

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 551.34:624.139

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ТЕПЛОИЗОЛЯТОРОВ
ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ МЕРЗЛОТНЫХ УСЛОВИЙ
В ОСНОВАНИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ НАСЫПИ

Е.С. Ашпиз, Л.Н. Хрусталеv*, Л.В. Емельянова*, М.А. Ведерникова*

*Московский государственный университет путей сообщения,
127994, Москва, ул. Образцова, 15, Россия*

** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119992, Москва, Воробьевы горы, Россия*

Рассматривается конструкция железнодорожной насыпи с синтетическим теплоизолятором на вечномерзлых грунтах. Показано, что теплоизолятор в теле насыпи позволяет сохранить грунты ее основания в мерзлом состоянии. В низких насыпях теплоизолятор рекомендуется укладывать у подошвы насыпи, в высоких – под крепление откосов и берм. Приводятся результаты аналитического расчета и математического моделирования по определению толщины теплоизолятора.

Железнодорожная насыпь, вечномерзлые грунты, синтетический теплоизолятор, аналитический расчет, математическое моделирование

USING OF SYNTHETICAL THERMAL INSULATORS FOR CONSERVATION
OF FROZEN SOIL CONDITIONS IN THE BASE OF RAILWAY EMBANKMENT

E.S. Ashpiz, L.N. Khrustalev*, L.V. Emelyanova*, M.A. Vedernikova*

Moscow State University of Railway, 127994, Moscow, Obraztsova str., 15, Russia

** Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, 119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia*

The design of railway embankment with synthetical thermal insulator on permafrost soil is considered. It is shown that thermal insulator in embankment body allows one to save soils under embankment in frozen condition. It is recommended to put the thermal insulator nearby embankment foot in low embankments and under the covering of the escarpments in high embankments. The results of analytical calculation and mathematical modeling on the determination of the thermal insulator thickness are given.

Railway embankment, permafrost soil, synthetical thermal insulator, analytical calculation, mathematical modeling

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожная насыпь существенно меняет условия теплообмена грунта с атмосферой. При этом верхняя поверхность насыпи (основная площадка) усиливает охлаждение грунта зимой за счет искусственного удаления с ее поверхности снега, а откосы, наоборот, уменьшают его за счет накопления на них снега, счищаемого с основной площадки, и в результате ветрового снегопереноса. На откосах также увеличивается отепление грунта летом за счет лучистой энергии, поступление которой возрастает из-за уменьшения отражательной способности поверхности откоса и ее наклона к горизонту. При определенном соотношении по-

верхностей основной площадки и откосов в тело насыпи поступает тепла больше, чем “холода”, и в основании земляного полотна понижается верхняя граница вечномерзлых грунтов, что практически всегда сопровождается деформациями насыпи. Очевидно, отепляющее влияние откоса можно уменьшить, если его поверхность покрыть теплоизолятором, который следует уложить на глубине 15–20 см непосредственно под креплением откоса. В качестве последнего наиболее целесообразно использовать синтетический теплоизолятор (например, пеноплэкс), обладающий малой теплопроводностью, гидрофобными свойствами и небольшой

массой; он также удобен при монтаже. При определенной толщине синтетического теплоизолятора баланс тепла станет отрицательным, насыпь начнет оказывать на грунты основания охлаждающее воздействие и сохранит основание в мерзлом состоянии.

Обозначим количество тепловой энергии, уходящей за год через поверхность основной площадки, Q_1 , а количество тепловой энергии, приходящей через поверхность откоса, Q_2 . Условию $Q_1 + Q_2 > 0$ будет соответствовать отепление основания насыпи, а условию $Q_1 + Q_2 < 0$ – его охлаждение. Оценить эти условия в строгой постановке можно только численно с помощью математического моделирования теплового взаимодействия насыпи с грунтами основания, однако при определенном допущении это можно сделать и аналитически. Рассмотрим эти вопросы более подробно.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕПЛОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НАСЫПИ С ВЕЧНОМЕРЗЛЫМИ ОСНОВАНИЯМИ

Будем считать, что интенсивность притока и оттока тепла за год через поверхность откоса и основной площадки определяется разностью потенциальных глубин (т. е. тех, которые могут быть достигнуты, если весь массив грунта будет либо талым, либо мерзлым) и фактических глубин сезонного промерзания–оттаивания:

$$q_1 = (d_{th,1} - d_{f,1}^*)L_v, \quad (1)$$

$$q_2 = (d_{th,2}^* - d_{f,2})L_v, \quad (2)$$

где $d_{th,1}$, $d_{th,2}^*$ – фактическая и потенциальная глубина оттаивания на основной площадке и откосе соответственно, м; $d_{f,1}^*$, $d_{f,2}$ – потенциальная и фактическая глубина промерзания на основной площадке и откосе соответственно, м; L_v – удельная теплота промерзания–оттаивания грунта, Вт·ч/м³.

Поскольку ширина основной площадки и длина откоса в большинстве практических случаев много больше глубины сезонного промерзания–оттаивания, задачу промерзания–оттаивания под серединой основной площадки или откоса условно можно рассматривать как линейную и для ее решения воспользоваться формулой Стефана. При таком подходе погрешность будет возникать только по краям указанных плоскостей (основная площадка, откос) и не окажет существенного влияния на общую оценку теплового процесса, о чем свидетельствуют результаты численного решения двумерной задачи на ЭВМ (см. ниже)

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th}T_s t_s}{L_v} + (\lambda_{th}R_s)^2} - \lambda_{th}R_s, \quad (3)$$

$$d_f = \sqrt{\frac{2\lambda_f T_w t_w}{L_v} + (\lambda_f R_w)^2} - \lambda_f R_w, \quad (4)$$

где λ_{th} , λ_f – коэффициент теплопроводности грунта насыпи в талом и мерзлом состоянии, Вт/(м·°C); T_s , T_w – среднелетняя и среднезимняя температура поверхности грунта в пределах основной площадки или откоса, °C; t_s , t_w – продолжительность летнего и зимнего периодов, ч; R_s , R_w – среднелетнее и среднезимнее термическое сопротивление теплообмену на поверхности грунта в пределах основной площадки или откоса, м²·C/Вт;

$$R_s = \frac{1}{\alpha_s} + R_{ins}, \quad (5)$$

$$R_w = \frac{1}{\alpha_w} + R_{ins} + R_{snow}, \quad (6)$$

где α_s , α_w – коэффициенты теплообмена на поверхности основной площадки или откоса в летнее и зимнее время соответственно, Вт/(м²·°C); R_{ins} – термическое сопротивление изоляции, укладываемой на откос или на основную площадку, м²·C/Вт; R_{snow} – среднезимнее термическое сопротивление снежного покрова на откосе или основной площадке (использованная авторами методика определения указанных величин изложена в учебнике [Хрусталева, 2005]).

Далее, предполагая постоянство глубины промерзания–оттаивания по всей ширине основной площадки или откоса (еще одно допущение), можно определить теплотокки: $Q_1 = q_1 B$ и $Q_2 = q_2 L$ (B – ширина основной площадки, м; L – суммарная длина обоих откосов, включая бермы, м). Очевидно, что сумма этих теплотокков будет равна годовому количеству энергии, поступающей (уходящей) в основание через общую поверхность насыпи. Приравнявая эту энергию нулю, получим уравнение, из которого найдем необходимое термическое сопротивление изоляции, укладываемой на откос насыпи во избежание деградации вечномерзлых грунтов:

$$Q_1 + Q_2 = 0. \quad (7)$$

На рис. 1 показано графическое решение уравнения (7) для трех пикетов проектируемой железнодорожной магистрали Томмот–Якутск при высоте насыпи (H) 3,5 м (ПК 6710+00), 6,0 м (ПК 6711+00) и 9,5 м (ПК 6710+50).

Как можно видеть, насыпь высотой 3,5 м не требует теплоизоляции откосов, для насыпи высотой 6,0 м требуется теплоизолятор толщиной 0,7 см, а для насыпи высотой 9,5 м – 2,2 см (в качестве теплоизолятора принят синтетический теплоизолятор пеноплекс с коэффициентом теплопроводности 0,035 Вт/(м·°C)).

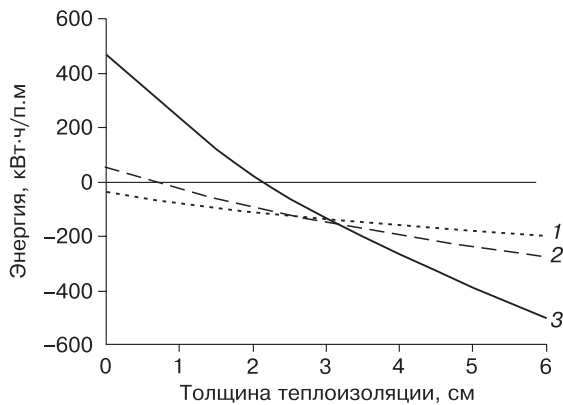


Рис. 1. Зависимость суммарной тепловой энергии, поступающей в основание насыпи, от толщины теплоизоляции на ее откосах:

1 – ПК 6710+00, $H = 3,5$ м, $L/B = 1,94$; 2 – ПК 6711+00, $H = 6,0$ м, $L/B = 3,04$; 3 – ПК 6710+50, $H = 9,5$ м, $L/B = 6,72$.

На низких насыпях* во избежание пучения верхнего строения пути часто укладывают теплоизолятор у поверхности основной площадки, непосредственно под балластной призмой. При таком расположении изолятора уменьшается охлаждающее влияние основной площадки, а тепловое влияние откоса при этом остается прежним, что при определенных условиях приводит к положительному годовому значению энергии, поступающей в основание, и, как следствие, к понижению верхней границы вечномерзлых грунтов. Отсюда следует, что, перекрывая изоляцией основную площадку, необходимо перекрывать и откос.

Отметим, что на рис. 1 кривая 3 идет более круто, чем кривые 1 и 2. Это возможно только в том случае, если сам откос оказывает охлаждающее влияние. Как это может быть?

На рис. 2 показано сокращение глубин сезонного оттаивания (кривая 1) и промерзания (кривая 2) под откосом насыпи с ростом толщины теплоизоляции на нем для ПК 6711+00. Заметим, что оттаивание уменьшается быстрее, чем промерзание. Это объясняется наличием снежного покрова, создающего дополнительное термическое сопротивление на дневной поверхности. При толщине теплоизолятора 3,0 см глубина оттаивания под откосом становится равной глубине промерзания. Это означает, что откос не оказывает никакого теплового воздействия на основание насыпи. А затем глубина оттаивания становится меньше потенциальной глубины промерзания и откос охлаждает основание. Таким образом, при толщине изоляции менее 3,0 см откос отапливает основание, а при больших значениях – охлаждает (кривая 3). Необходи-

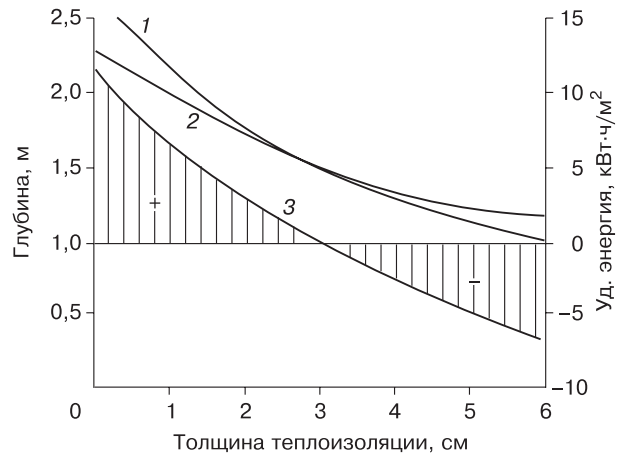


Рис. 2. Зависимости глубины оттаивания (1), промерзания (2) грунта на откосе и удельной тепловой энергии (3) от толщины теплоизоляции (ПК 6711+00, $H = 6,0$ м, $L/B = 3,04$).

мо отметить, что эта закономерность имеет место только при наличии снежного покрова, и величины, приведенные на рисунках, получены для конкретных климатических условий. Ее прикладное значение трудно переоценить. Это означает, что с помощью одной только теплоизоляции можно обеспечить мерзлое состояние грунтов основания насыпи любой высоты независимо от ширины основной площадки.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАСЫПИ С ВЕЧНОМЕРЗЛЫМИ ОСНОВАНИЯМИ

Математическое моделирование теплового взаимодействия насыпи с вечномерзлыми грунтами основания производилось по компьютерной программе “Тепло”, разработанной на кафедре геоэкологии геологического факультета МГУ [Программа..., 1994]. В качестве объектов моделирования были выбраны семь пикетов (ПК) на проектируемой железнодорожной магистрали Томмот–Якутск. Целью моделирования являлось определение толщины изоляции, укладываемой у поверхности (в тело) насыпи, обеспечивающей стабилизацию мерзлотных условий в ее основании. Толщина изоляции определялась подбором, что предусматривало решение многочисленных вариантов задачи. Грунтовые разрезы и характеристики грунтов на выбранных пикетах принимались по данным изысканий (табл. 1), климатические параметры – по данным наблюдений на метеостанции г. Якутска, ближайшей к рассматриваемому участку трассы (табл. 2). Результаты моделирования приведены в табл. 3.

* Низкой насыпью называется насыпь высотой меньше глубины сезонного оттаивания.

Таблица 1. Грунтовые разрезы, физические и теплофизические характеристики грунтов на выбранных пикетах

Название грунта	Интервал глубин, м	Теплота фазового перехода, Вт·ч/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)		Объемная теплоемкость, Вт·ч/(м ³ ·°С)		Весовая влажность, д.е.	Плотность сухого грунта, т/м ³	Сжимаемость при оттаивании δ, д.е.
			талой фазы	мерзлой фазы	талой фазы	мерзлой фазы			
Щебнисто-песчаный грунт, щебня 55 % (тело насыпи)		20 869,0	1,75	1,98	661,0	531,0	0,11	2,146	0,0
ПК 6692+00									
Суглинок	0,0–1,0	37 200,0	1,51	1,68	870,0	650,0	0,25	1,60	0,06
Суглинок	1,0–2,0	36 456,0	1,57	1,66	928,0	650,0	0,28	1,40	0,10
Дресвяный грунт	2,0–3,0	44 194,0	1,92	2,40	842,0	614,0	0,27	1,76	0,20
Щебнистый грунт	3,0–55,0	30 634,0	2,26	2,62	773,0	628,0	0,18	1,83	0,05
ПК 6710+00, 6710+00*									
Суглинок льдистый	0,0–2,5	55 800,0	1,72	1,90	951,0	603,0	0,60	1,00	0,45
Суглинок	2,5–4,5	49 104, 0	1,57	1,80	858,0	586,0	0,48	1,10	0,29
Песок пылеватый	4,5–55,0	28 644,0	1,91	2,14	766,0	568,0	0,22	1,40	0,05
ПК 6710+50									
Суглинок	0,0–1,0	44 640,0	1,68	1,86	969,0	684,0	0,30	1,60	0,10
Суглинок	1,0–2,5	55 800,0	1,72	1,90	951,0	603,0	0,60	1,00	0,45
Суглинок	2,5–5,0	51 150,0	1,57	1,85	855,0	586,0	0,50	1,10	0,30
Супесь	5,0–5,5	32 550,0	1,33	1,51	766,0	568,0	0,25	1,40	0,10
Песок пылеватый	5,5–55,0	32 550,0	1,91	2,14	766,0	568,0	0,25	1,40	0,04
ПК 6711+00, 6711+00*									
Супесь пластичная	0,0–1,5	23 320,0	1,28	1,65	599,0	458,0	0,15	1,60	0,05
Суглинок текучий	1,5–3,5	39 897,0	1,45	1,57	838,0	605,0	0,30	1,43	0,15
Супесь текучая	3,5–4,0	31 620,0	1,68	1,80	772,0	627,0	0,20	1,70	0,10
Суглинок текучий	4,0–5,5	44 640,0	1,57	1,80	860,0	587,0	0,40	1,20	0,42
Песок гравелистый	5,5–55,0	16 740,0	2,73	2,90	744,0	628,0	0,10	1,80	0,15
ПК 6728+00									
Суглинок	0,0–1,4	44 640,0	1,68	1,86	964,0	684,0	0,30	1,60	0,10
Суглинок	1,5–2,0	42 966,0	1,57	1,66	928,0	650,0	0,33	1,40	0,15
Песок пылеватый	2,0–3,5	32 550,0	1,91	2,14	766,0	568,0	0,25	1,40	0,08
Супесь	3,5–55,0	32 550,0	1,39	1,51	766,0	568,0	0,25	1,40	0,07

Примечание. Звездочкой обозначены пикеты (ПК), соответствующие первоначальному продольному профилю железной дороги.

Таблица 2. Климатические параметры

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
T_e , °С	-42,0	-35,6	-22,0	-6,8	6,2	15,6	18,8	14,9	6,1	-7,9	-28,2	-39,5
Q , Вт/м ²	14,34	44,6	122,7	189,6	215,1	240,5	229,4	168,9	105,1	52,6	20,7	7,97
V , м/с	1,4	1,4	2,0	2,8	3,4	3,3	3,0	2,8	2,6	2,6	2,0	1,3
h_s , м	0,23	0,27	0,28	0,17	–	–	–	–	–	0,05	0,14	0,17
ρ_s , г/см ³	0,15	0,16	0,17	0,20	–	–	–	–	–	0,12	0,13	0,14

Примечание. T_e – температура воздуха; Q – суммарная солнечная радиация; V – скорость ветра; h_s – высота снежного покрова; ρ_s – плотность снега.

Таблица 3. Результаты математического моделирования

Пикет	H, м	B, м	L, м	L/B	Толщина теплоизоляции, см	
					у основания насыпи	на поверхности откоса
6692+00	2,0	6,5	7,2	1,11	12	0
6710+00	3,5	6,5	12,6	1,94	4	0
6728+00	5,0	6,5	18,0	2,77	0	5
6711+00	6,0	7,1	21,6	3,04	0	2
6710+00*	8,5	6,5	36,1	5,08	0	4
6710+50	9,5	6,5	39,7	6,10	0	6
6711+00*	10,5	7,1	43,3	6,10	0	4

Примечание. Звездочкой обозначены пикеты, соответствующие первоначальному продольному профилю железной дороги.

Из результатов моделирования следует, что при высоте насыпи до 3,5 м (ПК 6692+00, ПК 6710+00) сезонное оттаивание распространяется ниже подошвы насыпи (рис. 3, кривая 1). Теплоизолятор, положенный у поверхности основной площадки, значительно снижает оттаивание по оси пути, но не уменьшает его в пределах всей площадки (см. рис. 3, кривая 2). Только теплоизолятор, уложенный у подошвы насыпи, позволяет добиться желаемого эффекта – сохранить грунты основания под основной площадкой в мерзлом состоянии (см. рис. 3, кривая 3).

Насыпи высотой более 3,5 м отепляют основание, но отепление, как следует из рис. 4, полностью исчезает, если по всей длине откосов этих насыпей положить теплоизолятор толщиной 2–6 см (см. табл. 3).

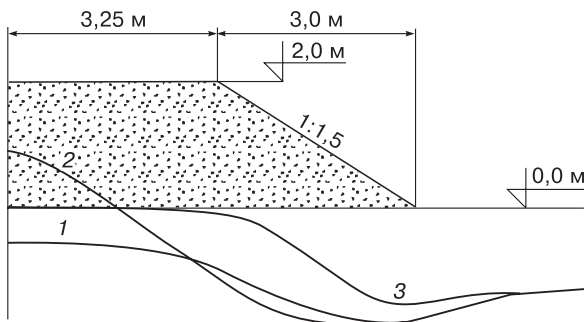


Рис. 3. Положение верхней границы вечномерзлых грунтов в теле и основании насыпи на конец летнего периода через 50 лет после ее возведения (ПК 6692+00, H = 2,0 м, L/B = 1,11):

1 – насыпь без теплоизоляции, 2, 3 – насыпь с теплоизоляцией толщиной 12 см, уложенной горизонтально (2 – у поверхности основной площадки на всю ее ширину, 3 – на высоте 0,3 м от подошвы насыпи на всю ее ширину).

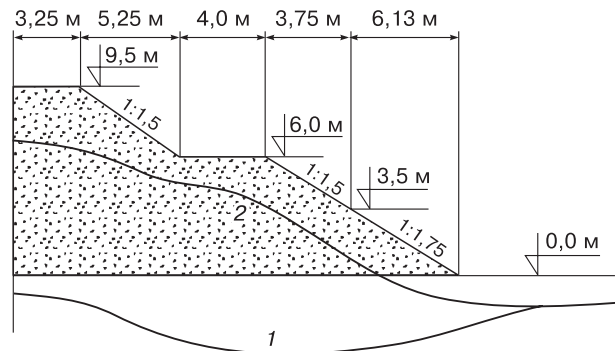


Рис. 4. Положение верхней границы вечномерзлых грунтов в теле и основании насыпи на конец летнего периода через 50 лет после ее возведения (ПК 6710+50, H = 9,5 м, B = 6,5 м, L = 39,7 м):

1 – насыпь без теплоизоляции, 2 – насыпь с теплоизоляцией толщиной 4 см, уложенной под укрепление откосов и берм на всю их длину.

На рис. 5 приведена зависимость необходимой для сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии толщины теплоизолятора от отношения суммарной длины откосов и берм к ширине основной площадки. Видно, что с ростом этого отношения увеличивается и толщина теплоизолятора. Это укладывается в наше теоретическое представление об отепляющем влиянии откосов и охлаждающем влиянии основной площадки. С ростом поверхности отепления (откосы и бермы) при неизменной поверхности охлаждения (основная площадка) для сохранения мерзлого состояния грунтов в основании насыпи требуется и большая величина термического сопротивления теплоизолятора на откосах. Это, на наш взгляд, очевидный факт. На сегодняшний день совсем не очевидным является сокращение скорости приращения толщины изолятора, начиная с некоторой величины (условно назовем ее критической), с ростом указанного выше отношения поверхностей насыпи.

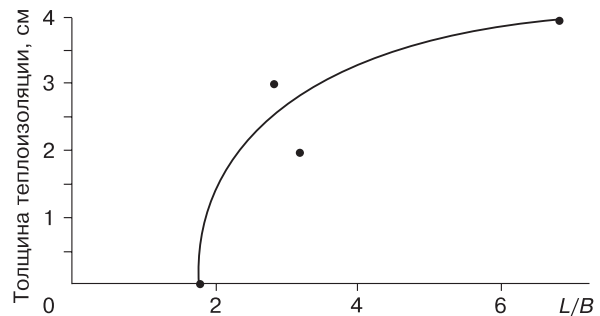


Рис. 5. Зависимость толщины теплоизоляции от соотношения поверхностей насыпи:

точки – результаты моделирования.

Данное обстоятельство можно объяснить только тем, что откос, покрытый теплоизолятором, толщина которого больше критической, начинает оказывать охлаждающее воздействие на грунты основания насыпи, о чем сказано выше. Таким образом, проведенное математическое моделирование теплового взаимодействия насыпи с вечномерзлыми грунтами основания в целом подтверждает наши теоретические представления об этом взаимодействии.

ВЫВОДЫ

1. Синтетический теплоизолятор, уложенный в насыпи, позволяет регулировать температурный режим грунтов насыпи и подстилающих вечномерзлых грунтов основания. В низких насыпях теплоизолятор укладывается вблизи подошвы насыпи на всю ее ширину и препятствует проникновению границы сезонного оттаивания в вечномерзлое основание. В высоких насыпях теплоизолятор укладывается под крепление обоих откосов и берм на всю их длину и обеспечивает сохранение мерзлого состояния грунтов основания. Во избежание деградации вечномерзлых грунтов основания широко применяемая в настоящее время укладка теплоизолятора под балластную призму не рекомендуется.

2. Толщина теплоизолятора назначается на основе математического моделирования теплового

взаимодействия насыпи с грунтами основания или аналитического расчета. Для низких насыпей она зависит от высоты насыпи и с ростом высоты уменьшается. Для высоких насыпей толщина теплоизолятора зависит от отношения общей длины откосов и берм к ширине основной площадки, с ростом этого отношения она увеличивается.

3. Опеляющее влияние откоса насыпи на грунты основания с ростом толщины теплоизолятора на откосе уменьшается, и после критической толщины (толщина изолятора, при которой глубина сезонного оттаивания на откосе равна потенциальной глубине сезонного промерзания) откос начинает оказывать охлаждающее влияние. Это позволяет с помощью укладки одного теплоизолятора без привлечения дополнительных охлаждающих средств (например, каменной наброски, вентиляционных коробов, термосифонов и пр.) обеспечить мерзлое состояние грунтов основания насыпи любой высоты независимо от ширины основной площадки.

Литература

Хрусталеv Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 544 с.

Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами. WARM: Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Хрусталеv Л.Н., Яковлев С.В.; Свидетельство № 940281; Оpubл. РосАПО, 1994.

*Поступила в редакцию
23 апреля 2007 г.*