

УДК 625.852

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В СЛОЯХ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ

А.М. Боргонутдинов¹, д-р техн. наук, проф.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>

С.Е. Рудов², канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

И.В. Григорьев³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0001-5684-9968),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5684-9968>

Д.С. Ефимов⁴, канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5684-9968>

В.В. Швецова⁵, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-3395-2021](https://orcid.org/0000-0001-5684-9968),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5684-9968>

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский просп., д. 29, г. Пермь, Россия, 614990; e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru

²Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: 89213093250@mail.ru

³Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: silver73@inbox.ru

⁴Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова, ул. Пушкинская, д. 111, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Россия, 346428; e-mail: efimow.denis809@yandex.ru

⁵Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; e-mail: viktoria.shvetsova20@mail.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 19.01.21 / Принята к печати 08.04.21

Аннотация. Экономическое и социальное развитие лесного комплекса страны в целом и отдельных ее регионов невозможно без постоянного совершенствования лесовозных магистралей и поддержания требуемого уровня их технического состояния. Несмотря на то, что на строительство и ремонт лесовозных магистралей выделяются значительные средства, срок службы дорог зачастую не соответствует нормативным значениям. Причиной могут быть ошибки в проектировании, связанные с отсутствием данных по теплопроводности дорожно-строительных материалов, сезонное промерзание грунтов земляного полотна. В совокупности с неудовлетворительными грунтово-гидрологическими условиями данные факторы способствуют значительным деформациям дорожной конструкции. Одна из основных проблем дорожной отрасли в настоящее время – недостаточный учет грунтово-гидрологических условий местности: они оцениваются приближенно по топографическим картам и материалам старых документов или в лучшем случае по результатам рекогносцировочных исследований. При проектировании земляного полотна грунтово-гидрологические условия являются вторичным критерием выбора площадки проведения работ, а место прокладки трассы – первичным. Этим обусловлено то, что лесовозные трассы часто прокладывают на территории, где трудно обеспечить требуемые несущую способность и морозоустойчивость дорожных конструкций. Периодически происходящие промерзания и оттаивания дорожного полотна приводят к возникновению знакопеременных напряжений, значительно ускоряющих разрушение дорожного покрытия, а иногда и основания дороги. Цель работы – изучить механизм влияния температурного режима на дорожную конструкцию. Полевые испы-

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

тания по измерению температуры в дорожной конструкции проводились в г. Перми на практически ровном асфальтированном участке. Представлены особенности процессов, протекающих в слоях дорожной конструкции лесовозных магистралей в период сезонного промерзания. Рассмотрены гипотезы о миграции влаги в сезоннопромерзающих грунтах, влиянии на данный процесс теплоемкости и теплопроводности дорожно-строительных материалов, а также методы моделирования процессов, протекающих в дорожной конструкции под влиянием природно-климатических условий. Получены значения температуры в дорожной конструкции, построены графики, показывающие среднюю температуру в дорожной конструкции в зависимости от времени года (для условий Пермского края). Глубокое понимание механизмов промерзания и оттаивания дорожного полотна позволяет избежать ошибок проектирования и связанных с ними значительных финансовых потерь при строительстве магистральных лесовозных дорог.

Для цитирования: Боргутдинов А.М., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Ефимов Д.С., Швецова В.В. Экспериментальные исследования теплового режима в слоях дорожного покрытия магистральных лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 146–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>

Ключевые слова: лесовозные магистрали, водно-тепловой режим, лесовозные автомобильные дороги, дорожная конструкция, сезонное промерзание, зона промерзания, источники увлажнения, миграция влаги, датчики температуры.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE THERMAL REGIME IN THE PAVEMENT LAYERS OF LONG-DISTANCE FOREST ROADS

Albert M. Borgonutdinov¹, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>

Sergey E. Rudov², Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>

Igor V. Grigorev³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Denis S. Efimov⁴, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5684-9968>

Viktoriya V. Shvetsova⁵, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAC-3395-2021](https://orcid.org/0000-0001-8566-2326), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>

¹Perm National Research Polytechnic University, Komsomol'skiy prosp., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru

²Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, K-64, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru

³Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoye, 3-y km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru

⁴Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, ul. Pushkinskaya, 111, Novocherkassk, 346428, Russian Federation; e-mail: efimov.denis809@yandex.ru

⁵Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: viktoria.shvetsova20@mail.ru

Original article / Received on January 19, 2021 / Accepted on April 8, 2021

Abstract. Economic and social development of both the country as a whole and its individual regions is impossible without maintaining the required level of development and technical condition of the road network. This also applies directly to agricultural producers. Despite the fact that considerable funds are allocated for the construction and repair of roads, the service life of roads often does not meet the standard values. One of the reasons for the low service life of road structures are design errors related to the lack of data on the thermal conductivity of road construction materials, seasonal freezing of the roadbed, which together with unsatisfactory soil and hydrological conditions contribute to significant deformations. One of the main problems in the road industry at present is insufficient consideration of soil and hydrological conditions of the area, which are estimated approximately from topographic maps and materials of old documents or, at best, from the results of reconnaissance surveys. At the same time, it is often difficult to provide the required load-bearing capacity and frost resistance of road structures with an unsuccessfully selected, even short route, since when designing the roadbed, soil and hydrological conditions are secondary, and the choice of the route location is primary. It is well known effect when periodic freezing and thawing of the road surface leads to the appearance of alternating stresses, which significantly accelerate the destruction of the road surface and sometimes the foundation. A thorough understanding of the processes of freezing and thawing of the roadbed makes it possible to avoid design errors, and the significant financial losses associated with them, in the construction of long-distance forest roads. The article presents the features of processes occurring in the layers of road construction during seasonal freezing. Hypotheses about the processes of moisture migration in seasonally frozen soils, the influence of heat capacity and thermal conductivity of road construction materials on the course of these processes, as well as methods for modeling processes occurring in road structures under the influence of natural and climatic conditions are considered, and the results of the field experimental studies are presented.

For citation: Borgonutdinov A.M., Rudov S.E., Grigorev I.V., Efimov D.S., Shvetsova V.V. Experimental Studies of the Thermal Regime in the Pavement Layers of Long-Distance Forest Roads. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 146–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158

Funding: The research was carried out within the framework of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>

Keywords: long-distance forest roads, water and heat regime, forest roads, road structure, seasonal freezing, freezing zone, moisture sources, moisture migration, temperature sensors.

Введение

Анализ работы дорожных покрытий в районах с сезонным промерзанием почвы показывает, что в холодные периоды года в земляном полотне и конструкции дорожной одежды происходят наибольшие разрушения и деформации, являющиеся главной причиной низкого качества автомобильных лесовозных дорог [3]. Одной из основных проблем при их строительстве становится недостаточный учет грунтово-гидрологических условий местности, которые оцениваются приближенно по топографическим картам, материалам старых документов и в лучшем случае путем рекогносцировочных исследований [5]. Изучению закономерностей водно-теплого режима дорожных конструкций посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных ученых. В нашей стране пристальное внимание на данную проблему было обращено еще в начале прошлого века. В настоящее время этот вопрос не утратил актуальность, напротив, в силу все возрастающего уровня автомобилизации, суще-

ственно выросшего среднего расстояния вывозки заготовленной древесины и стремления к повышению качества автомобильных лесовозных дорог [13, 17, 18, 20] привлекает все большее внимание исследователей.

Цель работы – изучить механизм влияния температурного режима на дорожную конструкцию.

Объекты и методы исследования

Первые попытки теоретически обосновать процессы накопления влаги в сезоннопромерзающих грунтах были предприняты еще в исследовании [1]. Также одним из первых этот вопрос рассматривал В.И. Штукенберг. Он показал, что и при отсутствии грунтовых вод наблюдается значительное накопление влаги. Ее миграция, как считал ученый, объясняется совместным влиянием молекулярно-адсорбционных и капиллярных сил (сил кристаллизации), которые воздействуют на поверхность вновь появляющихся кристаллов. Согласно исследованиям, миграция влаги происходит только за счет сил кристаллизации. Причиной притока влаги к зоне промерзания, по мнению Штукенберга, является бóльшая энергия связи молекул воды со льдом, чем с грунтом [6].

А.Ф. Лебедев экспериментальным путем доказал, что приток пленочной воды к зоне промерзания происходит и при отсутствии льда, например в талом грунте, когда из него испаряется влага [10]. Пленочная вода, согласно выводам ученого, под действием молекулярно-адсорбционных сил движется от более толстых к более тонким пленкам.

Р. Рюкли объяснил миграцию влаги силой всасывания, являющейся постоянной величиной. Исследователь вычислял степень морозостойкости через расстояние до уровня грунтовых вод. В основу определения притока влаги ученым были положены 2 гипотезы [6]: всасывающая сила грунта не зависит от температурных градиентов; к движению влаги в замерзающем грунте применим закон Дарси. Эти постулаты для мерзлотных почвогрунтов обоснованы в работах [8, 9].

Скорость притока влаги к фронту промерзания Р. Рюкли вычислял по формуле

$$V = K_g \frac{P_s}{P_w l},$$

где K_g – проницаемость грунта; P_s – сила всасывания; P_w – удельный вес воды; l – расстояние от ледяных линз до уровня грунтовых вод.

Данную формулу возможно использовать при изменении уровня грунтовых вод в незначительных пределах. Если он находится глубоко, то скорость притока воды к границе замерзания почвы будет стремиться к нулю, т. е. практически отсутствовать. Когда фронт промерзания достигнет уровня грунтовых вод, вода начнет подсасываться со слишком большой скоростью, не соответствующей естественным условиям процесса пучения. Недостаток данной теории в том, что не учтено парообразное увлажнение грунта, которое осуществляется под действием температурных градиентов.

Изучению механизмов влагопереноса в грунтах посвящены работы зарубежных [14–16, 19] и отечественных исследователей. Существенный вклад в разработку этого вопроса внесли А.М. Глобус, Б.В. Дерягин,

В.П. Панфилов, В.О. Орлов, А.И. Попов, Г.М. Фельдман, но в их исследованиях уделялось недостаточно внимания инженерному подходу к изучению давления пучения грунтов в зависимости от конкретных гидрогеологических условий местности [11].

Существенный вклад внес и В.М. Сиденко. В 1953 г. исследователь начал изучение водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна, рассматривая их при этом как комплексную конструкцию «одежда–полотно» [10]. Для анализа передвижения и накопления воды В.М. Сиденко обосновал принцип дифференцированного исследования, согласно которому водно-тепловой режим дорожных одежд и полотна классифицируется на 4 расчетных типа: диффузный, пленочный, капиллярный и инфильтрационный. В основу классификации положены следующие отличительные признаки [10]: источники увлажнения; степень водопроницаемости дорожного покрытия (наличие или отсутствие в покрытии трещин, а в одежде водопроницаемых слоев); распределение влажности по глубине дорожной конструкции в неблагоприятные по увлажнению периоды года; интервал сезонного колебания влажности, а следовательно, и деформируемости грунта.

В настоящее время существует ряд методов моделирования процессов, протекающих в дорожной конструкции лесовозных дорог под влиянием природно-климатических условий [1]. В основу большинства из них положена кристаллизационно-пленочная гипотеза миграции влаги, при этом базовой считается теория молекулярного массообмена в консолидируемой грунтовой массе [12].

Одним из основных достаточно точных методов расчета водно-теплого режима земляного полотна является теория Н.А. Пузакова. Согласно этому методу действие «сил всасывания» принимается как расчетный эквивалент суммарного действия сил миграции [12]. Три схемы расчета применяются в зависимости от источников увлажнения: сухие местности с обеспеченным стоком поверхностных вод, глубоким залеганием уровня грунтовых вод и малым количеством осадков; районы с достаточным количеством осадков и с затрудненным стоком поверхностных вод, накопление влаги происходит за счет перемещения пленочной и капиллярно-подвешенной воды; районы с близким расположением уровня грунтовых вод.

Данный метод позволяет определить глубину распространения отрицательной температуры в грунте. Ее расчет осуществляется по параболическому закону, и она может быть выражена формулой [7]

$$H_t = \sqrt{2\alpha_0 t_3},$$

где α_0 – коэффициент, зависящий от рассматриваемой температуры и климатических условий местности, см²/сут; t_3 – длительность промерзания, сут.

Недостатки метода Н.А. Пузакова, по мнению некоторых исследователей, следующие [4]: вызывает сомнение факт наличия критической глубины промерзания $z_{кр}$, поскольку в соответствии с принципом равновесного состояния Н.А. Цытовича процесс миграции и льдообразования протекает по всей толще промерзающего грунта; не учитываются термодинамика фазовых переходов воды, кондуктивный и конвективный характер теплообмена в слоистых дорожных конструкциях.

Скорость притока воды в зону промерзания описывается по формуле [7]

$$V = \frac{2K(W_k - W_0)}{H - z},$$

где K – коэффициент капиллярной влагопроводимости грунта, см²/сут; W_k – капиллярная влагоемкость грунта, доля от объема; W_0 – начальная влажность грунта, доля от объема.

Эта формула отражает процесс перемещения влаги лишь при глубине промерзания меньше глубины залегания грунтовых вод ($z < H$). Если $z = H$, скорость миграции влаги принимает бесконечно большую величину, поэтому формула применима лишь при $z < 0,75H$. Для случая $z = H$ М.Б. Корсунским была разработана эмпирическая формула [4]:

$$V = \frac{2K(W_k - W_0)}{0,125H_{\text{exp}} 2,80 \left(1 - \frac{z}{H}\right)}.$$

Если в методе расчета водно-теплового режима Н.А. Пузакова граница промерзания описывается уравнением параболы, то в методе расчета И.А. Золотаря, где скорость миграции влаги зависит от режима промерзания грунта, скорость промерзания характеризуется по линейной или параболической зависимости [8].

В случае, когда граница промерзания описывается линейно, согласно И.А. Золотарю, скорость миграции влаги к зоне промерзания будет находиться по формуле [2]

$$V_{\text{миг}} = \frac{\rho_{\text{ск}}}{\rho_{\text{в}}} (W_0 - W_x) F V_x,$$

где $\rho_{\text{ск}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность скелета грунта и воды соответственно, т/м³; W_x – влажность грунта на границе промерзания, доля от объема; F – площадь под кривой изотермы, см²; V_x – скорость промерзания грунта, см/сут.

Когда промерзание протекает по параболическому закону, формула примет вид [2]:

$$V_{\text{миг}} = \frac{\rho_{\text{ск}}}{\rho_{\text{в}}} \sqrt{\frac{\alpha_m}{\pi t}} (W_0 - W_x) F V_x \quad \text{при} \quad z = \frac{\alpha}{2\sqrt{\alpha_m}},$$

где α – скорость промерзания конструкции; α_m – коэффициент теплопроводности при пленочном характере переноса влаги.

Метод расчета И.А. Золотаря больше применим для прогнозирования водно-теплового режима в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, так как рассматривает миграцию влаги только в качестве одномерного процесса при монотонно промерзающем грунтовом полупространстве [12].

Методика расчета теплового режима дорожной конструкции следующая [10].

1. Подготовка исходных данных. Определяют толщину слоев дорожной одежды h , объемные веса γ , коэффициенты теплопроводности и теплоемкости, средние температуры воздуха $t_{\text{в}}$ за определенный период ΔT , скорости ветра V , температуры грунта $t_{\text{гр}}$.

2. Определение начальных условий. В начальный момент времени устанавливают непосредственным наблюдением или расчетом температуры в различных плоскостях дорожной конструкции $t_{1,T}, \dots, t_{m,T}$.

3. Расчет температур. Каждый слой дорожной конструкции разбивают на m частей. Нумерацию плоскостей ведут снизу вверх, совмещая нулевую плоскость с плоскостью грунта температуры $t_{гр}$. Определяют максимальные температуры ΔT_{max} каждой плоскости, наименьшее из полученных значений принимают в качестве расчетного для всей дорожной конструкции. Вычисляют коэффициенты теплоперехода α :

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_H$$

где α_K – конвекция; α_H – излучение.

Находят температуры дорожной конструкции в различное время:

$$T + n\Delta T.$$

Место проведения полевых испытаний по измерению температуры в дорожной конструкции – площадка в г. Перми, по адресу: улица Академика Королева, дом 19 а. Площадка исследований представляет собой практически ровный асфальтированный участок, на котором устроена скважина глубиной 3 м (рис. 1).

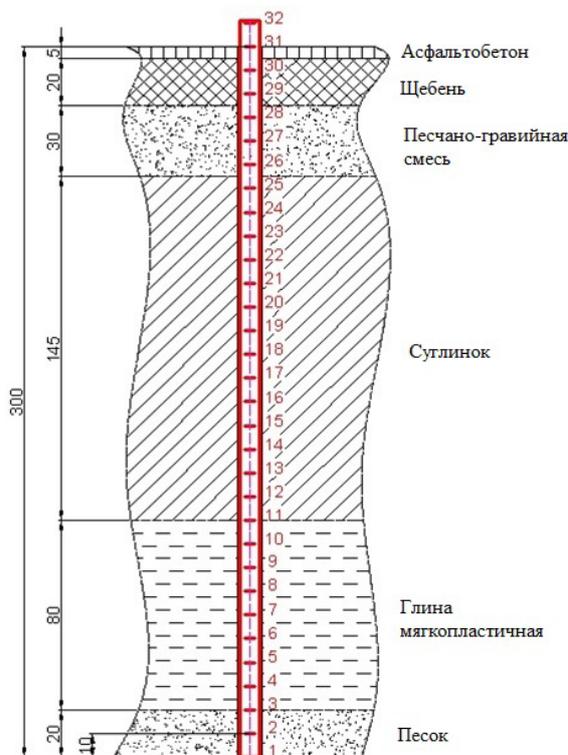


Рис. 1. Расположение датчиков для измерения температуры в дорожной конструкции

Fig. 1. Layout of sensors for measuring temperature in the road structure

На всю глубину скважины заглублена трубка со встроенными внутри 32 датчиками температуры, расположенными с шагом 10 см. Датчик 1 соответствует наибольшей глубине скважины (3 м), а 32-й находится выше уровня асфальтобетонного покрытия и фиксирует температуру приземного слоя воздуха. Датчики способны выполнять измерения в диапазоне $-55...+125$ °С.

Датчики передают сведения через провод и специальный блок, подключаемый посредством USB-порта, на персональный компьютер. В качестве программного обеспечения выступает программа VM1707.exe. Датчики температуры и программное обеспечение для измерения температуры в дорожной конструкции разработаны ООО «Олимп» (Москва).

Результаты исследования и их обсуждение

Измерения температуры в дорожной конструкции проводились с ноября 2019 г. по апрель 2020 г. При этом с ноября по 28 февраля на покрытии исследуемой дорожной конструкции присутствовал снежный накат с максимальной толщиной к концу зимнего периода 11 см (рис. 2).

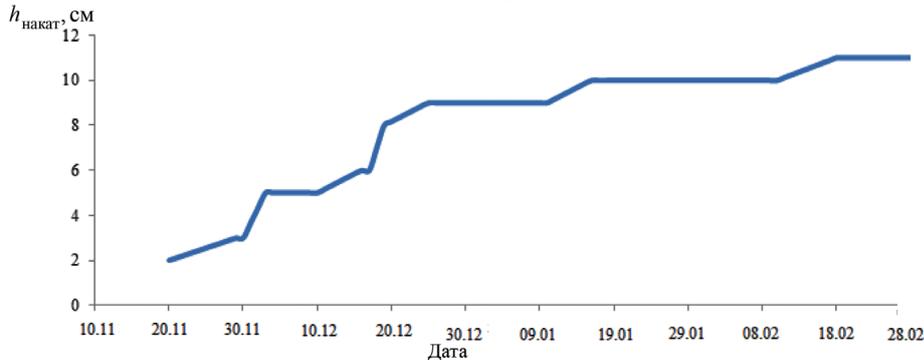


Рис. 2. Изменение толщины снежного наката за период наблюдений

Fig. 2. Changes in the thickness of the packed snow over the observation period

По данным таблиц средних температур в дорожной конструкции при наличии и отсутствии снежного наката построен график (рис. 3).

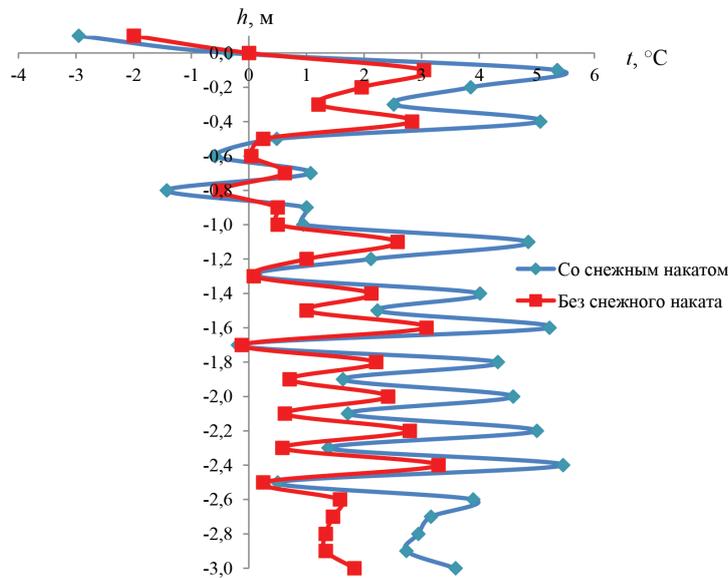


Рис. 3. Температура в дорожной конструкции при наличии и отсутствии снежного наката на покрытии

Fig. 3. Temperature in the road structure in the presence and absence of the packed snow on the surface

По результатам измерений построены графики, показывающие среднюю температуру в дорожной конструкции в зависимости от времени года (рис. 4). График на рис. 4, а учитывает измерения температуры в дорожной конструкции только за ноябрь 2019 г., а график на рис. 4, в – только за март и апрель 2020 г.

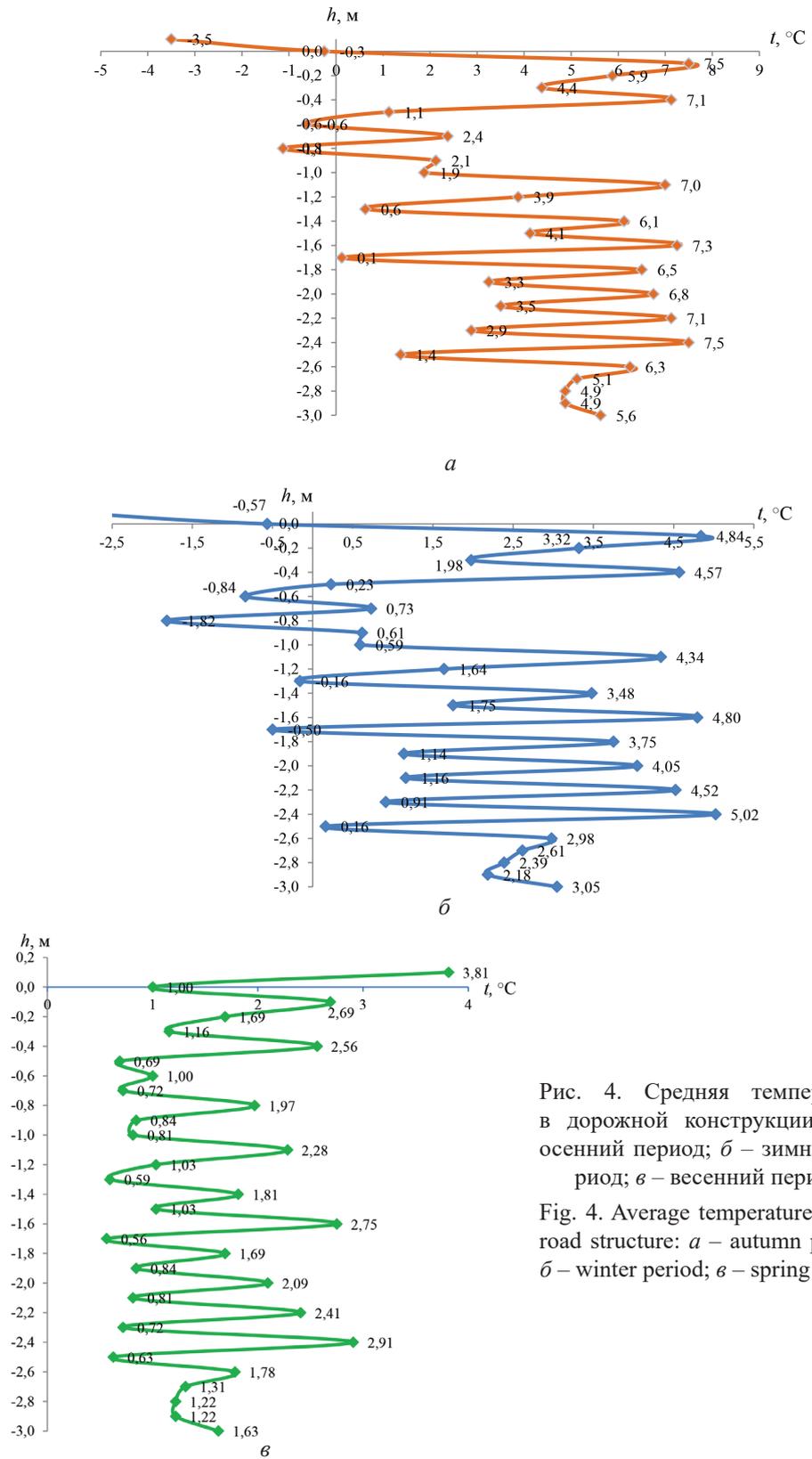


Рис. 4. Средняя температура в дорожной конструкции: *a* – осенний период; *b* – зимний период; *v* – весенний период

Fig. 4. Average temperature in the road structure: *a* – autumn period; *b* – winter period; *v* – spring period

Данные наблюдений позволяют предположить, что в весенний период происходят медленное остывание земляного полотна на глубине 3 м и прогревание верхней части дорожной конструкции, что не противоречит результатам известных исследований. При этом изменения температуры в слоях дорожной конструкции носят нелинейный характер по причине разных теплофизических свойств материалов дорожной одежды и земляного полотна.

Получен сводный график разницы средних температур в дорожной конструкции в разное время года (рис. 5).

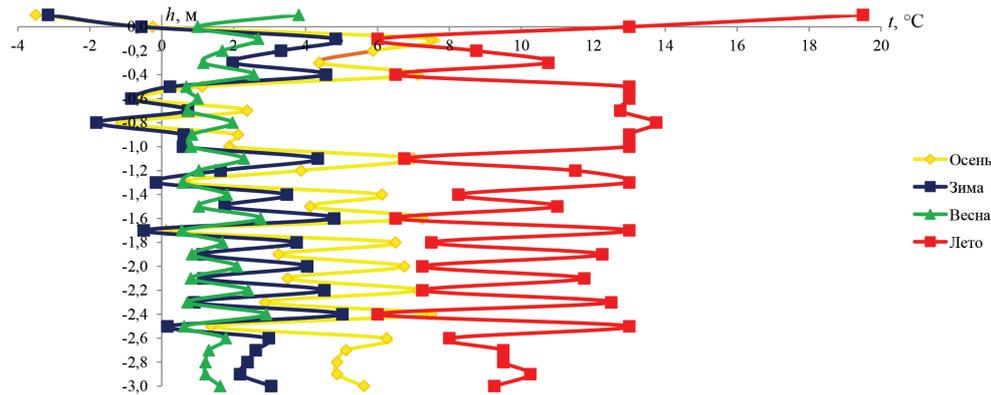


Рис. 5. Средняя температура в дорожной конструкции в разное время года

Fig. 5. Average temperatures in the road structure at different times of the year

Для выявления особенностей влияния солнечной радиации на температуру покрытия построен график температуры в дорожной конструкции при наличии и отсутствии солнечной радиации (рис. 6).

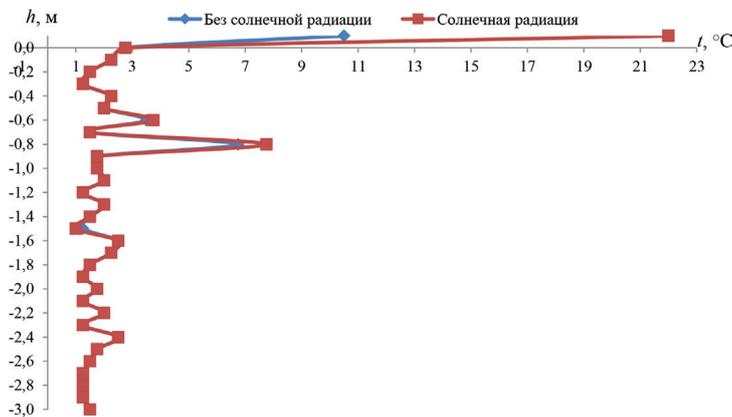


Рис. 6. Температура в дорожной конструкции при наличии и отсутствии солнечной радиации

Fig. 6. Temperature in the road structure in the presence and absence of solar radiation

В качестве примера взяты данные двух измерений за 19 апреля 2020 г. Первое проводилось в 10:00 при температуре наружного воздуха +11 °C в пасмурную погоду, при этом верхний датчик температуры был закрыт от воздей-

ствия прямых солнечных лучей. Второе – в 14:00 при температуре наружного воздуха +12 °С в ясную солнечную погоду, верхний датчик не был защищен от воздействия прямых солнечных лучей.

Теплофизические свойства определяют особенности процесса теплообмена, являются базовыми при установлении и прогнозировании глубины и скорости промерзания и оттаивания дорожных конструкций; имеют большое значение в проектировании, строительстве и эксплуатации различных объектов, когда в грунте происходит передача тепла. Основные такие свойства – теплопроводность и теплоемкость. Значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости для слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна представлены в таблице.

Коэффициенты теплопроводности и теплоемкости для исследуемой дорожной конструкции

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, кДж/(кг·К)
Асфальтобетон	1,25	0,92
Щебень	1,39	0,85
Песчано-гравийная смесь	2,10	1,00
Суглинок	1,62	1,15
Глина	1,62	0,88
Песок	1,91	0,835
Снег (при $\rho = 450 \text{ кг/м}^3$)	0,35	–

Заключение

На основании проведенных полевых исследований была получена зависимость изменения температуры дорожной конструкции по слоям. Выявлено, что изменение температуры в слоях дорожной конструкции носит нелинейный характер, это связано с различной теплоемкостью и теплопроводностью материалов дорожной конструкции. Установлены зависимости влияния снежного наката на температуру в дорожной конструкции и солнечной радиации на температуру покрытия лесовозных дорог.

Изучение особенностей водно-теплового режима дорожных конструкций представляет собой важную, но в то же время трудоемкую задачу, решение которой возможно лишь при условии совместной работы ученых, инженеров-проектировщиков и строителей.

Мониторинг теплового режима в дорожных конструкциях на каждой конкретной территории позволяет прогнозировать изменения температуры в дорожной конструкции и своевременно принимать меры по ограничению движения тяжелых транспортных лесовозных средств, что впоследствии может иметь немалый экономический эффект за счет предотвращения разрушения дорожно-покрытия.

Учет теплопроводности и теплоемкости дорожно-строительных материалов дает возможность регулирования теплового режима в слоях дорожных одежд, снижения негативного влияния природно-климатических условий на устойчивость дорожных конструкций и срок службы автомобильной лесовозной дороги в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ефименко С.В. Обоснование расчетных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд автомобильных дорог (на примере районов Западной Сибири): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2006. 22 с. Efimenko S.V. *Justification of the Calculated Values of the Characteristics of Clay Soils for the Design of Road Surfaces of Highways (Case Study of the Regions of Western Siberia)*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Omsk, 2006. 22 p.
2. Золотарь И.А. Теоретические основы применения тонкодисперсных грунтов для возведения земляного полотна автомобильных дорог в северных районах области многолетнемерзлых грунтов: моногр. М.: Транспорт, 1988. 134 с. Zolotar' I.A. *Theoretical Background of the Use of Fine Dispersed Soils for the Construction of the Roadbed in the Northern Areas of the Region of Permafrost Soils*: Monograph. Moscow, Transport Publ., 1988. 134 p.
3. Иванов Д.В., Зарипин Ю.А. Методы регулирования водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития. Тамбов: ТГТУ. 2011. Вып. II. С. 255–259. Ivanov D.V., Zarin Yu.A. Methods for Regulating the Water and Heat Regime of the Roadbed. *Problems of Technogenic Safety and Sustainable Development*. Tambov, TSTU Publ., 2011, iss. II, pp. 255–259.
4. Корсунский М.Б., Россовский П.Д., Волчанский Г.В. Регулирование водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог в районах сезонного промерзания // Тр. СоюзДорНИИ. 1966. Вып. 13. С. 14–28. Korsunskiy M.B., Rossovskiy P.D., Volchanskiy G.V. Regulation of the Water and Heat Regime of the Roadbed in Areas of Seasonal Freezing. *Trudy SoyuzDorNII*, 1966, iss. 13, pp. 14–28.
5. Кулижников А.М. Комплексное проектирование автомобильных дорог на основе пространственного моделирования (на примере Европейского Севера России): автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1998. 37 с. Kulizhnikov A.M. *Complex Design of Roads on the Basis of Spatial Modeling (Case Study of the European North of Russia)*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1998. 37 p.
6. Леонович И.И., Вырко Н.П. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2013. 332 с. Leonovich I.I., Vyrko N.P. *Water and Heat Regime of the Roadbed of Highways*. Minsk, BNTU Publ., 2013. 332 p.
7. Пузаков Н.А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. М.: Автотрансиздат, 1960. 168 с. Puzakov N.A. *Water and Heat Regime of the Roadbed of Highways*. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1960. 168 p.
8. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 106–119. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Features of Contact Interaction between the Skidding System and Frozen Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.106>
9. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 101–117. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. The Study of the Destruction Process of Frozen and Thawing Soils Exposed to the Skidding System. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 2, pp. 101–117. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-101-117>

10. Сиденко В.М. Расчет и регулирование водно-теплового режима дорожных одежд и земляного полотна. М.: Автотрансиздат, 1962. 116 с. Sidenko V.M. *Calculation and Regulation of the Water and Heat Regime of Road Surfaces and Roadbed*. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1962. 116 p.
11. Толстеньев С.В. Развитие методов прогнозирования и регулирования водно-теплового режима земляного полотна эксплуатируемых автомобильных дорог (на примере Алтайского края): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2002. 18 с. Tolstenev S.V. *Development of Methods for Forecasting and Regulating the Water and Heat Regime of the Roadbed of Operated Highways (Case Study of Altai Krai)*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Omsk, 2002. 18 p.
12. Ярмолинский В.А., Лопашук В.В., Лопашук А.В. Регулирование водно-теплового режима автомобильных дорог Камчатского края для повышения их надежности в процессе эксплуатации. Хабаровск: ТОГУ, 2014. 182 с. Yarmolinsky V.A., Lopashuk V.V., Lopashuk A.V. *Regulation of the Water and Heat Regime of Highways of Kamchatka Krai to Increase Their Reliability during Operation*. Khabarovsk, PSU Publ., 2014. 182 p.
13. De Jong G., Kouwenhoven M., Bates J., Koster P., Verhoef E., Tavasszy L., Warffemius P. New SP-Values of Time and Reliability for Freight Transport in the Netherlands. *Transport Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, vol. 64, pp. 71–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.01.008>
14. Gates J.B., Scanlon B.R., Mu X., Zhang L. Impacts of Soil Conservation on Groundwater Recharge in the Semi-Arid Loess Plateau, China. *Hydrogeology Journal*, 2011, vol. 19, iss. 4, art. 865. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0716-3>
15. Huo S., Jin M., Liang X., Lin D. Changes of Vertical Groundwater Recharge with Increase in Thickness of Vadose Zone Simulated by One-Dimensional Variably Saturated Flow Model. *Journal of Earth Science*, 2014, vol. 25, iss. 6, pp. 1043–1050. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0486-7>
16. Ibrahim M., Favreau G., Scanlon B.R., Seidel J.L., le Coz M., Demarty J., Cappelaere B. Long-Term Increase in Diffuse Groundwater Recharge Following Expansion of Rainfed Cultivation in the Sahel, West Africa. *Hydrogeology Journal*, 2014, vol. 22, iss. 6, pp. 1293–1305. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1143-z>
17. Kouwenhoven M., de Jong G.C., Koster P., van den Berg V.A.C., Verhoef E.T., Bates J., Warffemius P.M.J. New Values of Time and Reliability in Passenger Transport in the Netherlands. *Research in Transportation Economics*, 2014, vol. 47, pp. 37–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.017>
18. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing Quality of Road Pavements through Adhesion Improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 678–694.
19. Kurtzman D., Scanlon B.R. Groundwater Recharge through Vertisols: Irrigated Cropland vs. Natural Land, Israel. *Vadose Zone Journal*, 2011, vol. 10, iss. 2, pp. 662–674. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0109>
20. Peer S., Koopmans C.C., Verhoef E.T. Prediction of Travel Time Variability for Cost-Benefit Analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012, vol. 46, iss. 1, pp. 79–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.09.016>