

**РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА С УЧЕТОМ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ДОРОЖНОЙ
ОДЕЖДЫ****THE CALCULATION OF THE FREEZING DEPTH OF SUBGRADE GIVEN
THERMAL CHARACTERISTICS OF PAVEMENT MATERIALS**

Макалада жол төшөлгөсүнүн катмарындагы жылуулук масса алмашуусунун механизми каралат жана анын конструкциясы үчүн жылуулук өткөрбөөчү материалдарды тандоо боюнча эсептөө мисалы келтирилет. Эсептөөдө айлана-чөйрө аба ырайынын температурасынын көп жылдык маалыматтары эске алынган. Жол төшөлгөсүнүн материалдарынын жылуулук-физикалык мүнөздөмөлөрү лабораториялык шарттарда аныкталган. Эсептөө методикасы жол төшөлгөсүнүн конструкциясына жылуулук өткөрүмдүүлүгү төмөн материалды тандоого багытталган.

***Ачкыч сөздөр:** жол төшөлгөсү, жылуулук өткөрүмдүүлүк, жылуулук-техникалык мүнөздөмөлөр, тоңуу тереңдиги, жылуулук каршылыгы.*

В статье рассматриваются механизмы теплообмена в слоях дорожной одежды и приводится пример расчета по выбору теплоизоляционных материалов для ее конструкции. При этом в расчет использовались многолетние данные по температуре окружающей среды. Теплофизические характеристики материалов дорожной одежды определялись в лабораторных условиях. Методика расчета направлена для выбора низкотеплопроводных материалов в конструкциях дорожных одежд.

***Ключевые слова:** дорожная одежда, теплопроводность, теплотехнические характеристики, глубина промерзания, тепловое сопротивление.*

This article discusses teplomassaobmena mechanisms of pavement layers and an example of calculation for selection of thermal insulation materials for its construction. At the same time used in the calculation of long-term data on the ambient temperature of the environment. Thermal characteristics of pavement materials were determined in the laboratory. Method of calculation is aimed to select nizkoteploprovodnyye materials in the construction of pavements.

***Keywords:** pavement, thermal conductivity, thermal performance, depth of freezing, thermal resistance.*

Механизм передачи тепла от конструктивных слоев дорожной одежды обусловлен движением микроструктурных элементов тела и зависит от физических свойств ее материалов. Изменение температуры приземного воздуха t_g в течение некоторого периода ΔT обуславливает на различных глубинах дорожной конструкции соответствующие закономерные изменения. Температурный режим дорожной конструкции на различной глубине и в разные периоды времени можно характеризовать данными многолетних наблюдений.

Допустим, что имеются многолетние наблюдения для периода ΔT за температурами грунта t_g на различных глубинах в пределах Z_{32} . При таком допущении для анализа температурного поля за период ΔT было бы достаточно знать граничные условия – температуры воздуха t_g и грунта t_g на некоторой глубине H .

На основе метода теплотехнического расчета проезжей части как слоистой системы температура на любом уровне n в пределах периода ΔT может быть рассчитана по формуле [1]:

$$t_n = t_в + (t_г - t_в) \frac{R_n + \Sigma R_n}{R}, \quad (1)$$

где R_n - тепловое сопротивление, характеризующее теплообмен покрытия с воздухом; ΣR_n - тепловое сопротивление слоев, расположенных выше плоскости, n ; R - суммарное тепловое сопротивление всех слоев конструкции до глубины H .

При промерзании грунта с влажностью W и плотностью δ на глубину Δh за период ΔT выделится скрытой теплоты [1]:

$$q_1 = \rho W \delta \Delta h. \quad (2)$$

За это же время через промерзший слой пройдет снизу вверх следующее количество тепла

$$q_2 = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta h} (t_n - t_0). \quad (3)$$

Выражение для расчета глубины h_{np} промерзания дорожной конструкции как слоистой системы имеет вид:

$$h_{np} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T \cdot K_{yn}}{\rho_{он} \cdot W \cdot \delta} \left[t_{л} - t_{в} + (t_{в} - t_{г}) \frac{R_{л} + R_0}{R} \right]}, \quad (4)$$

где λ - коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, ккал/м·ч·град; ρ - скрытая теплота льдообразования, равная 80 ккал/кг; W - влажность грунта, %; $\rho_{он}$ - оптимальная плотность грунта при стандартном уплотнении, т/м³; $t_{в}, t_{г}, t_{л}$ - температура воздуха, грунта и льдообразования; R_0 - тепловое сопротивление дорожной одежды, град·м²/Вт /1-3/:

$$R_0 = \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3}, \quad (5)$$

K_{yn} - коэффициент уплотнение слоя дорожной одежды, $K_{yn} = \rho_{ec} / \rho_{он}$; ρ_{ec} - естественная плотность слоя дорожной одежды, т/м³; 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 [1-3]:

$$R = \frac{H'}{\lambda_{оп}} + \frac{h_c}{\lambda_c},$$

(6)

где H' – глубина, на которой принимается температура t_T ; $\lambda_{оп}$ – коэффициент теплопроводности грунта поля; h_c – толщина снегового покрова в поле с коэффициентом теплопроводности λ_c .

Пример расчета. В качестве объектов исследования приняты автомобильные дороги Западного региона Казахстана, т.е. Атырауская, Мангистауская, Актюбинская и Западно-Казахстанская области.

1. **Постановка задачи.** При влажности грунта W , плотности ρ и теплопроводности λ определить глубину промерзания грунта для климатических условий Западного региона Казахстана. При этом, согласно СНиП 2.01.01-82, для тяжелого пылеватого суглинка, характерного для Западного региона Казахстана, температуру льдообразования принимаем равным $t_n = -0,9^\circ C$.

Для определения глубины промерзания грунта земляного полотна в полевых условиях на участках автомобильных дорог «Актобе–Атырау–гр РФ (г. Астрахань)» (км 23+000), «Доссор-Кульсары» (км 47+500) и «Кульсары–Бейнеу» (242+000) нами были отобраны пробы материалов дорожной одежды и в специальной дорожной лаборатории «ГУ Атыраужоллаборатория» были проанализированы их классификационные свойства, а в теплофизической лаборатории Кызылординского государственного университета им. Коркыт Ата – уточнялись коэффициенты теплопроводности λ с учетом их естественной влажности $W_{ер}$ и коэффициента уплотнения K_y .

2. **Исходные данные.** Расчетные показатели по метеорологическим условиям представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Метеорологические показатели Атырауской области

Показатели	Зимний период года, месяцы				
	І	ІІ	ІІІ	ІV	V
Температура воздуха, $^{\circ}C$	0,1	6,6	9,3	7,3	,8
Средняя температура воздуха с ноября месяца, $^{\circ}C$	0,1	3,4	5,3	5,8	4,5
Температура грунта на глубине $H' = 3,2 м$, $^{\circ}C$,7	,4	,1	,1	,5
Средняя температура грунта, $^{\circ}C$,7	,0	,5	,9	,4
Скорость ветра, м/с	,0	,7	,3	,5	,5
Влажность грунта, %	8	0	2	4	6
Продолжительность промерзания на конец каждого месяца, ч	20	464	208	928	60

Среднее значение скорости ветра на весь период (при промерзании грунта) принимаем по климатическим справочникам равным $v_{cp} = 7,8-9,2$ м/сек, а тепловое сопротивление, характеризующее теплообмен покрытия с воздухом – $R_n = 0,04$ град \cdot м² / Вт. Среднегодовую толщину выпавшего снега за весь период промерзания

принимая: для Мангыстауской области – 0,04 м; Атырауской – 0,05 м, Актыбинской – 0,12 м и Западно-Казахстанской области – 0,14 м.

3. Алгоритм расчета приведен выше.

4. *Ход решения.* По формуле (5), подставляя значения толщины каждого слоя и коэффициента теплопроводности его материалов, определяем тепловое сопротивление дорожной одежды. В качестве примера рассматриваем участок км 40+500 автомобильной дороги «Доссор-Кульсары», при которых $h_1 = 0,05$; $\lambda_1 = 1,69$; $h_2 = 0,08$; $\lambda_2 = 1,32$; $h_3 = 0,18$; $\lambda_3 = 1,12$; $h_4 = 0,18$; $\lambda_4 = 2,52$ и $\lambda_5 = 2,49$.

$$\text{Из выражения (5) определяем: } R_0 = \frac{0,05}{1,69} + \frac{0,08}{1,32} + \frac{0,18}{1,12} + \frac{0,18}{2,52} = 0,365 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

Общее тепловое сопротивление определили по формуле (6):

$$R = \frac{3,2}{2,49} + \frac{0,04}{0,42} = 1,38 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

Подставляя полученные значения в формулу (4) определяем глубину промерзания грунта:

$$h_{np} = \sqrt{\frac{2,49 \cdot 2928 \cdot 1}{80 \cdot 0,49 \cdot 1670} \left[-0,9 + 9,3 + (-9,3 - 6,7) \frac{0,04 + 0,365}{1,38} \right]} = 0,52 \text{ м.}$$

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

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 составляет 3,5-5 см, а нижнего – крупнозернистого – 5-8 см. Общая толщина двухслойных покрытий с верхним слоем из щебенистого асфальтобетона составляет 7,5-13 см и из песчаного – 7-9,5 см (рис. 1 и таблица 2).

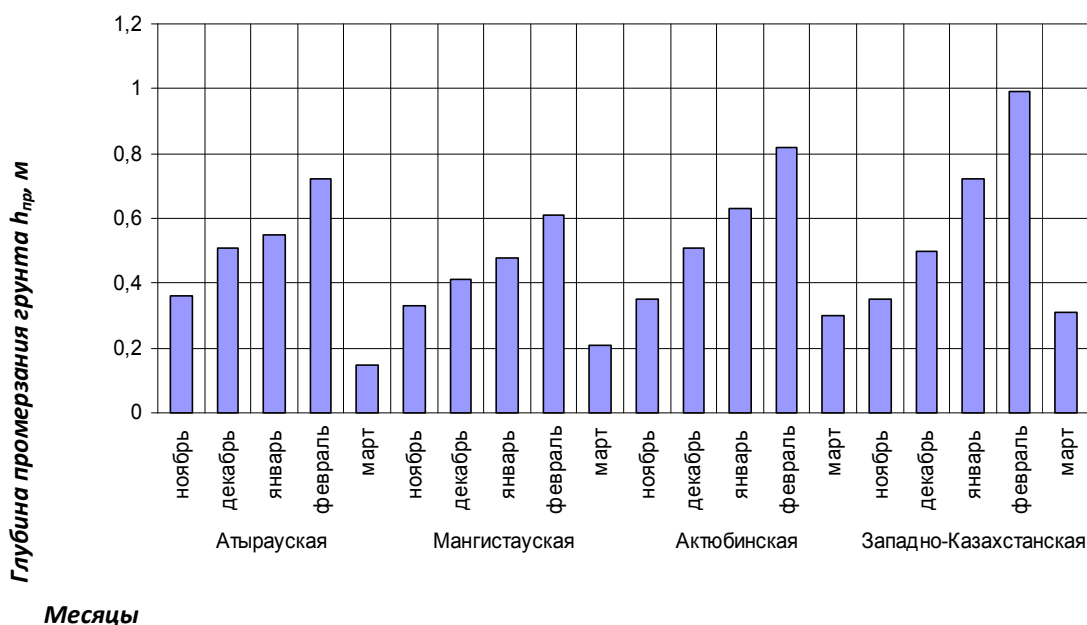


Рис.1. Глубина промерзания грунта земляного полотна по месяцам:

1 – Мангыстауская область; 2 – Атырауская область; 3 и 6 – Актыбинская область; 4 и 5 – Западно-Казахстанская область

Таблица 2 - Результаты теоретических расчетов глубины промерзания грунта и дорожной конструкции

№	Вид конструкции	Толщина и теплопроводность слоев $h, м$; $\lambda, Вт/м \cdot К$	Тепловое сопротивление, $R_0, м^2 \cdot К/Вт$	Глубина промерзания $h_{пр}, м$
1	2	3	4	5
<i>для а/д «Доссор–Кульсары», км 47+500</i>				
1	1-ый слой – м/з а/б 2-ой слой – к/з а/б 3-й слой – ч/щ (Б=6 %) 4-й слой – прир. гравий. Грунт з/п – суглинок ($W=18,2 \%$, $p=1,67 т/м^3$)	$h_1 = 0,05$; $\lambda_1 = 1,69$ $h_2 = 0,08$; $\lambda_2 = 1,32$ $h_3 = 0,18$; $\lambda_3 = 1,12$ $h_4 = 0,18$; $\lambda_4 = 2,52$ $\lambda_5 = 2,49$	0,365	ноябрь – 0,36м дек. – 0,51 м январь – 0,63 м февраль – 0,72 м март – 0,30 м
<i>для а/д «Актобе–Атырау–гр РФ (на Астрахань)», км 23+000</i>				
3	1-ый слой – песчан. а/б 2-ой слой – к/з а/б 3-й слой – ч/щ (Б=10 %) 4-й слой – ПГС Грунт з/п – суглинок ($W=15,2 \%$, $p=1,58 т/м^3$)	$h_1 = 0,035$; $\lambda_1 = 1,42$ $h_2 = 0,08$; $\lambda_2 = 1,32$ $h_3 = 0,18$; $\lambda_3 = 2,44$ $h_4 = 0,18$; $\lambda_4 = 1,52$ $\lambda_5 = 2,58$	0,336	ноябрь – 0,35м дек. – 0,50м январь – 0,62 м февраль – 0,71 м март – 0,31 м
<i>для а/д «Актобе–Уральск», км 1850+000</i>				
4	1-ый слой – песчаный 2-ой слой – с/з а/б. 3-й слой – ч/щ (Б=6 %) 4-й слой – шлак, укр. 4% цементом Грунт з/п – суглинок ($W=14,2 \%$, $p=1,65 т/м^3$)	$h_1 = 0,035$; $\lambda_1 = 1,42$ $h_2 = 0,06$; $\lambda_2 = 1,15$ $h_3 = 0,26$; $\lambda_3 = 1,41$ $h_4 = 0,18$; $\lambda_4 = 0,92$ $\lambda_5 = 2,65$	0,515	ноябрь – 0,25м дек. – 0,36м январь – 0,44 м февраль – 0,51 м март – 0,22 м
<i>для а/д «гр. РФ (на Астрахань)– Актобе–Атырау», км 313+000</i>				

5	1-ый слой – с/з а/б	$h_1 = 0,05;$	0,356	ноябрь – 0,31 м дек. – 0,44 м январь – 0,55 м февраль – 0,63 м март – 0,27 м
	2-ой слой – к/з а/б	$\lambda_1 = 1,15$		
	3-й слой – ч/щ (Б= 9 %)	$h_2 = 0,08;$		
	4-й слой – фракцир. щеб.	$\lambda_2 = 1,32$		
	Грунт з/п – суглинок ($W=16,2 \%, p=1,48 \text{ т/м}^3$)	$h_3 = 0,26;$ $\lambda_3 = 1,41$ $h_4 = 0,18;$ $\lambda_4 = 2,60$		
		$\lambda_5 = 2,29$		

Значение теплового сопротивления дорожной одежды ($\text{град}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$) прямым образом зависит от толщины каждого слоя и коэффициента теплопроводности материалов дорожной одежды. Причем, слои, состоящие из минеральных материалов, в частности песчано-гравийной смеси или фракционированного щебня, имеют самые высокие коэффициенты теплопроводности. Например, коэффициент теплопроводности фракционированного щебня колеблется в пределах $\lambda=2,44\text{-}2,60 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Такая существенно отличающаяся разность объясняется гранулометрическим составом и однородностью материалов, причем чем ниже и однородней их модуль крупности, тем выше их теплопроводность. А величина общего теплового сопротивления зависит от толщины снегового покрова h_c и его коэффициента теплопроводности $\lambda_{оп}$.

В диаграмме, приведенной на рисунке 1, представлена глубина промерзания грунта земляного полотна по месяцам. Как видно, наиболее критическим месяцем по уровню промерзанию грунтов является январь и февраль. В эти месяцы глубина промерзания грунтов земляного полотна достигает для дорог Арытауской области 0,72 м, причем конструкция дорожной одежды на исследуемых дорогах не имеет низкотеплопроводные шлакосодержащие материалы. Конструкция дорожной одежды в рассматриваемой конструкции представлена в таблице 1 (графа 1 и 3).

Существенное отличие глубины промерзания земляного полотна наблюдается в Западно-Казахстанской области. Например, на участке км 1850+400 автомобильной дороги «Самара–Шымкент», где был использован шлаковый щебень, укрепленного 4 %-м цементом, максимальное промерзание грунта в феврале месяца составляло 0,51 м, а на этом же дороге (км 2156), где материалом основания является фракционированный щебень, глубина промерзания равна 0,70 м. Отсюда видно, что менее теплопроводные материалы значительно могут снижать глубину промерзания земляного полотна независимо от того, что в каком дорожно-климатическом районе расположена дорога.

Резюме.

1. С увеличением (или понижением) влажности в теле грунтового основания теплопроводность резко подвергается изменению, причиной этого является наполнение пор влагой. Поэтому теплопроводность слоя земляного полотна или основания дорожной одежды, обработанные грунтом, с повышением влажности, т.е. наполнением пор влагой, увеличивается.

2. Сроки наступления периодов увлажнения земляного полотна автомобильных дорог зависят от погодных условий и могут смещаться в ту или иную сторону. Наличие четырех периодов увлажнения характерно для II-V климатических зон. Однако для каждой климатической зоны имеется характерный только для нее водно-тепловой режим местности и земляного полотна, особенно в части величин и распределения влажности в

грунтах. Отличие водно-теплового режима прилегающей местности обуславливается рядом факторов и, прежде всего, конструкцией земляного полотна и дорожной одежды.

3. Результаты расчета адекватно доказывают то, что с увеличением влажности грунта существенно изменяются теплофизические свойства грунта, т.е. увеличивается теплопроводность грунта. Например, при естественной влажности грунта земляного полотна $W=18,2\%$ и его естественной плотности $p=1,67\text{ т/м}^3$, коэффициент теплопроводности достигает $\lambda_5 = 2,49\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а при $W=16,2\%$ и $p=1,48\text{ т/м}^3$ – $\lambda_5 = 2,29\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Список литературы

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В.Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

2. Литвинов А.М. Теоретические основы теплопроводности [Текст] / А.М. Литвинов. – М.: Энергия, 1964. – 367 с.

3. Кушнырев В.И. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст] /В.И. Кушнырев, В.И. Лебедев, В.А. Павленко. – М.: Стройиздат, 1986. – 484 с.