

ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

МРНТИ 73.31.11

УДК 625.731:624.139

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ГЛУБИНУ ПРОМЕРЗАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Сайлаубекова Н.С., кандидат технических наук, ассоциированный профессор

E-mail: nauka_kou@mail.ru

Сайлаубек М., магистр технических наук, старший преподаватель

Кызылординский открытый университет, г. Кызылорда, Республика Казахстан

Аннотация. В статье исследовано влияние теплофизических свойств асфальтобетонного покрытия на глубину промерзания земляного полотна автомобильных дорог. Рассмотрены особенности водно-теплого режима дорожной конструкции и факторы, определяющие процессы промерзания и морозного пучения грунтов. На основе теоретических расчетов выполнена оценка влияния коэффициента теплопроводности различных типов асфальтобетона на глубину промерзания земляного полотна. Установлено, что снижение теплопроводности верхнего слоя дорожной одежды приводит к уменьшению глубины промерзания грунта, что способствует снижению интенсивности морозного пучения и повышению долговечности дорожной конструкции. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании дорожных одежд для регионов с резко континентальным климатом.

Ключевые слова: асфальтобетонное покрытие, теплопроводность, дорожная одежда, глубина промерзания, земляное полотно, водно-тепловой режим, морозное пучение, долговечность дорог.

Abstract. This paper investigates the influence of the thermophysical properties of asphalt concrete pavement on the frost penetration depth of the road subgrade. The study examines the water-thermal regime of pavement structures and the factors affecting soil freezing and frost heave processes. A theoretical analysis was carried out to evaluate the effect of the thermal conductivity of different asphalt concrete mixtures on the freezing depth of the subgrade. The results show that reducing the thermal conductivity of the upper pavement layer decreases the frost penetration depth, thereby reducing frost heave and improving the durability and service life of pavement structures. The findings can be applied in the design of road pavements for regions with severe continental climates.

Keywords: asphalt concrete pavement, thermal conductivity, pavement structure, frost penetration depth, road subgrade, water-thermal regime, frost heave, pavement durability.

Проектирование дорожных одежд должно базироваться на разработке конструктивно-технологических мероприятий, учитывающих местные дорожно-климатические и транспортные условия, которые смогли бы обеспечить надежную работу проектируемой конструкции дорожной одежды в процессе эксплуатации.

В ране опубликованных работах [1] предлагалось для улучшения эксплуатационных качеств дорожного покрытия в регионах с жарким климатом использовать в верхних слоях дорожной одежды асфальтобетон с низкой теплопроводностью.

Но однозначно подходить к решению вопроса улучшения эксплуатационных качеств асфальтобетонного покрытия путем уменьшения теплопроводности верхнего слоя дорожной одежды нельзя, так как изменение теплофизических свойств конструктивных слоев будет влиять на водно-тепловой режим, как грунта, так и дорожной одежды. Поэтому необходимо изучить влияние теплофизических свойств асфальтобетона на водно-тепловой режим подстилающего грунта и дорожной одежды.

Большое влияние на прочность дорожной одежды оказывает изменение влажности и температуры, как самого покрытия, так и земляного полотна.

Водно-тепловой режим характеризуется изменением влажности и температуры земляного полотна по глубине во времени и зависит от климатических условий и вида грунта, из которого возведено земляное полотно [2].

Опасное действие неблагоприятного водно-теплого режима на дорогу проявляется в разуплотнении грунта земляного полотна, снижении прочности, образовании пучин зимой и просадочных явлений проезжей части в весенний период, что, в конечном счете, приводит к снижению ровности и прочности дорожных одежд, понижению скорости движения и производительности транспортных средств.

Круглогодичный цикл водно-теплого режима земляного полотна автомобильных дорог состоит из четырех взаимообусловленных периодов изменения влажности:

- 1) первоначального накопления влаги (осенний период);
- 2) интенсивного перемещения и накопления влаги при промерзании земляного полотна;
- 3) максимального влагонасыщения при оттаивании грунта;
- 4) просыхания.

Все периоды увлажнения составляют единый закономерный цикл передвижения влаги в грунтах полотна в результате воздействия на него природных факторов окружающей среды.

Основным источником увлажнения в период первоначального осеннего накопления являются атмосферные осадки и водяные пары.

Зимнее накопление влаги в грунтах происходит путем перемещения ее по направлению теплового потока снизу и с боков, от более теплых мест к более холодным, за счет перераспределения внутренних запасов влаги и миграции ее от уровня подземных вод. Величина зимнего влагонакопления зависит от климатических условий района и метеорологических условий года.

Одновременно с накоплением влаги происходит морозное пучение грунтов, сопровождающееся их разуплотнением. Максимальная величина общего пучения в большинстве случаев определяется в основном величиной общего зимнего влагонакопления.

Третий период – оттаивания и максимального влагонасыщения начинается с установлением в верхних слоях грунта устойчивых положительных температур и продолжается до полного оттаивания грунта. На величину весеннего влагонасыщения влияет глубина залегания грунтовых вод. Неглубокое залегание грунтовых вод может привести к переувлажнению только что оттаявших грунтов.

По мере прогревания земляного полотна начинается четвертый период – просыхание грунтов, т.е. уменьшение их влажности и восстановление плотности и несущей способности. Приток влаги снизу от подземных вод уменьшается, а в некоторых случаях и совсем прекращается, поскольку в этот период происходит понижение уровня грунтовых вод. Для этого периода характерна минимальная влажность и максимальная плотность грунтов земляного полотна.

Как было сказано, выше из всех четырех периодов водно-теплого режима замена верхнего слоя дорожной одежды на асфальтобетон с низкой теплопроводностью будет оказывать влияние только на величину глубины промерзания дорожной конструкции и земляного полотна. Поэтому в настоящей работе предлагается теоретическое исследование влияния теплопроводности конструктивных слоев на глубину промерзания дорожной одежды и подстилающего грунта.

Для теоретического исследования влияния изменения теплопроводности асфальтобетона на глубину промерзания грунта воспользуемся формулой [3, с. 116]

$$h = \sqrt{\frac{\lambda T}{\rho W \delta} \left[t_{\text{л}} - t_{\text{в}} + (t_{\text{в}} - t_{\text{г}}) \frac{R_{\text{л}} + R_0}{R} \right]}, \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности мерзлого грунта,
ккал/м·ч·град;

ρ - скрытая теплота льдообразования, равная 80 ккал/кг;

W - влажность грунта, %;

δ - плотность грунта, кг/м³;

t_B, t_Γ, t_L - температура воздуха, грунта и льдообразования;

R_0 - тепловое сопротивление дорожной одежды, град·м²/Вт,

$$R_0 = \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3}, \quad (2)$$

где h_1, h_2, h_3 - толщины слоев, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - коэффициенты теплопроводности;

R - общее тепловое сопротивление, град·м²/Вт, равно

$$R = \frac{H'}{\lambda_{оп}} + \frac{h_c}{\lambda_c}, \quad (3)$$

где H' - глубина, на которой принимается температура t_Γ ;

$\lambda_{оп}$ - коэффициент теплопроводности грунта поля;

h_c - толщина снегового покрова в поле с коэффициентом теплопроводности λ_c .

В формуле (1) значения W , λ , δ , t_B , t_Γ , $\lambda_{оп}$, h_c , λ_c определяются средними за период промерзания T .

Коэффициенты теплопроводности для грунтов могут приниматься приближенно по таблице 1. Коэффициент теплопроводности снега λ_c может быть принят ориентировочно: для свежеснежавшего снега (начала зимнего периода) – 0,23; для уплотненного снега (середина зимнего периода) – 0,44; для начала таяния (конец холодного периода) – 0,59.

Таблица 1. Значения коэффициента теплопроводности и плотности для грунтов различной влажности

$W, \%$	Глинистые грунты		$W, \%$	Глинистые грунты	
	$\delta, \text{г/см}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{град)}$		$\delta, \text{г/см}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{град)}$
18	1,7	2,49	8	1,6	1,88
18	1,6	2,19	8	1,5	1,64
18	1,5	1,92	8	1,4	1,43
18	1,4	1,57	15	1,65	2,95
18	1,3	1,26	15	1,6	2,57
27	1,6	2,79	15	1,5	2,23
27	1,5	2,48	15	1,4	1,93
27	1,4	2,20	20	1,7	3,94
27	1,3	1,80	20	1,6	3,16
27	1,2	1,49	20	1,5	2,75
40	1,3	2,36	20	1,4	2,38
40	1,2	2,13	25	1,3	2,21

Температура льдообразования t_L принимается в соответствии с таблицей 2.

Значения t_B , t_Γ на глубине H' , v - скорость ветра, принимаются по климатологическому справочнику или данным гидро- и агрометеорологических станций.

Рекомендуется значения t_Γ принимать для стандартно наблюдаемой в агрометеорологии глубины H' , равной 3,2 или 3,0 м.

Поскольку аномальные отклонения практически затухают в слое H , то при расчете глубины промерзания принимаются среднемесячные t_r . Значения t_B можно принимать среднепентадные, декадные или месячные. Соответственно необходимо осреднять за эти периоды и значения h_c .

По величине скорости ветра v принимаются значения R_{II} :

$v, м/сек$	1	2	3	4	5	6-7	8-10
$R_{II}, град \cdot м^2 / Вт$	0,14	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04

Поскольку величина R_{II} мало влияет на h , то при назначении R_{II} можно принимать среднемесячные значения v .

Таблица 2. Значения температуры льдообразования для различных грунтов

Грунт	$t_L, град$	Грунт	$t_L, град$
Среднезернистые пески	от - 0,4 до - 0,6	Тяжелые пылеватые суглинки	от - 0,9 до - 1,4
Легкие супеси Легкие пылеватые пески	„ - 0,2 „ - 0,6 „ - 0,3 „ - 0,5	Пылеватые глины, тяжелые пылеватые супеси	„ - 1,2 „ - 2,0

Для определения глубины промерзания грунта при различной теплопроводности верхнего слоя дорожной одежды необходимо сначала определить глубину промерзания грунта экспериментального участка [1] с дорожной конструкцией, указанной в таблице 3. Метеорологические данные приняты из климатологического справочника и СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика». Необходимые для расчета исходные характеристики приведены в таблице 4.

Из таблиц 1, 2, 3, приведенные выше, по значениям влажности и плотности грунта были определены его теплопроводность и температура льдообразования. При влажности грунта $W=18\%$ и плотности $\delta = 1,72/см^3$ теплопроводность $\lambda_{он} = 2,48 Вт/м \cdot град$. Для тяжелых пылеватых суглинков температура льдообразования $t_L = -0,9^0C$. Среднее значение скорости ветра на весь период промерзания грунта $v_{cp}=5,8$ м/сек, принимаем $R_{II}=0,06 град \cdot м^2 / Вт$. Толщину выпавшего снега за весь период промерзания принимаем 0,04м, $\lambda_c = 0,42 Вт/м \cdot град$.

Таблица 3. Конструктивные слои дорожной одежды экспериментального участка дороги и теплофизические свойства их материалов

Вид верхнего слоя дорожной одежды	Конструктивные слои дорожной одежды	Толщина слоя, см	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)
Асфальтобетон	1. А/б покрытие	6	1,54	0,8
	2. Смесь старого а/б с гравием	12	1,19	0,95
	3. Природный гравий	18	0,65	1,05
	4. Песчаный грунт	6	0,51	1,02
	5. Грунт з/п		0,96	1,19
Природный гравий	1. Природный гравий	26	0,65	1,05
	2. Песчаный грунт	13	0,51	1,02
	3. Грунт з/п		0,96	1,19

По формуле (2), подставляя значения толщины и коэффициента теплопроводности каждого слоя дорожной конструкции, определили тепловое сопротивление дорожной одежды

$$R_0 = \frac{0,06}{1,54} + \frac{0,12}{1,19} + \frac{0,18}{0,65} + \frac{0,06}{0,51} = 0,56 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

Таблица 4. Некоторые метеорологические показатели для города Кызылорда (СНиП 2.01.01-82)

Показатели	Месяцы				
	XI	XII	I	II	III
Температура воздуха, °C	-0,1	-6,6	-9,3	-7,3	0,8
Средняя температура воздуха с ноября месяца, °C	-0,1	-3,4	-5,3	-5,8	-4,5
Температура грунта на глубине $H' = 3,2 \text{ м}$, °C	6,7	5,4	4,1	3,1	2,5
Средняя температура грунта, °C	6,7	6,0	5,5	4,9	4,4
Скорость ветра, м/сек	5,0	5,7	6,3	6,5	5,5
Влажность грунта, %	18	20	22	24	26
Продолжительность промерзания на конец каждого месяца, ч	720	1464	2208	2928	-

Общее тепловое сопротивление определили по формуле (3)

$$R = \frac{3,2}{2,48} + \frac{0,04}{0,36} = 1,6 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

Подставляя полученные значения в формулу (1) определили глубину промерзания грунта

$$h = \sqrt{\frac{2,83 \cdot 2928}{80 \cdot 0,18 \cdot 1700} \left[-0,9 + 9,3 + (-9,3 - 6,7) \frac{0,07 + 0,56}{1,6} \right]} = 0,84 \text{ м}.$$

Из теоретических расчетов видно, что глубина промерзания грунта и дорожной конструкции на выбранном экспериментальном участке дороги $h = 0,84 \text{ м}$.

Для сравнения определим, как будет меняться глубина промерзания h при замене верхнего слоя дорожной конструкции на асфальтобетон с более низкой теплопроводностью (песчаный или мелкозернистый).

При составлении прогнозируемой конструкции дорожной одежды учитывались следующие требования по строительству дорожных асфальтобетонных покрытий: в двухслойном покрытии толщина верхнего слоя из мелко- и среднезернистого асфальтобетона должна составлять 3,5-5 см из песчаного – 3-3,5 см; толщина нижнего слоя из среднезернистого асфальтобетона – 4-6 см, из крупнозернистого – 5-8 см. Общая толщина двухслойных покрытий с верхним слоем из щебенистого асфальтобетона должна составлять 7,5-13 см, из песчаного – 7-9,5 см.

Коэффициенты теплопроводности λ песчаного, мелкозернистого, среднезернистого и крупнозернистого асфальтобетонов были установлены ранее в лабораторных условиях. Для каждого вида асфальтобетона брали средние значения λ . Результаты расчетов показаны в таблице 5.

Таблица 5. Результаты теоретических расчетов

№	Вид конструкции	Толщина и теплопроводность слоев $h, \text{ м} ; \lambda, \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$	Тепловое сопротивление, $R_0, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	Глубина промерзания h , м
---	-----------------	---	---	---

1.	1-ый слой – мелкозерн. 2-ой слой – крупнозерн.	$h_1 = 0,05; \lambda_1 = 0,69$ $h_2 = 0,08; \lambda_2 = 1,32$	0,59	0,72
2.	1-ый слой – мелкозерн. 2-ой слой – среднезерн.	$h_1 = 0,05; \lambda_1 = 0,69$ $h_2 = 0,06; \lambda_2 = 1,15$	0,61	0,68
3.	1-ый слой – песчаный 2-ой слой – крупнозерн.	$h_1 = 0,035; \lambda_1 = 0,42$ $h_2 = 0,08; \lambda_2 = 1,32$	0,60	0,70
4.	1-ый слой – песчаный 2-ой слой – среднезерн.	$h_1 = 0,035; \lambda_1 = 0,42$ $h_2 = 0,06; \lambda_2 = 1,15$	0,63	0,62
5.	1-ый слой – песчаный 2-ой слой – мелкозерн.	$h_1 = 0,035; \lambda_1 = 0,42$ $h_1 = 0,06; \lambda_1 = 0,69$	0,68	0,57
6.	1-ый слой – среднезерн. 2-ой слой – крупнозерн.	$h_2 = 0,05; \lambda_2 = 1,15$ $h_2 = 0,08; \lambda_2 = 1,32$	0,53	0,80

Анализ полученных результатов показывает, что уменьшение теплопроводности асфальтобетона приводит к уменьшению глубины промерзания грунта, что в свою очередь уменьшает пучинообразование и разрушение дорожного покрытия.

Список литературы:

1. Теплообменный процесс в слоях дорожной одежды на дорогах крупных городов. Телтаев Б.Б., Сайлаубекова Н.С. Новости в дорожном деле: Науч.-техн. информационный сборник. – М., 2004.
2. Сиденко В. М. Водно-тепловой режим многослойной дорожной конструкции. Доклады и сообщения на научно-техническом совещании по строительству автомобильных дорог. М., 1963.
3. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. Под ред. И. А. Золотаря, Н. А. Пузакова, В. М. Сиденко. Изд-во «Транспорт», 1971.