inclusion of Layered Structure and Its Seasonal Evolution. *Earth's Cryosphere*. 2009; 13(4): 69–79. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13009709> (accessed 12th July 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
25. Volkov A.I., Zharskiy I.M. [Large chemical reference book]. Moscow: Sovetskaya shkola; 2005. (In Russ.).
26. Kostenko S.A., Piskunov A.A., Ganin N.A. Organization of laying an underground heat exchanger circuit using a low-temperature geothermal system for thermal stabilization of the roadway at multi-level traffic intersections. *Innovation and Investment*. 2021; (3): 307–313. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45427388> (accessed 12th July 2021). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Sergey A. Kostenko — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: skostenko1973@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7541-6826>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1072926

Aleksandr A. Piskunov — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: a.piskunov52@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5552-5419>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=807388

Nikita A. Ganin — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: nikitocg2140@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0171-4959>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1082443

Submitted: 09th August 2021. Revised: 20th October 2021. Published online: 03rd November 2021.