

УДК 621.131.436:625.731.1

И. А. Баширова, М. В. Зголич, В. Н. Ефименко, С. В. Ефименко

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЫЛЕВАТЫХ ПЕСКОВ

Рассмотрено определение величины коэффициента теплопроводности промерзающего грунта в условиях изменяющихся влажности, плотности и температуры. Установлена зависимость изменения величины коэффициента теплопроводности грунта в диапазоне температур $-5...0$ °С.

Ключевые слова: автомобильная дорога, грунт земляного полотна, коэффициент теплопроводности, влагонакопление.

Введение

Одним из пунктов указа президента РФ от 26.10.2020 г. № 645 «О стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года»¹ является развитие транспортной инфраструктуры Арктической зоны, для чего необходимо обеспечить качественное проектирование и строительство автомобильных дорог. Однако действующие нормы проектирования, например, СП 34.13330.2021², не в полной мере учитывают особенности природно-климатических условий отдельных регионов страны, включая Арктическую зону, что провоцирует снижение эксплуатационной надежности транспортных сооружений и вызывает значительные затраты на проведение дополнительных ремонтных работ. Для обеспечения надежности проектирования и строительства автомобильных дорог на территории Арктической зоны, в частности Ямало-Ненецкого автономного округа, следует учитывать особенности природно-климатических условий региона.

Основная часть

В рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0003 специалисты кафедры «Автомобильные дороги» ТГАСУ осуществляют исследования, направленные на уточнение дорожно-климатического районирования территории Ямало-Ненецкого автономного округа [1—3]. Одним из этапов проводимых работ по уточнению дорожно-климатического районирования с применением таксономической системы «зона — подзона — дорожный район» является уточнение значений расчетных характеристик прочности и деформируемости грунтов земляного полотна автомобильных дорог территории исследования [4]. Одна из задач исследования — прогноз влагонакопления в рабочем слое земляного полотна. Метод исследования влагонакопления в грунтах земляного полотна автомобильных дорог региона предполагает теплофизические расчеты. При

¹ О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года : указ Президента РФ от 26.10.2022 г. № 645. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065.

² СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги. М. : Минстрой России, 2021. 94 с.

этом теплофизические характеристики, применяемые в расчетах [5], заимствуют из справочной литературы. Но в справочниках³ [6] значения, например, коэффициента теплопроводности (λ), приведены в диапазоне температур $-20^{\circ}\dots+20^{\circ}\text{C}$, что не соответствует фактическому диапазону температур максимального влагонакопления в грунтах. Следует отметить, что значения коэффициента теплопроводности, представленные в справочной литературе, установлены при постоянных значениях влажности, плотности и температуры грунта, хотя эти показатели подвержены изменениям в годовом цикле водно-теплового режима дорожных конструкций. Известно [7, 8], что наиболее интенсивное влагонакопление в промерзающих грунтах происходит при температуре $-3,5\dots 0^{\circ}\text{C}$ в зависимости от степени засоленности, поэтому нами выполнено экспериментальное исследование по определению коэффициента теплопроводности характерных грунтов земляного полотна для территории ЯНАО.

При исследовании теплофизических свойств грунтов применен метод планирования эксперимента. Этот метод позволяет получить результаты требуемой достоверности и надежности при минимальных затратах ресурсов, а также представить полученную информацию в удобной форме [9, 10]. В качестве основных действующих факторов при планировании эксперимента выбраны: x_1 — количество пылеватых частиц; x_2 — весовая влажность грунта; x_3 — плотность сухого грунта; x_4 — температура грунта. Принятые факторы с соответствующими уровнями их изменения приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Условия планирования эксперимента

Факторы	Код	Единица измерения	Уровни и плечи звездных точек		
			-1	0	+1
Количество пылеватых частиц	x_1	%	29,63	46,63	73,98
Весовая влажность грунта	x_2	д. е.	0,018	0,050	0,090
Плотность сухого грунта	x_3	г/см ³	1,733	1,828	1,898
Температура грунта	x_4	°C	0	-2,5	-5

В качестве исследуемого параметра (показателя цели) принят коэффициент теплопроводности грунта λ . Центр и уровни плана определены на основании предварительных экспериментов.

Для проведения эксперимента отобрано 3 вида образцов пылеватого песка с разным гранулометрическим составом (в частности, количеством пылеватых частиц) — Новый Уренгой (29,63), Ноябрьск (46,63) и Горноknязевск (73,98). В полевых условиях на дорогах Ямало-Ненецкого автономного округа в 2021 г. специалистами кафедры «Автомобильные дороги» ТГАСУ оборудованы посты наблюдения [11], на которых установлены датчики фиксации температуры и влажности грунта в пределах деятельного слоя земляного

³ ОДМ 218.2.061—2015. Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов. М. : Росавтодор, 2015. 73 с.

полотна. Анализируя показания датчиков для выбранных постов наблюдений, определены максимальные и минимальные значения объемной влажности грунтов, после чего по формуле:

$$W_{\text{вес}} = W_{\text{об}} / \rho_{\text{сух.гр.}} \quad (1)$$

где $\rho_{\text{сух.гр.}}$ — плотность сухого грунта, г/см³, осуществлен переход от объемной влажности к весовой (табл. 2). Значения плотности сухого грунта являются результатами испытаний по определению физико-механических свойств отобранных проб грунтов [1, 12].

Т а б л и ц а 2

Результаты определения максимальных и минимальных значений влажности грунта (в д. е.)

Пост наблюдения	Горнокаязевск, № 1	Новый Уренгой, № 5	Ноябрьск, № 11
$\rho_{\text{сух.гр.}}, \text{ г/см}^3$	1,4231	1,6823	1,5419
$W_{\text{об, max}}$	0,122	0,151	0,103
$W_{\text{вес, max}}$	0,086	0,090	0,067
$W_{\text{об, min}}$	0,031	0,031	0,031
$W_{\text{вес, min}}$	0,022	0,018	0,020

Для значения «+1» выбрано максимальное из максимальных значений; для значения «-1» — минимальное значение из минимальных; для значения «0» — среднее значение из средних.

Согласно ГОСТ 22733—2016⁴ определены максимальная плотность и оптимальная влажность грунтов земляного полотна. Результаты проведенных испытаний позволяют обосновать выбор фактора «плотность сухого грунта». Для значения «+1» выбраны минимальное из максимальных значений; для значения «-1» — минимальное значение из минимальных; для значения «0» — среднее значение из средних.

Ранее произведены пробные испытания по оценке влияния температурного режима в образцах грунта на изменение коэффициента теплопроводности при постоянных значениях его влажности и плотности. Влажность принимали оптимальную, плотность — максимальную. Для пробных испытаний выбран наиболее распространенный при возведении земляного полотна автомобильных дорог в Ямало-Ненецком автономном округе вид грунта. Согласно исследованиям [2] таким грунтом является пылеватый песок, доля которого составляет 72,7 % от общего количества отобранных проб. В результате проведенных испытаний для дальнейших исследований назначены следующие значения температуры: -5 °С (значение «-»), -2,5 °С (значение «0») и 0 °С (значение «+») [13]. В этом диапазоне температур грунта возможна интенсивная миграция влаги [7, 8].

⁴ ГОСТ 22733—2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М. : Стандартинформ, 2016. 16 с.

Для изучения зависимости коэффициента теплопроводности от перечисленных факторов составлена матрица планирования эксперимента. Число опытов N , необходимое для реализации всех возможных сочетаний факторов, находят по формуле [14]:

$$N = n^k, \quad (2)$$

где k — число факторов, $k = 4$; n — число уровней, $n = 3$; $N = 3^4 = 81$ опыт.

Испытания проводили с помощью прибора измерения TEMPOS (рис. 1) и подключаемого к нему с помощью кабеля DB15 зонда SH-3 по алгоритму, детально описанному в работе [13]:

- доведение грунта до влажности, приведенной в матрице планирования эксперимента;
- уплотнение образца грунта методом стандартного уплотнения;
- установка зонда SH-3 и датчика температуры так, чтобы щупы были полностью погружены в образец грунта;
- промораживание образца грунта в морозильной камере при постоянной отрицательной температуре;
- измерение коэффициента теплопроводности с помощью прибора TEMPOS.



а

б

Рис. 1. Вид контроллера в ходе измерения теплофизических характеристик:
а — нагрев щупов; *б* — остывание щупов

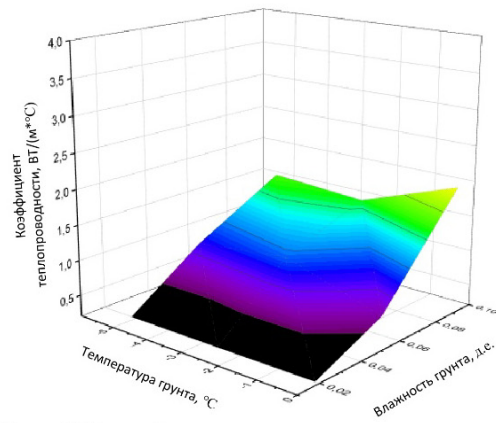
Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 3. По полученным результатам построены графики зависимости коэффициента теплопроводности от температуры грунта при постоянных значениях плотности сухого грунта (рис. 2—4).

Таблица 3

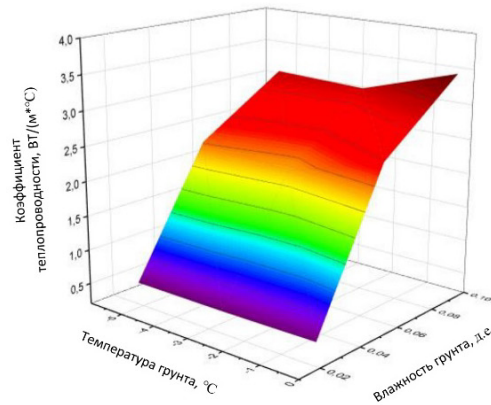
Матрица планирования эксперимента

№	x_1	x_2	x_3	x_4	λ	№	x_1	x_2	x_3	x_4	λ	№	x_1	x_2	x_3	x_4	λ
Новый Уренгой						Ноябрьск						Горноknязевск					
1	29,63	0,018	1,733	-5	0,571	28	46,63	0,018	1,733	-5	0,7473	55	73,98	0,018	1,733	-5	0,2472
2	29,63	0,018	1,733	-2,5	0,567	29	46,63	0,018	1,733	-2,5	0,7401	56	73,98	0,018	1,733	-2,5	0,2469
3	29,63	0,018	1,733	0	0,5815	30	46,63	0,018	1,733	0	0,7489	57	73,98	0,018	1,733	0	0,2511
4	29,63	0,018	1,828	-5	2,348	31	46,63	0,018	1,828	-5	1,915	58	73,98	0,018	1,828	-5	0,9521
5	29,63	0,018	1,828	-2,5	2,203	32	46,63	0,018	1,828	-2,5	1,912	59	73,98	0,018	1,828	-2,5	1,106
6	29,63	0,018	1,828	0	2,611	33	46,63	0,018	1,828	0	2,357	60	73,98	0,018	1,828	0	0,675
7	29,63	0,018	1,898	-5	3,135	34	46,63	0,018	1,898	-5	3,203	61	73,98	0,018	1,898	-5	1,603
8	29,63	0,018	1,898	-2,5	3,085	35	46,63	0,018	1,898	-2,5	3,206	62	73,98	0,018	1,898	-2,5	1,516
9	29,63	0,018	1,898	0	3,504	36	46,63	0,018	1,898	0	3,602	63	73,98	0,018	1,898	0	2,006
10	29,63	0,050	1,733	-5	0,6474	37	46,63	0,050	1,733	-5	0,8058	64	73,98	0,050	1,733	-5	0,2903
11	29,63	0,050	1,733	-2,5	0,6355	38	46,63	0,050	1,733	-2,5	0,7846	65	73,98	0,050	1,733	-2,5	0,2914
12	29,63	0,050	1,733	0	0,6497	39	46,63	0,050	1,733	0	0,8042	66	73,98	0,050	1,733	0	0,293
13	29,63	0,050	1,828	-5	2,625	40	46,63	0,050	1,828	-5	2,04	67	73,98	0,050	1,828	-5	1,216
14	29,63	0,050	1,828	-2,5	2,432	41	46,63	0,050	1,828	-2,5	1,998	68	73,98	0,050	1,828	-2,5	1,347
15	29,63	0,050	1,828	0	3,086	42	46,63	0,050	1,828	0	2,506	69	73,98	0,050	1,828	0	1,016
16	29,63	0,050	1,898	-5	3,3	43	46,63	0,050	1,898	-5	3,11	70	73,98	0,050	1,898	-5	2,165
17	29,63	0,050	1,898	-2,5	3,152	44	46,63	0,050	1,898	-2,5	3,234	71	73,98	0,050	1,898	-2,5	2,146
18	29,63	0,050	1,898	0	3,7	45	46,63	0,050	1,898	0	3,592	72	73,98	0,050	1,898	0	2,549
19	29,63	0,090	1,733	-5	0,624	46	46,63	0,090	1,733	-5	0,8253	73	73,98	0,090	1,733	-5	0,2665
20	29,63	0,090	1,733	-2,5	0,663	47	46,63	0,090	1,733	-2,5	0,826	74	73,98	0,090	1,733	-2,5	0,2644
21	29,63	0,090	1,733	0	0,626	48	46,63	0,090	1,733	0	0,8056	75	73,98	0,090	1,733	0	0,2704
22	29,63	0,090	1,828	-5	2,528	49	46,63	0,090	1,828	-5	2,579	76	73,98	0,090	1,828	-5	1,194
23	29,63	0,090	1,828	-2,5	2,436	50	46,63	0,090	1,828	-2,5	2,88	77	73,98	0,090	1,828	-2,5	1,295
24	29,63	0,090	1,828	0	2,814	51	46,63	0,090	1,828	0	2,614	78	73,98	0,090	1,828	0	0,918
25	29,63	0,090	1,898	-5	3,2	52	46,63	0,090	1,898	-5	2,91	79	73,98	0,090	1,898	-5	2,248
26	29,63	0,090	1,898	-2,5	3,036	53	46,63	0,090	1,898	-2,5	3,16	80	73,98	0,090	1,898	-2,5	2,155
27	29,63	0,090	1,898	0	3,416	54	46,63	0,090	1,898	0	2,817	81	73,98	0,090	1,898	0	2,549

а) Горноknязевск



б) Новый Уренгой



в) Ноябрьск

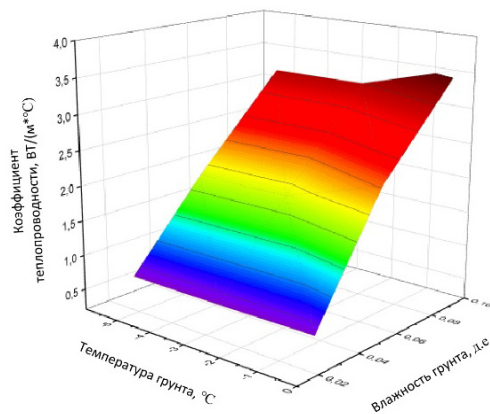
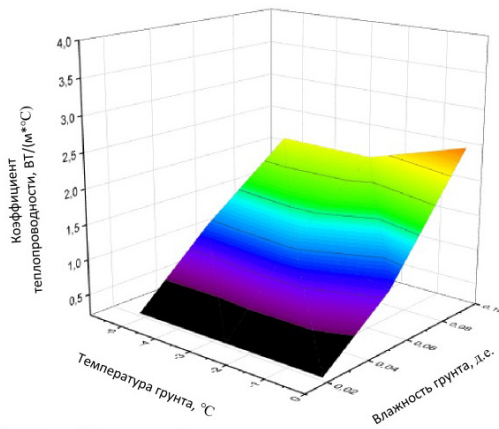
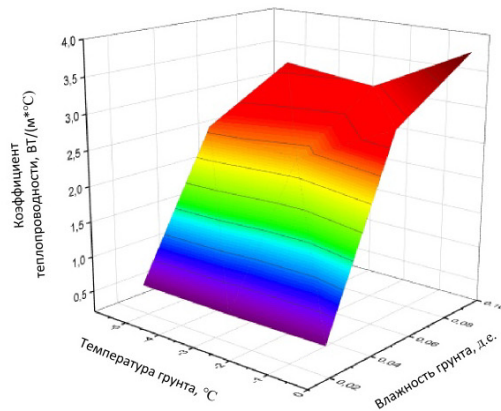


Рис. 2. Зависимость значений коэффициента теплопроводности от температуры грунта при значении плотности сухого грунта $\rho = 1,733 \text{ г/см}^3$ для образцов грунта: *а* — Горноknязевск; *б* — Новый Уренгой; *в* — Ноябрьск

а) Горноknязевск



б) Новый Уренгой



в) Ноябрьск

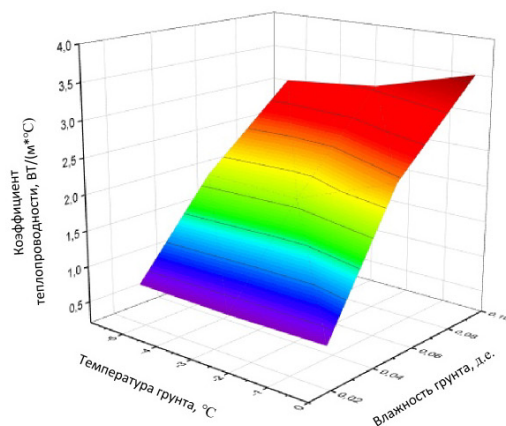
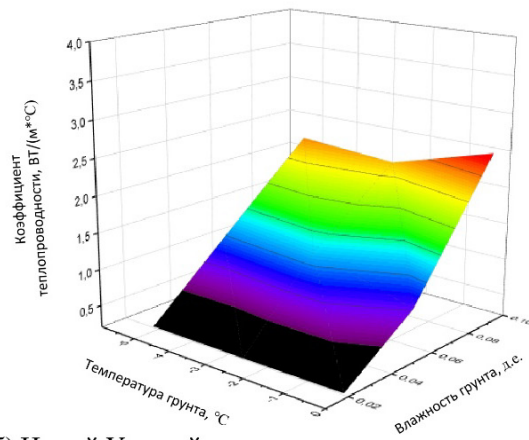
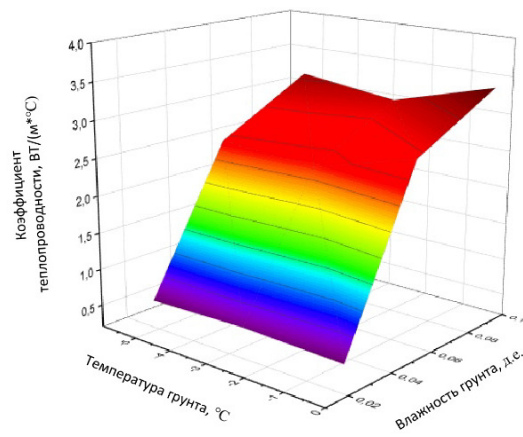


Рис. 3. Зависимость значений коэффициента теплопроводности от температуры грунта при значениях плотности сухого грунта $\rho = 1,828 \text{ г/см}^3$ для образцов грунта:
а — Горноknязевск; б — Новый Уренгой; в — Ноябрьск

а) Горноknязевск



б) Новый Уренгой



в) Ноябрьск

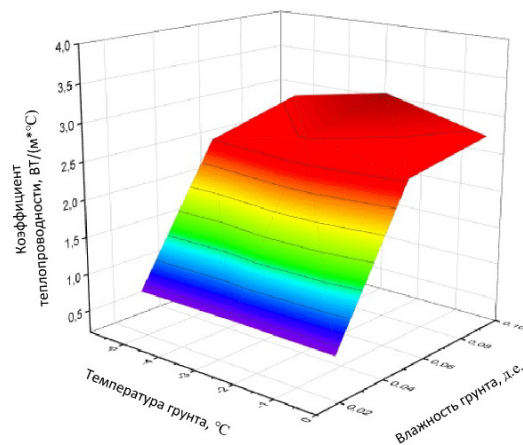


Рис. 4. Зависимость значений коэффициента теплопроводности от температуры грунта при значении плотности сухого грунта $\rho = 1,898 \text{ г/см}^3$ для образцов грунта: *а* — Горноknязевск; *б* — Новый Уренгой; *в* — Ноябрьск

Заключение

По справочным данным⁵ коэффициент теплопроводности мерзлого пылеватого песка составляет $\lambda = 2,20$ Вт/(м·К), однако результаты эксперимента свидетельствуют о том, что близкий по значению коэффициент теплопроводности будет в тех случаях, если количество пылеватых частиц в грунте составляет $\approx 30\%$, влажность грунта — 5% , а плотность сухого грунта $\approx 1,7$ г/см³, или если количество пылеватых частиц в грунте будет $\approx 75\%$, влажность грунта — 9% , а плотность сухого грунта $\approx 1,8 \dots 1,9$ г/см³.

Из графиков видно, что при минимальной влажности грунта зависимость коэффициента теплопроводности от температуры грунта можно описать линейным уравнением, что подтверждается уравнением регрессии типа

$$\lambda = k\rho_{\text{сух.гр.}} \quad (3)$$

где k — коэффициент, зависящий от типа грунта. При увеличении влажности грунта уравнение регрессии переходит из линейного типа в квадратное, в котором свободный член зависит от влажности образца грунта. Полученные при анализе результатов уравнения регрессии применены при прогнозировании влажности деятельного слоя грунта земляного полотна автомобильных дорог региона исследования.

Анализ результатов проведенного эксперимента свидетельствует о необходимости учета влажности, плотности и температуры грунта при определении значения коэффициента теплопроводности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефименко В. Н., Ефименко С. В., Баширова И. А. Особенности формирования информационного банка данных для уточнения границ дорожно-климатических подзон на территории ЯНАО // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 6. С. 150—159.
2. Сиволоп В. Е. Полевые и лабораторные исследования грунтов земляного полотна автомобильных дорог ЯНАО // Перспективы развития фундаментальных наук: сб-к научных трудов XIX международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2022. Т. 6. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. С. 66—68.
3. Ефименко С. В., Елисеенко М. М. К уточнению схемы дорожно-климатического районирования территории Ямало-Ненецкого автономного округа // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1(86). С. 94—103.
4. Ефименко С. В., Бадина М. В. Дорожное районирование территории Западной Сибири: монография. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2014. 244 с.
5. Золотарь И. А., Пузаков Н. А., Сиденко В. М. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. М. : Транспорт, 1971. 416 с.
6. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов / А. Я. Литвинов, А. М. Пчелинцев, З. А. Нерсесова, Я. А. Кроник, П. А. Гришин, Д. И. Федорович, Р. М. Саркисян. М. : Издательство литературы по строительству, 1973. 191 с.
7. Пузаков Н. А. Влияние промерзания на устойчивость дорожных оснований: сб-к статей // ДорНИИ Гушосдора МВД СССР. М. : Изд-во и тип. Дориздата, 1948. 128 с.
8. Zhang J., Mao X. Analysis of liquid-vapor mixed migration mechanism in unsaturated soil based on the effect of temperature on soil microstructure // Sci Rep. 2023. No. 13. 20542.

⁵ ОДМ 218.2.061—2015. Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов. М. : Росавтодор, 2015. 73 с.

9. *Johnson N. L., Leone F. C.* Statistics and experimental design : in engineering and the physical sciences. New York : Wiley, 1964. 516 p.

10. *Bury K. V.* Statistical models in applied science. New York : Wiley, 1975. 650 p.

11. *Сиволап В. Е., Ефименко С. В.* Полевые обследования дорожных конструкций для целей уточнения дорожно-климатического районирования территории ЯНАО // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России: мат-лы XVI международной науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2022. Волгоград : Изд-во ВолГТУ, 2022. С. 119—125.

12. Показатели элементов геокомплекса Ямало-Ненецкого автономного округа: свидетельство о государственной регистрации базы данных 2022621557 / С. В. Ефименко, В. Н. Ефименко, И. А. Зголич, В. Е. Сиволап, Ю. М. Чарыков, А. Э. Трофимов, В. С. Чурилин, А. В. Сухоруков // ФГБОУ ВО Томский государственный архитектурно-строительный университет. № 2022621557; заявл. 05.05.2022; опубл. 01.07.2022. 1 с.

13. *Сиволап В. Е., Баширова И. А., Ефименко В. Н.* Изучение теплофизических свойств грунтов земляного полотна автомобильных дорог Ямало-Ненецкого автономного округа // Избранные доклады 69-й университетской науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2023. 885 с.

14. *Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н.* Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие. Самара : Изд-во СГТУ, 2016. 131 с.

© *Баширова И. А., Зголич М. В., Ефименко В. Н., Ефименко С. В., 2024*

*Поступила в редакцию
в сентябре 2024 г.*

Ссылка для цитирования:

Баширова И. А., Зголич М. В., Ефименко В. Н., Ефименко С. В. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности пылеватых песков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 4(97). С. 135—145. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_135.

Об авторах:

Баширова Ирина Андреевна — аспирант каф. автомобильных дорог, Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). Российская Федерация, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; izgolich@mail.ru

Зголич Марина Викторовна — канд. физ.-мат. наук, доц. каф. высшей математики, Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). Российская Федерация, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; mzgolich@mail.ru

Ефименко Владимир Николаевич — д-р техн. наук, проф., проф. каф. автомобильных дорог, Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). Российская Федерация, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; svefimenko_80@mail.ru

Ефименко Сергей Владимирович — д-р техн. наук, доц., проректор по научной работе, зав. каф. автомобильных дорог, Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). Российская Федерация, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; svefimenko_80@mail.ru

Irina A. Bashirova, Marina V. Zgolich, Vladimir N. Efimenko, Sergey V. Efimenko

Tomsk State University of Architecture and Building

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HEAT CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF DUSTY SANDS

Determination of the value of the coefficient of thermal conductivity of freezing ground under conditions of changing humidity, density and temperature is considered. The dependence of changes in the value of the soil thermal conductivity coefficient in the temperature range $-5...0$ °C has been established.

Key words: automobile road, subgrade soil, heat conductivity coefficient, moisture accumulation.

For citation:

Bashirova I. A., Zgolich M. V., Efimenko V. N., Efimenko S. V. [Experimental determination of the heat conductivity coefficient of dusty sands]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 4, pp. 135—145. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_135.

About authors:

Irina A. Bashirova — Postgraduate student, Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB). 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russian Federation; izgolich@mail.ru

Marina V. Zgolich — Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB). 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russian Federation; mzglolich@mail.ru

Vladimir N. Efimenko — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB). 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russian Federation; svefimenko_80@mail.ru

Sergey V. Efimenko — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB). 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russian Federation; svefimenko_80@mail.ru