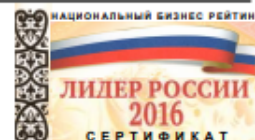
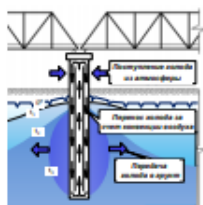
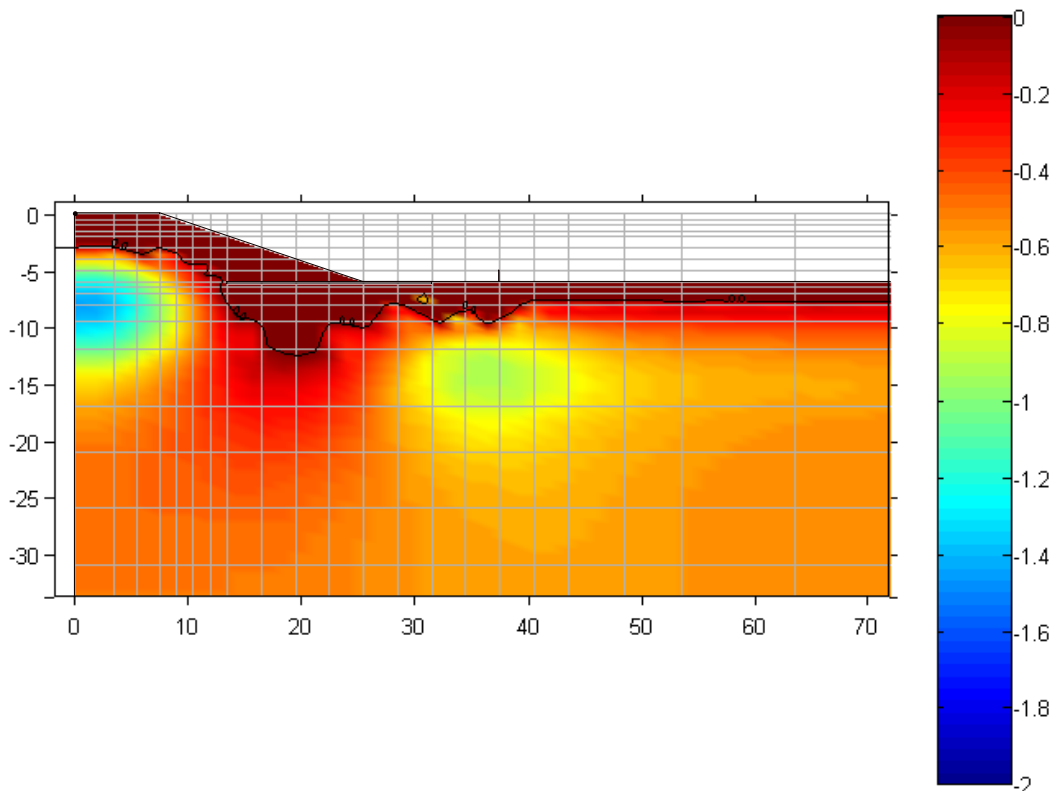


Общество с ограниченной ответственностью  
«ЛАБОРАТОРИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ  
ТЕПЛОФИЗИКИ»  
**ООО «ЦЛИТ»**  
Лаборатория основана в 1934 году



ОКПО 35255374, ОГРН 1147746919429, ИНН 7716782270,  
КПП 771601001, Тел: +79166043750, E-mail: vyachpas@mail.ru

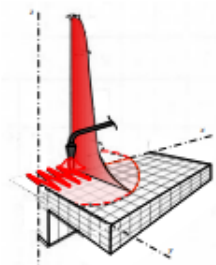
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	
<input type="checkbox"/>	- теплообмен
<input type="checkbox"/>	- фильтрация
<input type="checkbox"/>	- диффузия
<input type="checkbox"/>	- температурные напряжения
ВИДЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	
<input type="checkbox"/>	- научные исследования
<input type="checkbox"/>	- разработка конструкций и технологий
<input type="checkbox"/>	- подготовка научных кадров
<input type="checkbox"/>	- патентное дело



**Пример:**  
МОСТ НА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ РАЗЛИЧНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ (XPS ТЕХНОНИКОЛЬ) В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ РЕГИОНОВ С РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ВЕЧНОМЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ С РАЗРАБОТКОЙ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ЭФФЕКТИВНОМУ ПРИМЕНЕНИЮ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Тема: ЦЛИТ-21-14



Москва 2022

**ООО «ЛАБОРАТОРИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ»**  
**(ООО «ЦЛИТ»)**

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор

В.В. Пассек

2022 г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ**

**«Анализ особенностей работы различных строительных сооружений с использованием теплоизоляции (XPS ТЕХНОНИКОЛЬ) в различных природных условиях регионов с распространением вечномёрзлых грунтов с разработкой предложений по эффективному применению теплоизоляции в строительстве»**

Тема

ЦЛИТ 21-14

Ответственный исполнитель,  
ведущий научный сотрудник  
канд. техн. наук

Г.М. Поз

МОСКВА – 2022

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,  
Генеральный директор ООО «ЦЛИТ»,  
д-р техн. наук, проф.



В.В. Пассек

канд. техн. наук



Е.С. Пшеничникова

Ответственный исполнитель,  
ведущий научный сотрудник  
канд. техн. наук



Г.М. Поз

Ведущий научный сотрудник  
канд. техн. наук



Вяч. В. Пассек

Техник-лаборант



В.В. Гонтарев

К консультациям привлекались:

Канд. техн. наук



В.П. Величко

## РЕФЕРАТ

Отчет на 80 стр., 28 рис., 5 табл.

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ, XPS ТЕХНОНИКОЛЬ, ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА,  
ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ, СТРОИТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ.

Приведён обзор строительных объектов, возводимых на вечной мерзлоте с использованием теплоизоляции (земляное полотно железных и автомобильных дорог, здания, мосты, водопропускные трубы, защитные сооружения и др.).

Дан анализ физической сущности работы теплоизоляции в различных случаях (тепловая амортизация, охлаждение грунтов, замедление или ускорение процесса охлаждения и др.).

Работа выполнена в ООО «ЦЛИТ».

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. ВВЕДЕНИЕ.....	5
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ	
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ НА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ ...	6
2. ДОРОЖНЫЕ НАСЫПИ .....	6
3. ДОРОЖНЫЕ ВЫЕМКИ .....	19
4. ПЛОЩАДКА ПОД СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС .....	23
5. ВОДОПРОПУСКНЫЕ ТРУБЫ .....	27
6. ТЕРМООПОРЫ .....	40
7. ОТДЕЛЬНОЕ ЗДАНИЕ .....	45
8. ЗАЩИТНЫЕ СИСТЕМЫ .....	50
9. БЕТОНИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТОВ, ПЛОЩАДОК .....	63
10. ОПОРЫ ДЛЯ НЕФТЕПРОВОДОВ .....	65
ЧАСТЬ ВТОРАЯ	
ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ, В КОТОРЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ ИГРАЕТ ВЕДУЩУЮ РОЛЬ .....	68
11. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ .....	68
12. ФУНКЦИИ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ В РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ САМОСТОЯТЕЛЬНО .....	70
13. ФУНКЦИИ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ В РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ .....	72
14. ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	79

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Строительство на вечной мерзлоте приводит к нарушению сложившегося в естественных условиях теплового баланса и, как следствие, и к протаиванию мерзлоты и к деформациям, иногда аварийным.

Для предотвращения отрицательного влияния в результате строительства и для обеспечения безопасности самого строительства применяется целый комплекс конструктивно-технологических мероприятий, который требует своего постепенного развития.

Одной из главных составляющих указанных конструктивно-технологических мероприятий является теплоизоляция. Целью данной работы является выявление путей совершенствования мероприятий с применением теплоизоляции.

Для достижения поставленной цели проведено два этапа работы. На первом этапе сделан обзор строительных объектов, возводимых на вечной мерзлоте с использованием теплоизоляции - пенополистирольных плит XPS ТЕХНОНИКОЛЬ (земляное полотно железных и автомобильных дорог, здания, мосты, водопропускные трубы, защитные сооружения и др.). На втором этапе дан анализ физической сущности работы теплоизоляции в различных случаях (тепловая амортизация, охлаждение грунтов, замедление или ускорение процесса охлаждения и др.).

Обобщения сделаны на основе более 85-летнего опыта Лаборатории. Для выявления сущности теплоизоляции проведено несколько серий расчетов.

В Заключение обобщены результаты проведенной работы и сформулированы предложения по дальнейшей работе.

Результаты исследований показали, что совместное использование теплоизоляции с другими мероприятиями, направленными на формирование требуемого мерзлотного режима, приносят больший эффект, чем применение этих мероприятий по отдельности.

Предлагаемые конструктивные решения строительных объектов позволят расширить область применения теплоизоляции XPS ТЕХНОНИКОЛЬ.

Приведённые в настоящей работе конструктивные решения железнодорожных насыпей и выемок применимы и при строительстве автомобильных дорог.

# **ЧАСТЬ ПЕРВАЯ**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ НА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ**

### **2. ДОРОЖНЫЕ НАСЫПИ**

#### **2.1. Насыпи большой высоты**

Температурный режим насыпи зависит от местных природных условий, и в каждом регионе применяются разные меры по стабилизации этого режима. Рассмотрим пример насыпи высотой 6,0 м, расположенной в районе г. Салехарда на Севере Западной Сибири (рис. 2.1). В связи с тепловой симметрией рассматриваем половину поперечного сечения.

Особенностью рассматриваемого региона являются сильный снегоперенос, в результате чего с основной площадки насыпи снег сдувается, а на откосах и в прилегающей к подошве откоса территории скапливается снег с откосом верхней поверхности снежных отложений 1:5. Такое распределение снежных отложений приводит к тому, что основная площадка насыпи (АБ на рис. 2.1) становится охлаждающей зоной, а откосы (зона БГ на рис. 2.1) и прилегающая территория (зона ГЕ на рис. 2.1) становятся растепляющими, поскольку зимой снег препятствует поступлению холода в грунт, в то время как летом снега нет, и тепло свободно поступает в грунт.

Для снижения утепляющего влияния зон БГ и ГЕ применяется, казалось бы, противоположное по здравому смыслу мероприятие: утепленную зону не ослабляем, а усиливаем термическое сопротивление – укладываем слой теплоизоляции. Другими словами, теплоизоляция становится охлаждающим мероприятием. Сущность заключается в том, что соотношение зимнего и летнего термических сопротивлений на поверхности уменьшается: зимой теплоизоляция немного увеличивает термическое сопротивление, что незначительно сказывается на теплообмене, а летом

увеличение сопротивления весьма значительное. Охлаждающий эффект получается в целом за год.

Для иллюстрации сказанного на рис. 2.2,а, и 2.2,б приведено два температурных поля в установившемся режиме на момент окончания теплого периода года. Первое температурное поле соответствует варианту без применения всяких мероприятий. Мы видим, что протаивание весьма существенные. Применение теплоизоляции (10 см пенополистирола) существенно снижает протаивание. Достичь требуемого эффекта можно увеличением теплоизоляции, а можно применить другое мероприятие - отсыпать дополнительные площадки в зоны БВ и ДЕ. Результаты расчетов приведены на рис. 2.2,в. На практике сочетание различных мероприятий зачастую дает больший эффект, чем усиление одного мероприятия. Результаты рис. 2.2 повторены на рис. 2.3 в цветном изображении.

Исходные данные для проведенных расчетов приведены в табл. 2.1 и 2.2, а характеристики трех вариантов - в табл. 2.3.



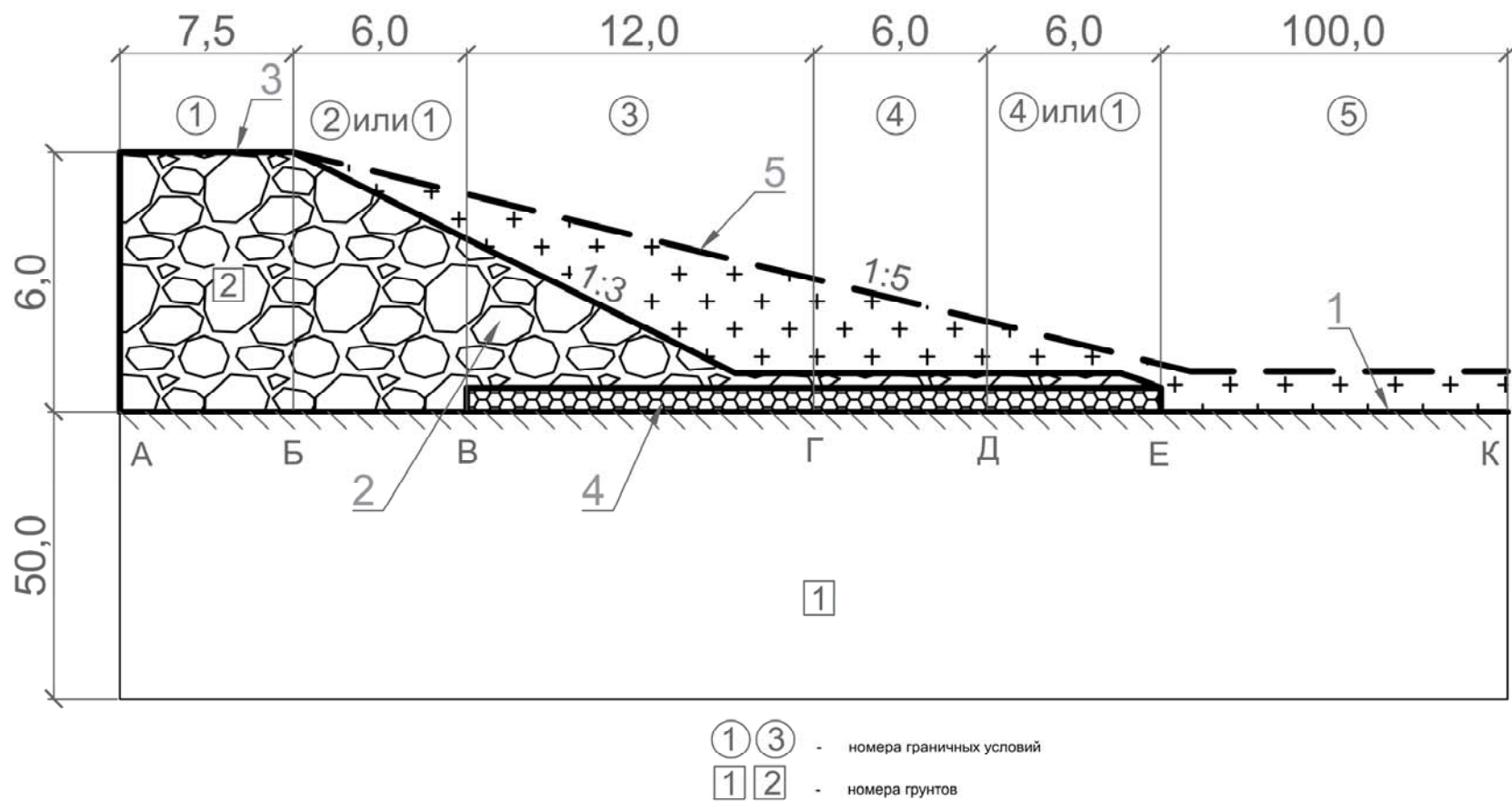


Рисунок 2.1 - Схема насыпи: 1- естественная поверхность грунта; 2 – тело насыпи; 3- основная площадка насыпи; 4- теплоизоляция; 5 – поверхность снежных отложений

Таблица 2.1 - Приведенные температуры воздуха (град) и коэффициенты теплопередачи А ( ккал/(м<sup>2</sup>·час·град))

		месяцы года											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	t	-23,6	-22,2	-18,3	-6,4	+1,4	+10,8	+18,8	+14,6	8,4	-3,7	-15,3	-21,2
2	A <sub>1</sub> (зона1)	1,94	1,83	1,94	1,94	3,38	20,0	20,0	20,0	20,0	7,41	2,97	2,37
3	A <sub>2</sub> (зона2)	0,67	0,64	0,66	0,72	1,23	20,0	20,0	20,0	20,0	3,27	1,12	0,86
4	A <sub>3</sub> (зона3)	0,17	0,17	0,17	0,19	0,29	1,18	20,0	20,0	20,0	1,07	0,39	0,23
5	A <sub>4</sub> (зона4)	0,19	0,18	0,18	0,20	0,33	2,12	2,0	2,0	2,0	1,07	0,42	0,24
6	A <sub>5</sub> (зона5)	0,55	0,63	0,92	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,2	0,8	0,65	0,56

Таблица 2.2 - Теплофизические характеристики материалов

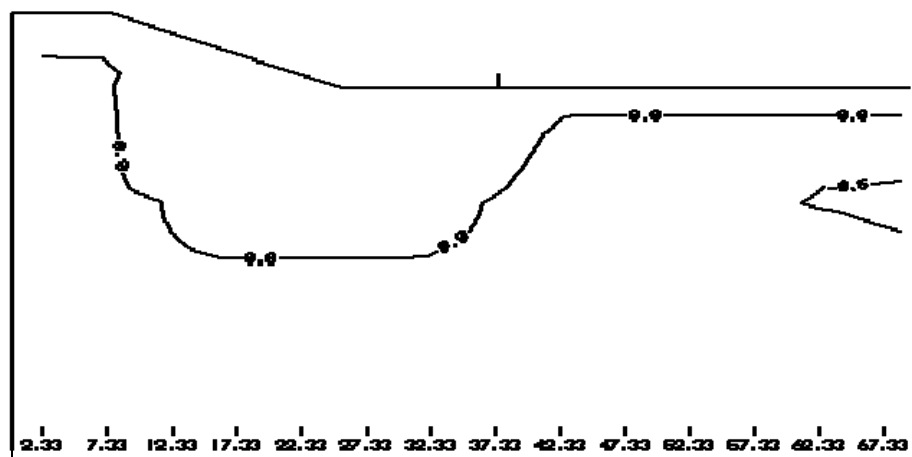
№№ материалов	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м · час · град)		Объемная теплоемкость, ккал/(м³ град)		Скрытые теплоты, ккал/м³
	$\lambda_t$	$\lambda_m$	$C_t$	$C_m$	Q
Грунт №1	1,6	1,9	650	500	20000
Грунт №2	1,6	1,9	650	500	10000
Теплоизоляция	0,05*	0,05*	10	10	0

\*Примечание: коэффициент теплопроводности принят с запасом. Нормативное значение коэффициента теплопроводности пенополистирола XPS ТЕХНОНИКОЛЬ 0.03 ккал/(м · час · град)

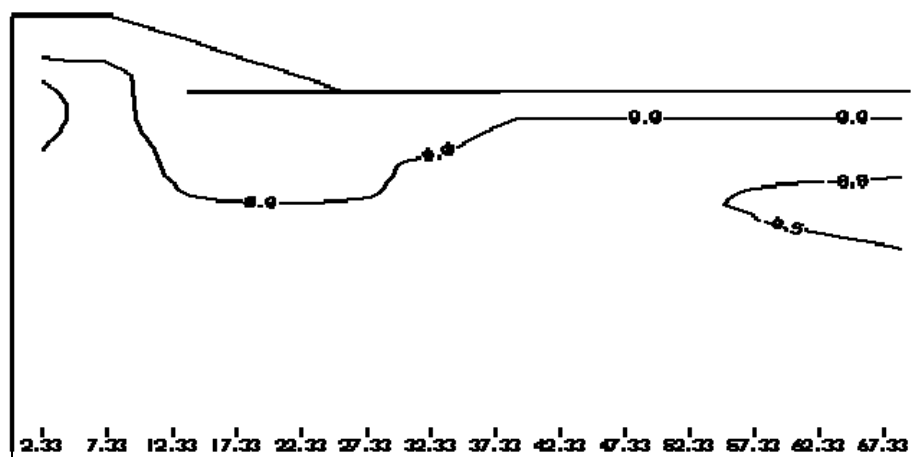
Таблица 2.3 - Характеристика вариантов расчета

№№ вар.	Номера граничных условий на длине зон (см. рис. 2.1)						наличие теплоизоляции на длине зон		
	АБ	БВ	ВГ	ГД	ДЕ	ЕК	ВГ	ГД	ДЕ
1	1	2	3	4	4	5	-	-	-
2	1	2	3	4	4	5	+	+	+
3	1	1	3	4	1	5	+	+	-

а)



б)



в)

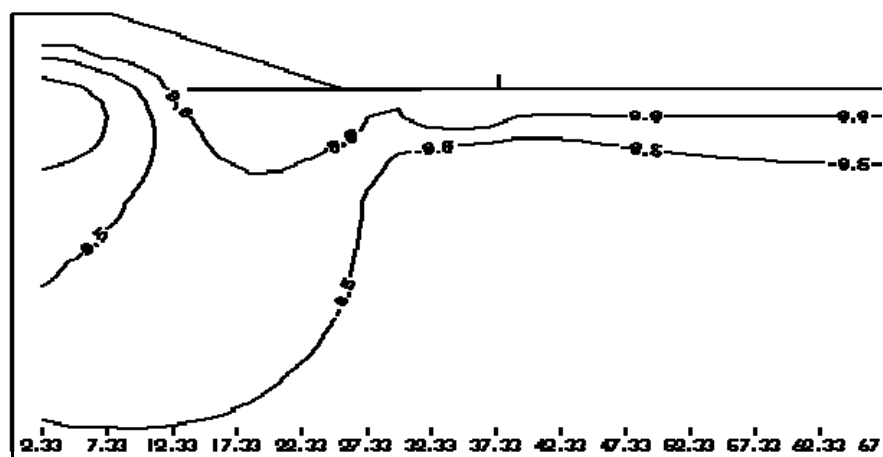


Рисунок 2.2 - Температурное поле в грунтах тела и основания насыпи на момент на момент окончания тёплого периода года в установившемся режиме: а – вариант 1 (без применения мероприятий по охлаждению), б – вариант 2 (применение XPS ТЕХНОНИКОЛЬ), в – вариант 3 (применение XPS ТЕХНОНИКОЛЬ и двух охлаждающих площадок)

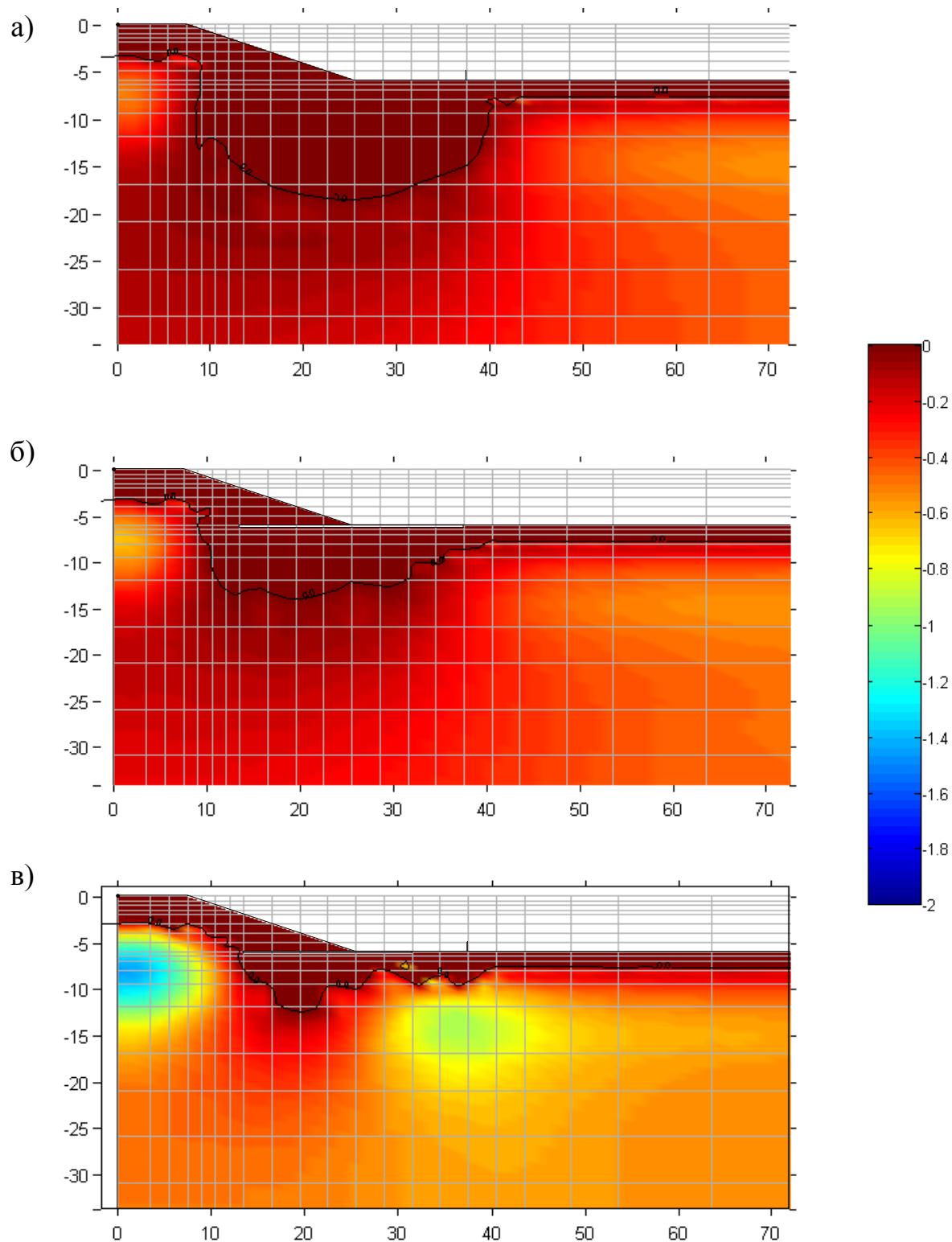


Рисунок 2.3 - Температурное поле в грунтах тела и основания насыпи на момент на момент окончания тёплого периода года в установившемся режиме: а – вариант 1 (без применения мероприятий по охлаждению), б – вариант 2 (применение XPS ТЕХНОНИКОЛЬ), в – вариант 3 (применение XPS ТЕХНОНИКОЛЬ и двух охлаждающих площадок)

## 2.2. Насыпь нулевой или малой высоты

Дорожная насыпь на вечномёрзлых грунтах предлагаемой конструкции содержит тело 1 насыпи, отсыпанной на естественную поверхность 2 основания, балластную призму 3, размещенную в пределах основной площадки 4 насыпи, боковые вспомогательные массивы 5, примыкающие по бокам к балластной призме 3, размещенные в пределах основной площадки 4 насыпи, ее откосов 6 и естественной поверхности 2 у подошвы откосов 6, и теплоизоляцию 7, размещенную непосредственно под балластным слоем 3 и боковыми вспомогательными массивами 5. Теплоизоляция 7 выполнена, например, из XPS ТЕХНОНИКОЛЬ. Термическое сопротивление теплоизоляции  $R_t$ , а следовательно, и толщина XPS ТЕХНОНИКОЛЬ определяются теплофизическим расчетом. Слой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ размещен на выравнивающем слое 8 из песка. В случае, когда высота тела насыпи  $h_n$  более 0,5 м, для обеспечения отвода дождевых вод между теплоизоляцией 7 и балластной призмой 3 размещен слой геотекстиля 9. Фильтрующая прослойка 9 из геотекстиля укладывается с уклоном 0,02% в обе стороны от оси насыпи с выпуском на поверхность откоса порядка 0,2 м (рис. 2.4,д). Если высота тела насыпи  $h_n$  стремится к нулю, то в случае применения для боковых вспомогательных массивов 5 местного недренирующего грунта в теле этих массивов устраивают дренирующие прорезы 10 шириной  $b_{пр}$  на расстоянии  $b_{др}$  друг от друга. Из опыта работы подобных дренажных устройств величины  $b_{пр}$  и  $b_{др}$  должны быть соответственно 0,5 м и 5-15 м. При этом дренирующая прорезь и балластная призма должны содержать обойму 11 из геотекстиля.

Главное назначение боковых вспомогательных массивов грунта - защита теплоизолирующего слоя от повреждений. Кроме того, вспомогательное покрытие позволяет уменьшить необходимую толщину теплоизоляции. Вспомогательный массив 5 может отсыпаться талым,

сухомерзлым дренирующим или твердомерзлым недренирующим грунтом.

Ширина боковых вспомогательных массивов  $b_6$  должна быть не менее 2,0 м из условий недопущения резкого понижения нулевой изотермы по бокам балластной призмы на момент окончания теплого периода года. В результате величина  $b_6$  определяется из условий:

$$b_6 \geq \begin{cases} b_{\text{расч}} \\ 2,0 \text{ м, при } h_n \rightarrow 0 \\ b_n + b_{\text{отк}} + b_r, \text{ при } h_n > 0 \end{cases}$$

где  $b_{\text{расч}}$  - ширина бокового вспомогательного массива грунта, определяемая теплофизическим расчетом из условий обеспечения требуемой температуры грунта под телом балластной призмы, м;

$h_n$  - высота насыпи, м;

$b_n$  - расстояние между бровками откоса балластной призмы и бровкой основной площадки насыпи, м;

$b_{\text{отк}}$  - длина откоса насыпи, м;

$b_r$  - длина горизонтального участка вспомогательного массива грунта у подошвы откоса насыпи, м.

Высота  $h_6$  бокового вспомогательного массива 5 должна быть не менее 0,3 м из условий применения средств уплотнения грунта.

Для обеспечения более низких температур под внешними сторонами боковых вспомогательных массивов 5 в теплоизоляции 7 могут быть устроены разрывы 12, ширина которых  $b_p$  может колебаться от 0,3 до 3,0 м. По условиям обеспечения устойчивости пути расстояние от оси насыпи до края разрыва должно быть не менее половины ширины подошвы насыпи или менее 4,0 м. Положение нулевой изотермы (верхней границы вечной мерзлоты) на момент окончания теплого периода в естественных условиях после постройки насыпи при сплошной теплоизоляции и после



постройки насыпи при наличии разрывов в теплоизоляции показано соответственно позициями 13, 14, 15. При сплошной теплоизоляции нулевая изотерма 14 под краем бокового вспомогательного массива 5 уходит вниз (рис. 2.4,а), что может привести к нежелательным осадкам массива 5. В случае разрыва в теплоизоляции (рис. 2.4,в) нулевая изотерма 15 под краем массива 5 существенно поднимается вверх, однако под разрывом имеет место сезонное протаивание. Чтобы избежать продольной фильтрации дождевых вод под разрывом, по длине разрывов 12 устроены перемычки 16, на протяжении которых теплоизоляция выполнена непрерывной. Длина перемычки  $l_n=2-3$  м.

Насыпь сооружают в зимний период. Тело 1 насыпи отсыпают из твердомерзлого местного грунта, далее на выравнивающий слой 8, состоящий из сухомерзлого грунта, укладывают теплоизоляцию 7. Из сухомерзлого грунта отсыпают балластную призму 3. Боковые вспомогательные массивы могут быть выполнены из твердомерзлого местного грунта.

В тепловом отношении насыпь работает следующим образом. В зимний период в условиях Заполярья, где имеет место сильный снегоперенос, с верхней поверхности балластной призмы и боковых вспомогательных массивов снег сдувается, что способствует активному поступлению холода в грунты основания. Хотя в летний период поверхность также оголена, что способствует соответственно поступлению в грунт тепла, суммарный за год тепловой баланс обеспечивает формирование отрицательных температур в грунтах оснований. Температурный режим грунтов оснований зависит от среднегодовой температуры воздуха, мощности теплоизоляции, ширины боковых вспомогательных массивов, степени потепления климата и др., поэтому он определяется теплофизическим расчетом.

При разработке данного технического решения было решено два технических противоречия.

Противоречие первое. Поскольку основным требованием разрабатываемого технического решения была недопустимость осадок насыпи при наличии просадочных грунтов оснований, естественным решением было применение теплоизоляции под балластной призмой. Применение теплоизоляции позволяет снизить глубину сезонного протаивания вплоть до ее полной ликвидации непосредственно под XPS ТЕХНОНИКОЛЬ. Однако при применении XPS ТЕХНОНИКОЛЬ в случае потепления климата происходит растепление грунтов оснований, и в случае наличия XPS ТЕХНОНИКОЛЬ под балластной призмой увеличиваются боковые тепловые потоки на глубине в сторону оси насыпи, что, в свою очередь, способствует растеплению грунтов. Улучшение температурного режима может быть достигнуто уширением зоны теплоизоляции. Однако в этом случае она должна быть заглублена в грунт, чтобы иметь защитный слой. При заглублении теплоизоляции на поверхности будет откладываться слой снега, что ухудшит температурный режим. Таким образом, с одной стороны, необходимо уширение и углубление теплоизоляции, с другой, углубление не нужно.

Противоречие решено введением бокового вспомогательного массива.

Противоречие второе. При применении теплоизоляции под боковым вспомогательным массивом на его внешнем краю нулевая изотерма в конце теплого периода резко уходит вниз, что может привести к нежелательным деформациям. Дальнейшее уширение бокового вспомогательного массива не приводит к результатам. Выход из противоречия был найден устройством “разрыва” в теплоизоляции, через который подкачивается холод через оголенную зимой поверхность бокового вспомогательного массива.

Эффективность применения предлагаемой конструкции достигается при следующих условиях:

- сильный снегоперенос;
- нулевая или малая высота насыпи (не превышающая глубины сезонного протаивания);



### 3. ДОРОЖНЫЕ ВЫЕМКИ

Выемка в зоне вечной мерзлоты – сложное инженерное сооружение.

Выемка дороги на вечномёрзлых грунтах содержит слой непучинистого грунта 1, заменяющего естественный высокольдистый, и расположенную на этом слое конструкцию проезжей части для автодорожного или железнодорожного проезда, выполненную, например, в виде балластной призмы 2 с рельсошпальной решеткой. Выемка содержит боковой охлаждающий массив 3, вплотную примыкающий к выемке с учетом соблюдения действующих габаритов приближения строений. Боковой охлаждающий массив 3 представляет собой массив замененного естественного высокольдистого грунта грунтом, маловлажным. Ширину  $b_n$  бокового охлаждающего массива назначают не менее глубины сезонного протаивания в маловлажных замененных грунтах. Это необходимо, чтобы высокольдистые грунты всегда оставались в мерзлом состоянии, за исключением зоны протаивания сверху. Верхняя поверхность бокового охлаждающего массива соответствует уровню низа заменённого под проездом грунта 1. Боковой охлаждающий массив 3 содержит один или несколько охлаждающих участков 4. Несколько охлаждающих участков 4 будет в случае ступенчатой боковой поверхности. Сущность охлаждающего участка заключается в том, что он выполнен с крутым уклоном « $i$ », при котором в зимний период на этих участках отложения снега резко снижаются. Уклон « $i$ » - это отношение вертикальной проекции участка к горизонтальной. Уклон « $i$ » оптимален как 1:0, что соответствует вертикальной поверхности. Однако это необязательно. Отложения снега резко снижаются при более пологих откосах. Например, при уклоне 1:0, 75 отложения снега составляют 60% от величины этих отложений для горизонтальной поверхности. Поэтому уклон « $i$ » будет определяться конструктивными возможностями и экономическими соображениями. Например, крутая поверхность может быть обеспечена укладкой габионов 5

или устройством подпорной стенки, или укладкой с крутым уклоном скального грунта с крупными фракциями.

Расстояние между массивами 3 на обеих сторонах выемки должно стремиться к минимуму, который определяется существующими параметрами габионов. Для отвода вдоль выемки поверхностных вод целесообразно устройство кювета 6. Для уменьшения высоты массива 1 замененного грунта, а также для улучшения температурного режима подстилающих грунтов, а также для улучшения температурного режима подстилающих грунтов в пределах массивов 1 и 3 устраивают слой теплоизоляции 7. В массив 3 этот слой заводят в зону мерзлого грунта (примерно на расстояние « $b_n / 2$ »). Теплоизоляция 7 укладывают ниже дна кювета 6. При этом положение нулевой изотермы на момент окончания теплого периода показано позицией 8. Чтобы грунтовые воды в пределах деятельного слоя грунта (возможное движение грунтовых вод показано стрелкой 9) не подступали в выемку, целесообразно уложить слой теплоизоляции 10, «подтягивающий» к поверхности нулевую изотерму 8 и не пропускающий грунтовые воды по направлению 9.

Важным назначением теплоизоляции 10, уложенной с перекрытием границы 11 массива 3 и естественного высокольдистого грунта является резкое снижение разности сезонного протаивания обоих грунтов и, как следствие, ликвидация опасности разрушения указанной зоны. Граница 11 по высоте может быть выполнена ступенчатой.

Предполагаемая конструкция выемки позволяет не только обеспечить благоприятное положение нулевой изотермы 8, но и сформировать под выемкой ядро из твердомерзлого ядра, границы которого обозначены позицией 12.

Выемка дороги на вечномерзлых грунтах работает следующим образом.

В связи с тем, что в зимний период поверхности 4 оголены от снега, через эти поверхности без сопротивления проходят тепловые потоки как в теплых, так и в холодный периоды года. Однако в связи тем, что среднегодовая температура воздуха отрицательная, суммарный тепловой баланс отрицателен. В результате формируется ядро твердомерзлого грунта с низкой температурой. Например, расчеты показали, что для участков, где в естественных условиях в грунтах формируется температура примерно  $-1^{\circ}\text{C}$  (Центральная часть Якутии), причем обычная выемка дает дополнительное повышение температуры, применение выемки предложенной конструкции позволяет понизить температуру до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Это очень важно для высокольдистых грунтов оснований и оснований с наличием погребенных льдов. Резкие повышения среднегодовых температур воздуха в течение 2-3 лет (что периодически имеет место) или глобальное потепление климата может существенно повысить температуру грунта, что приведет к просадкам, иногда – к аварийным.

Таким образом, эффективность предложенной конструкции определяется возможностью обеспечить требуемую несущую способность грунтов в экстремально сложных мерзлотно-грунтовых и климатических условиях, вплоть до глобального потепления климата.

Область эффективного использования данного технического решения – регионы с малым снегопереносом (до  $200 \text{ м}^3/\text{м}$ ).

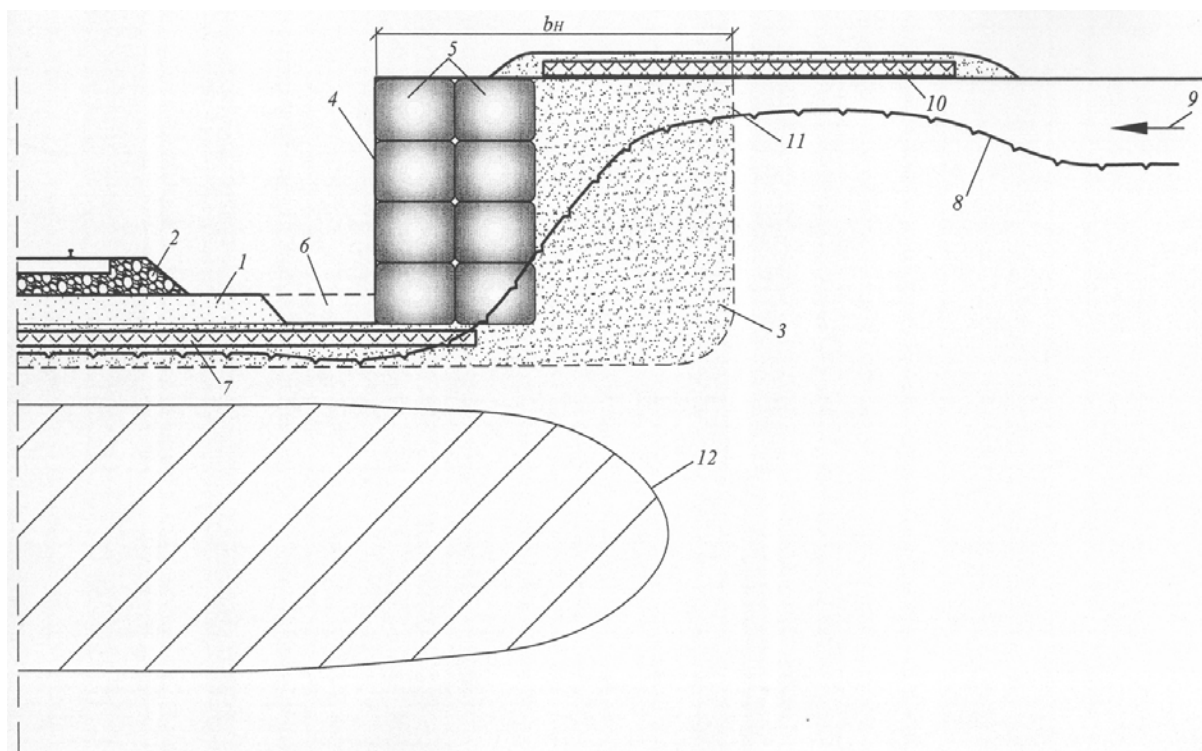


Рисунок 3.1 - Поперечное сечение железнодорожной выемки

#### 4. ПЛОЩАДКА ПОД СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Площадка под строительный комплекс на вечной мерзлоте содержит насыпной планировочный слой 1 грунта, расположенный непосредственно на естественной поверхности 2 грунта. Насыпной планировочный слой 1 грунта состоит из двух ярусов: охлаждающего яруса 3 и защитного яруса 4. Охлаждающий ярус 3 расположен непосредственно на поверхности 2 грунта и содержит охлаждающую систему в виде пустотелых горизонтальных труб 5 и вертикальных пустотелых труб 6, низ которых примыкает сверху к горизонтальным трубам 5 и полость которых соединена с полостью горизонтальных труб, при этом их верхний торец имеет заглушку (крышку) 7. Вертикальная труба 6 пересекает защитный слой 4 и граничит с наружным воздухом.

Защитный ярус 4 содержит слой теплоизоляции 8, расположенный непосредственно на охлаждающем ярусе 3 и закрытый сверху слоем 9 грунта. Для обеспечения охлаждения грунта площадь  $S_n$  поверхности охлаждения вертикальной трубы должна быть не менее  $0,1S_v$ , где  $S_v$  - площадь поверхности пустотелой горизонтальной трубы, сообщающаяся с одной вертикальной трубой 6. Поскольку горизонтальная труба 5 является сквозной, для выделения отдельных участков  $S_v$  предусмотрены лёгкие шторы 10. Трубы 5 могут быть использованы для пропуска различных трубопроводов 11 (теплотрасс, водопроводов, канализаций и т.п.). Эффективность охлаждения может быть существенно увеличена, если предусмотреть коаксиальную вставку 12, которая обеспечивает разделение восходящих и нисходящих потоков 13 воздуха.

На площадке под строительный комплекс на вечной мерзлоте могут быть размещены различные объекты: здание 14, площадки озеленения 15, дороги и т.п. Площадка ограничена боковыми гранями 16, которые могут быть устроены с естественным откосом грунта, а могут быть устроены ограждения. Вертикальные выступающие над уровнем площадки части труб 6, являющиеся теплообменниками, могут быть заменены



горизонтальными теплообменниками. верх которых расположен в уровне с грунтом.

Для описания работы устройства необходимы также следующие обозначения:

17 - грунт основания;

18 - участок эпюры температур ниже теплоизоляции 8;

19 - дополнительная теплоизоляция под зданием;

20 - участок эпюры температур выше теплоизоляции 8.

Площадка под строительный комплекс на вечной мерзлоте работает следующим образом.

В зимний период охлаждающий ярус 3 за счёт работы охлаждающей системы, состоящей из труб 5 и 6, производит подпитку холода в грунт основания 17. В летний период охлаждающая система перестаёт работать, однако, защитный ярус 4 не даёт этому холоду выйти в пространство. В результате происходит постепенное понижение мерзлоты до определённого предела, который гарантирует стабильность сооружений, расположенных на площадке. Процесс регулирования температурного режима оснований становится управляемым. В обычных условиях температурный режим неуправляем: может быть прорыв теплотрасс, сильные снежные заносы и т.п. При данном техническом решении теплотрассы помещаются в трубы 5 и контролируются, влияние снежных заносов «отсекается» защитным ярусом. Площадка под строительный комплекс становится отдельным самостоятельным объектом при эксплуатации. Она становится гарантом стабильности всех сооружений, которые на ней расположены.

На рис. 4.1, в представлено распределение температуры грунта в теле и основании площадки на момент окончания тёплого периода года. На нижней поверхности теплоизоляции 8 температура равна или близка к нулю (в т. N). Ниже (на участке 18) температура отрицательная, достигает на глубине 10-20 м своего максимального  $t_0$  значения (по абсолютной

величине). За пределами границы 16 площадки температура грунта постепенно приближается к той, которая устанавливается в естественных условиях. При проектировании здания 14 учитывается гарантированная фоновая температура  $t_0$ , работа защитного яруса 4 и здание может быть осуществлено, например, без свай с применением дополнительной теплоизоляции 19.

Следует отметить ещё один очень важный эффект, формирующийся при применении данного технического решения. На вечной мерзлоте деятельный слой протаивает в летний период медленно, грунт холодный, поэтому посадка растений (огородных или декоративных культур) даёт мало эффекта. При данном техническом решении теплоизоляция отсекает потоки холода снизу, поэтому грунт 9 может быстрее разогреваться в летний период и эпюра температур имеет вид 20.

Следует отметить, что диаметр горизонтальных труб должен быть большим, не менее 2,0 м, чтобы была возможность по ним проходить и контролировать состояние. Расчёты показали, что при расположении труб на расстоянии  $b$  друг от друга, равном 10,0 м, температура грунта на глубине нулевых амплитуд устанавливается в условиях г. Салехард порядка минус  $4,5^{\circ}\text{C}$ , а при расстоянии 20,0 м - минус  $3,5^{\circ}\text{C}$ , что обеспечивает достаточно благоприятные условия для возведения фундаментов зданий.

При этом температура грунта слоя 9 примерно на 30% выше, чем талого или слоя без площадки.

Таким образом, в данном техническом решении теплоизоляция играет одну из главных ролей.

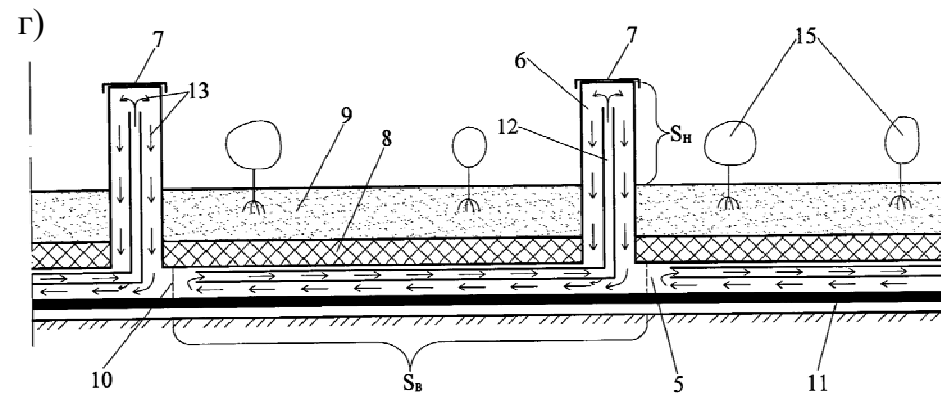
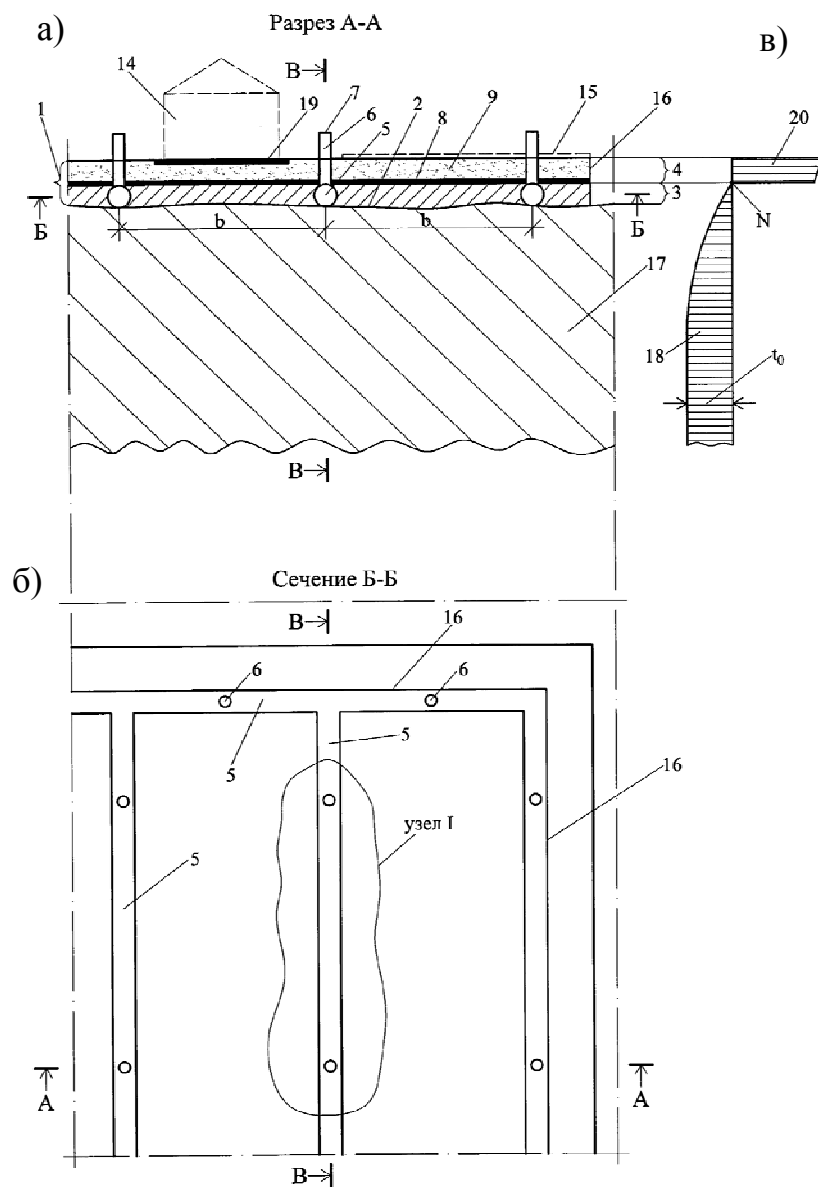


Рисунок 4.1. Схема площадки под строительный комплекс:  
а – разрез А-А на рис. 4.1,б; б – сечение Б-Б на рис. 4.1,а; в –  
распределение температуры грунта в теле и основании площадки  
на момент окончания тёплого периода года, г – сечение В-В на  
рис. 4.1,а,б;

## 5. ВОДОПРОПУСКНЫЕ ТРУБЫ

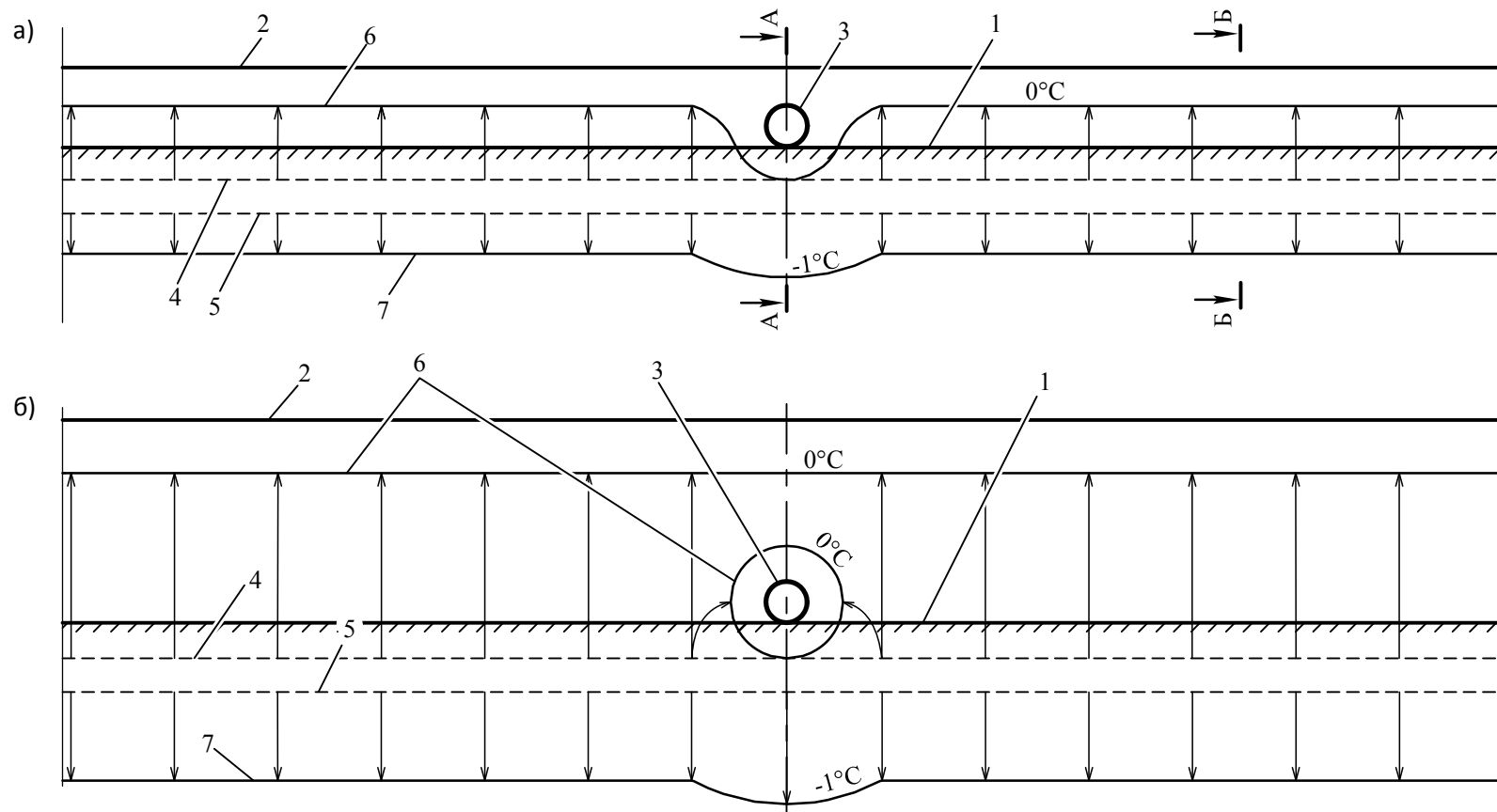
### **5.1. Принципиальная схема теплового и силового взаимодействия высокой насыпи и водопропускной трубы**

В зоне водопропускной трубы и в зоне насыпи, расположенной в отдалении от трубы, температурные поля на момент окончания теплого периода года, т. е. на расчетный момент времени, в общем случае разные.

В зоне, отдаленной от трубы, толщина талого слоя под основной площадкой насыпи определяется глубиной сезонного протаивания грунта. В зоне водопропускной трубы растепление в летний период идет кроме того со стороны полости трубы как вверх, так и вниз. Поэтому толщина талого грунта по продольному вертикальному сечению трубы в три – четыре раза (с учетом высоты сечения самой трубы) превышает толщину талого грунта под основной площадкой в насыпи, расположенной в отдалении от трубы. При малой высоте насыпи талые слои в зоне трубы сливаются по высоте (рис. 5.1,а), при этом в зоне трубы образуется своеобразная траншея из талого грунта. Глубина этой траншеи может быть разной, а при высокой насыпи над трубой может остаться мерзлая зона (рис. 5.1,б), которая формирует своеобразное перекрытие. При этом нагрузка с основной площадки будет по разному передаваться на грунт насыпи и на трубу.

Мерзлые стенки траншеи из талого грунта стесняют деформации талой зоны вокруг трубы как в вертикальном направлении, так и в направлении продольной оси трубы. Перекрытие из мерзлого грунта в значительной степени воспринимает на себя вертикальную нагрузку в зоне трубы и передает ее на смежные участки насыпи.

Характерные температурные поля (их принципиальная схема) для одной из насыпей на момент окончания теплого периода года в сечениях, перпендику-



1 – естественная поверхность грунта; 2 – основная площадка насыпи; 3 – водопропускная труба; 4,5 – положение соответственно изотерм  $0^{\circ}\text{C}$  и  $-1^{\circ}\text{C}$  до постройки дороги; 6, 7 – то же, после постройки

Рисунок 5.1 - Температурное поле в грунтах оснований и тела насыпи в плоскости, проходящей через продольную ось насыпи: а, б - соответственно при насыпи малой и большой высоты

лярных продольной оси насыпи, представлены на рис. 5.2. На рис. 5.2,а приведено температурное поле по продольной оси трубы, а на рис. 5.2,б – в смежной с трубой части насыпи. Центр тяжести теплового импульса расположен примерно в зоне подошвы откоса насыпи. Тепловой (растепляющий) импульс формируется за счет повышенных снежных отложений, нарушенного растительного покрова, обводнения и др. Этот импульс «подсекает» сбоку грунты, расположенные под подошвой насыпи и растепляет их. Для дальнейших рассуждений с достаточной для практики точностью можно сформулировать следующее: грунты с температурой выше  $0^{\circ}\text{C}$  находятся в талом состоянии, грунты с температурой от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-1,0^{\circ}\text{C}$  находятся в пластичномерзлом состоянии, грунты с температурой ниже  $-1,0^{\circ}\text{C}$  – в твердомерзлом состоянии. Фактически картина более сложная, но для проведения рассуждений такая интерпретация достаточно правильная для случая незасоленных грунтов. На п-ве Ямал на значительной части территории залегают засоленные грунты, температура замерзания которых ниже, чем у незасоленных. Однако, как правило, они залегают на глубине ниже 8 – 10 м от дневной поверхности.

На рис. 5.2 позицией 10 показана верхняя граница засоленных грунтов (ее возможное положение). Наихудшие условия для напряженно-деформированного состояния трубы и близлежащих участков насыпи формируются тогда, когда слой «h» незасоленных грунтов не превышает глубины, на которой расположена изотерма  $-1^{\circ}\text{C}$ , как это имеет место на рис. 5.2,а. Дело в том, что засоленные грунты при этом могут переходить из твердомерзлого в пластичномерзлое и даже талое состояние.

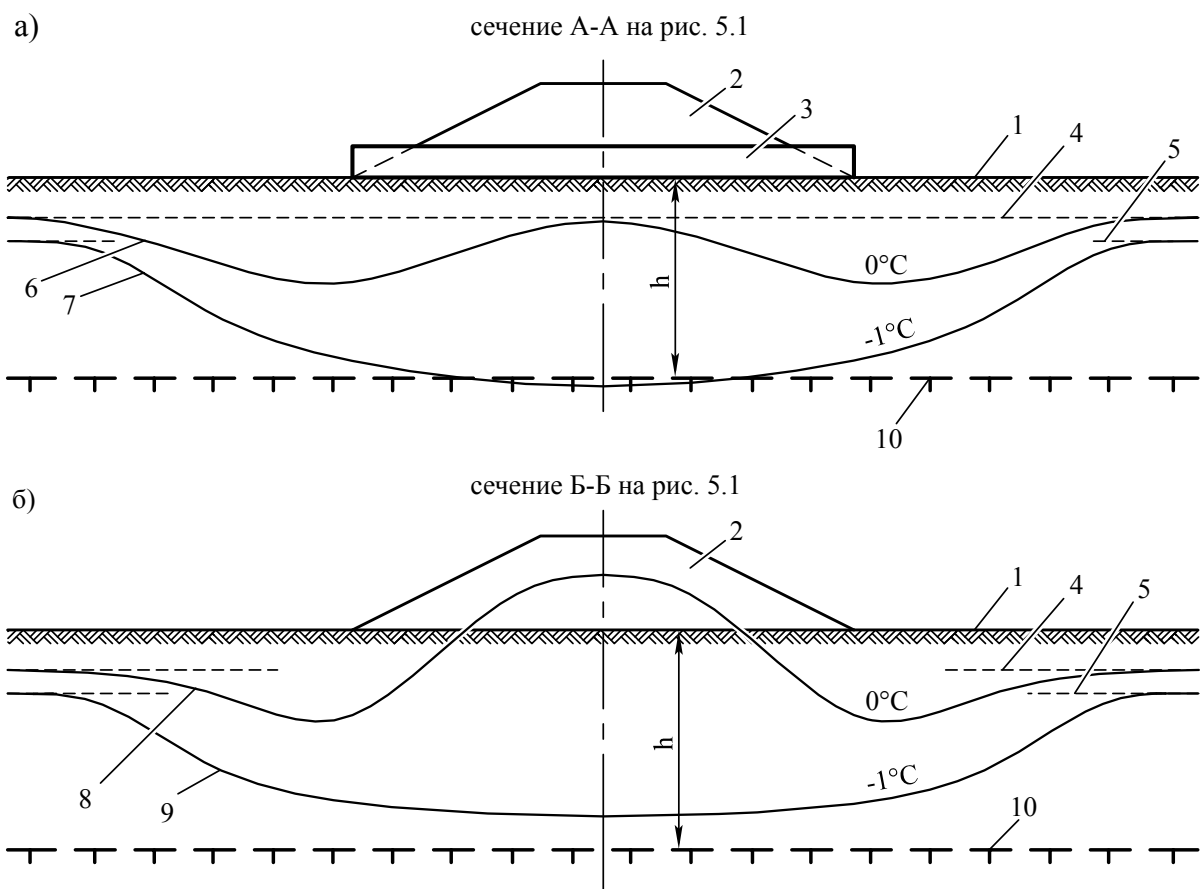


Рисунок 5.2 - Температурное поле в грунтах оснований и тела насыпи в зоне трубы (а) и в зоне насыпи смежной с трубой (б)

## **5.2. Изменение характера мерзлого состояния грунтов в зоне водопропускной трубы от высоты насыпи и различных конструктивно-технологических мероприятий**

Для проведения исследований была проведена серия расчетов температурного режима грунтов в зоне водопропускной трубы для различных высот насыпи [21]. Расчеты проведены по программам, разработанным в лаборатории инженерной теплофизики ОАО ЦНИИС [53, 54] для моделирования на ЭВМ температурного режима. Расчеты проводились в трехмерной постановке. Расчетная схема приведена на рис. 5.3.

Результаты расчетов приведены на рис.5.4 и 5.5. На рис. 5.4 приведены температурные поля на момент окончания теплого периода года по продольной оси насыпи для различных высот: 3 м, 6 м, 8 м и 12 м. Все 4 варианта рассчитаны для одних и тех же климатических и мерзлотно-грунтовых условий. На рис. 5.5 приведены аналогичные температурные поля по продольной оси трубы.

Анализ результатов расчетов показывает следующее.

На рис. 5.4 и 5.5 для наглядности зона талого грунта обозначена коричневым цветом, зона пластичномерзлого – желтым, зона твердомерзлого – синим (пояснения см. в п. 5.1).

Анализ характера температурных полей в зависимости от высоты насыпи показывает, что мерзлотное состояние существенно меняется как в пределах самой насыпи, так и в подстилающих грунтах. Посмотрим это в отдельности.

При насыпи высотой до 3 м серьезных нарушений температуры грунтов оснований не происходит. Но по мере увеличения высоты насыпи резко ухудшается температурное состояние грунтов. За счет подсекающего теплового эффекта с боковых сторон насыпи температура грунтов оснований резко повышается, а зона растепленных грунтов растет. Если еще учесть возможную засоленность нижележащих грунтов, то все это резко увеличивает деформативность грунтов. В результате водопропускная труба находится в большой толще сильнодеформируемых грунтов, что неизбежно



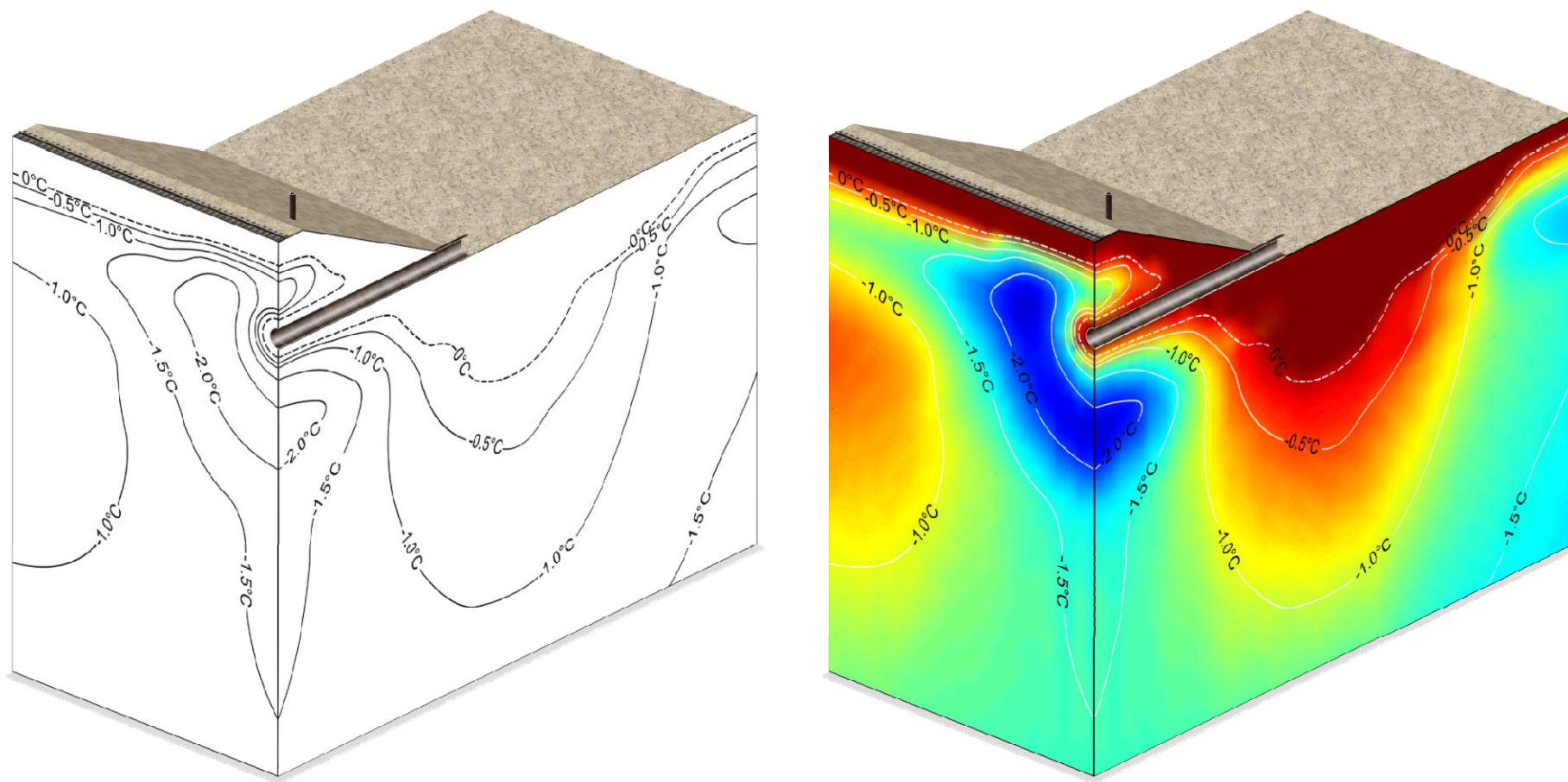
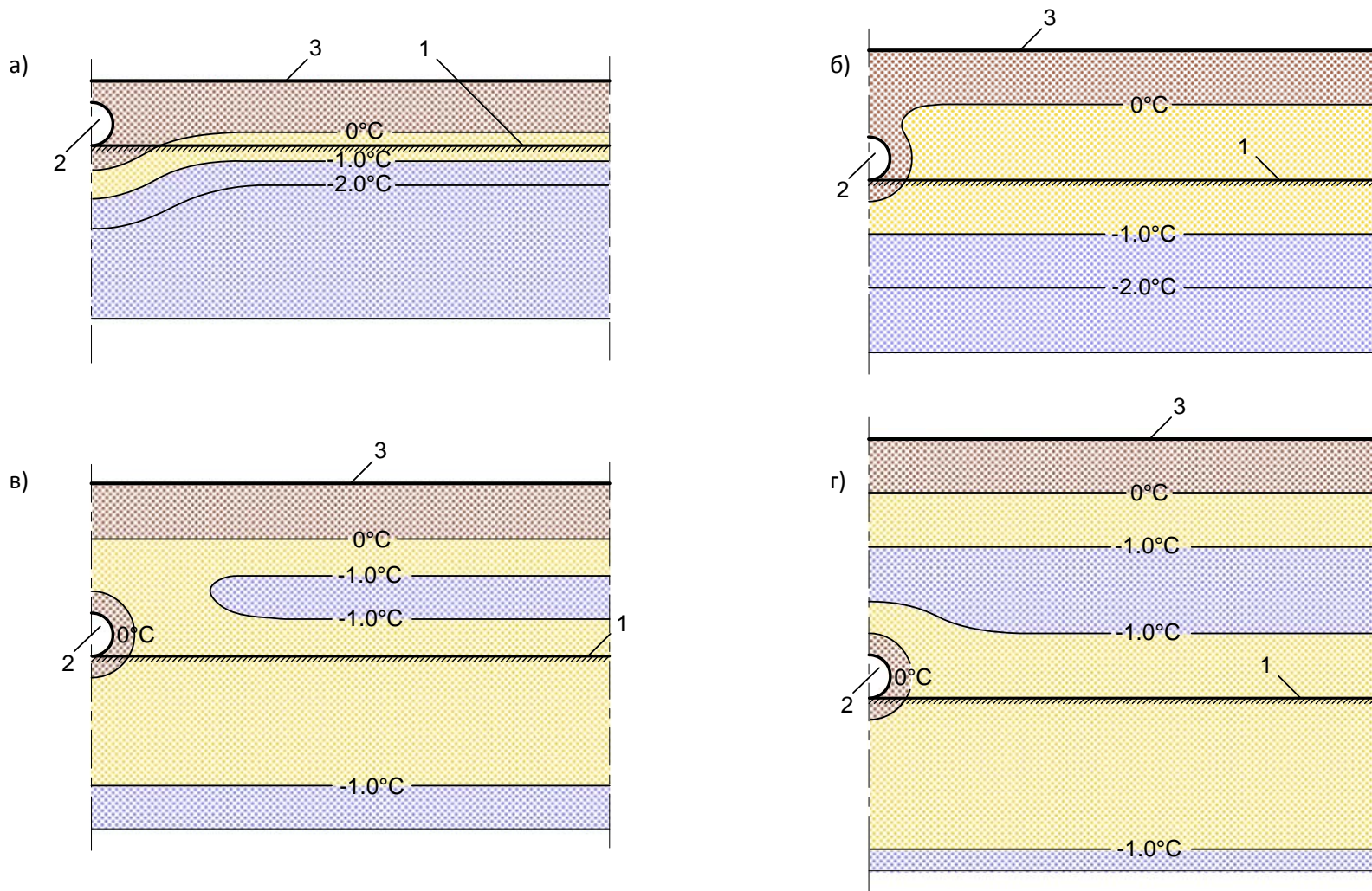


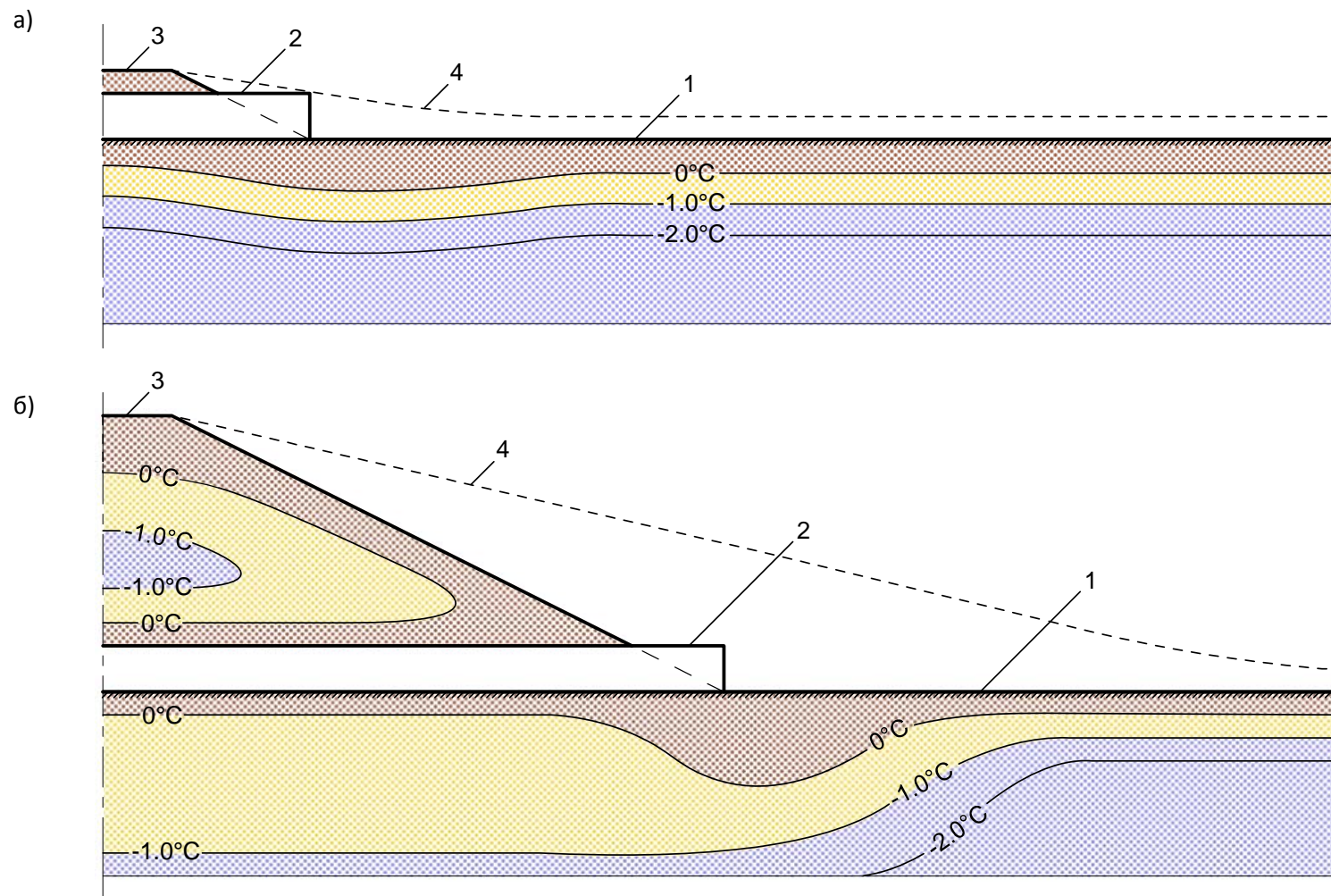
Рисунок 5.3 - Расчетная схема для определения температурного режима вечномёрзлых грунтов тела и основания насыпи в зоне водопропускной трубы



1 – естественная поверхность грунта; 2 – водопропускная труба; 3 – основная площадка насыпи

Рисунок 5.4 - Температурное поле по продольной оси насыпи в зоне водопропускной трубы отверстием 1,4 м при различной высоте насыпи: 3 м (а), 6 м (б), 8 м (в) и 12 м (г)





1 – естественная поверхность грунта; 2 – водопропускная труба; 3 – основная площадка насыпи;  
4 – очертания снежных отложений в зимний период

Рисунок 5.5 - Температурное поле по продольной оси трубы в зоне водопропускной трубы на момент окончания теплого периода года различной высоте насыпи: 3 м (а) и 12 м (б)

приводит к деформациям самой трубы и повышению напряжений в ней, а это, в свою очередь, может снизить или ликвидировать эксплуатационные свойства трубы по этой причине.

Посмотрим теперь, как с помощью регулировки температурного режима грунтов тела насыпи можно улучшить положение. Мы видим, что при насыпи высотой 3 м на некую удерживающую роль соседних участков насыпи на деформации и напряженное состояние трубы рассчитывать не следует, потому что температурные поля по оси трубы и вдали от нее отличаются несущественно.

При высоте насыпи 6 м в зоне трубы уже явно формируется некая траншея. Соседние участки насыпи здесь могут снизить деформации трубы по сравнению с тем случаем, когда вся насыпь содержит только талый грунт. Назовем этот случай «мерзлотная траншея».

При высоте насыпи 12 м над трубой расположена зона твердомерзлого грунта. Сечение по продольной оси трубы деформироваться самостоятельно не может. Мерзлая зона, расположенная над трубой и соседними участками насыпи, имеет внешний вид балки, лежащей на упругом основании (на пластичномерзлых грунтах). Назовем этот случай «мерзлотная балка».

Благоприятным свойством «мерзлотной балки» является то, что она перераспределяет давление от веса грунта и временной нагрузки, уменьшая его в зоне трубы и передавая это давление на соседние участки насыпи. При этом деформации усредняются (уменьшаются в зоне трубы и в значительно меньшей степени увеличиваются на соседних участках насыпи). Труба, таким образом, при наличии «мерзлотной балки» работает в несколько более благоприятном режиме (с точки зрения ее деформаций). Однако под «мерзлотной балкой» расположена довольно большая толща пластичномерзлых грунтов (окрашены в желтый цвет на рис. 5.4 и 5.5), которые являются деформируемыми достаточно сильно. Поэтому деформации водопропускной трубы могут быть все же достаточно значительными.

Представляет интерес определить, какими конструктивно-технологическими мерами можно улучшить температурный режим грунтов в зоне трубы, чтобы снизить нагрузку на трубу и уменьшить ее деформации.

На рис. 5.6 представлены результаты расчета температурного режима для той же трубы с насыпью высотой 12 м, что и изображено на рис. 5.4,г и 5.5,б. Но в данном случае труба покрыта теплоизоляцией (XPS ТЕХНОНИКОЛЬ 10 см).

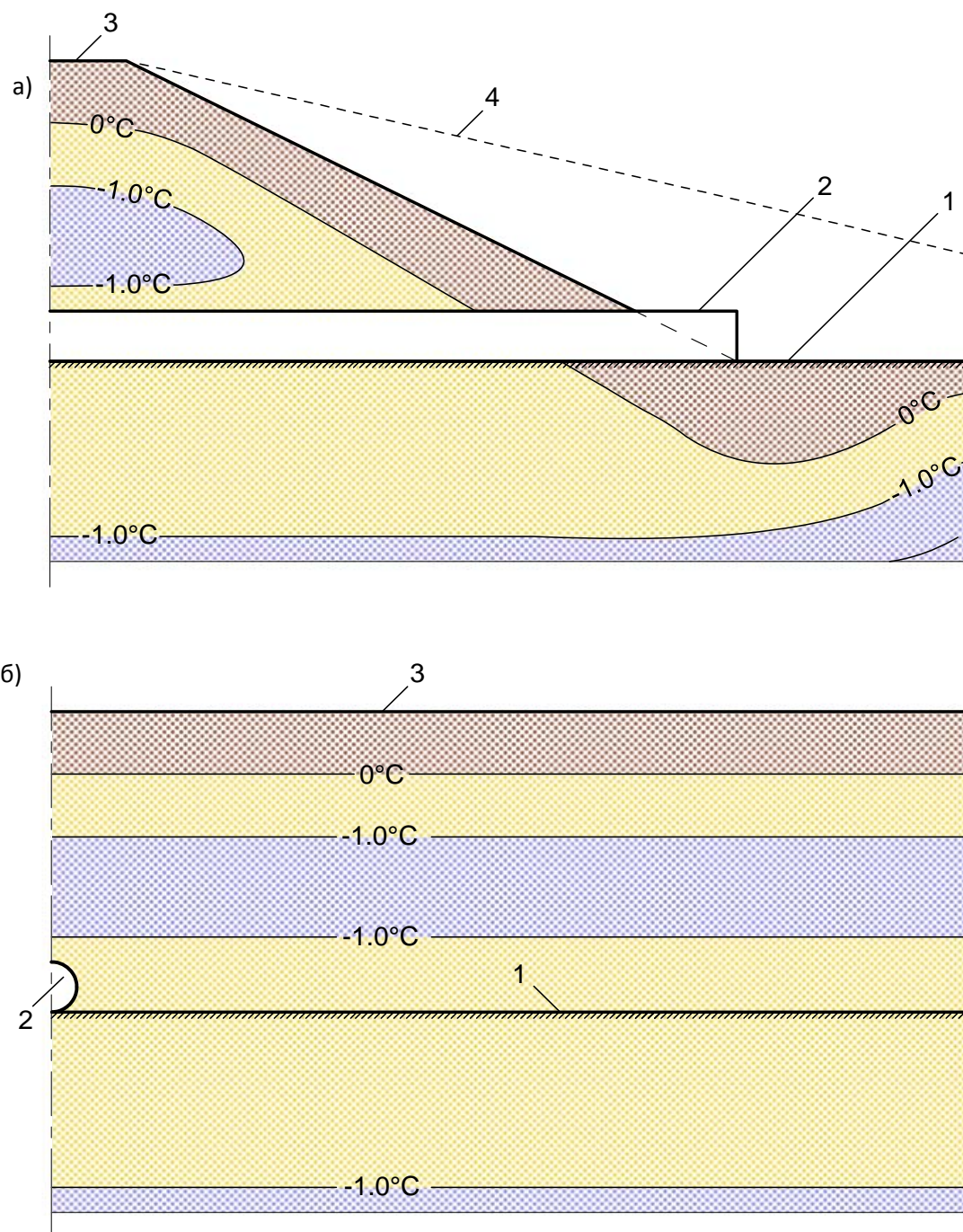
Мы видим, что принципиальных изменений температурных полей не произошло. Ликвидировалась талая зона вокруг трубы, увеличилось несколько сечение «мерзлотной балки» в зоне трубы. Но по-прежнему «мерзлотная балка» опирается примерно на 15-метровый слой пластичномерзлых грунтов, которые достаточно деформируемы.

Принципиального изменения мерзлотного состояния можно добиться, применяя охлаждающие установки глубинного типа. На рис. 5.7 приведены результаты расчета, в котором кроме теплоизоляции применены 4 термоопоры. В этом случае твердомерзлые грунты рядом с трубой насквозь «прошивают» пластичномерзлую зону. При этом над трубой формируется своеобразная «мерзлотная арка», передающая нагрузку от подвижного состава и веса насыпи на нижележащие твердомерзлые грунты, полностью разгружая саму трубу.

Таким образом, в данном разделе можно сделать следующие основные выводы.

1. При увеличении высоты насыпи (более 3 м) через несколько лет протаивания растепляются вечномерзлые нижележащие грунты оснований, что приводит к существенному увеличению вероятности возникновения нежелательных деформаций, как самой насыпи, так и водопропускной трубы.

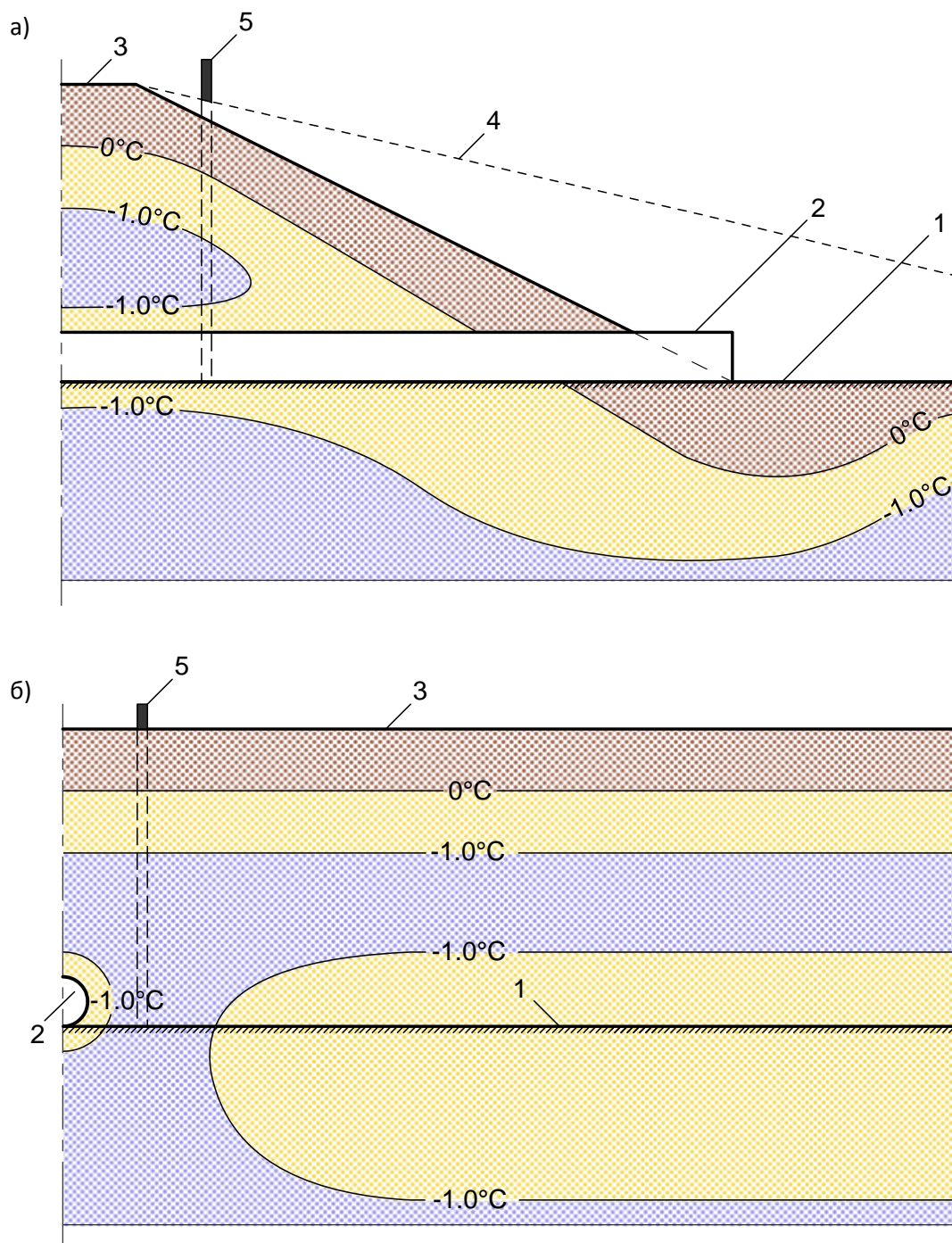
2. В высоких насыпях в грунтах над трубой и рядом с ней, наоборот, формируются предпосылки, правильное использование которых может



1 – естественная поверхность грунта; 2 – водопропускная труба;  
 3 – основная площадка насыпи;  
 4 – очертания снежных отложений в зимний период

Рисунок 5.6 - Температурное поле на момент окончания теплого периода года для насыпи высотой 12 м: а – по продольной оси трубы, б – по продольной оси насыпи. Труба покрыта по всему периметру теплоизоляцией





1 – естественная поверхность грунта; 2 – водопропускная труба;  
 3 – основная площадка насыпи; 4 – очертания снежных отложений в зимний период; 5 – термоопора

Рисунок 5.7 - Температурное поле на момент окончания теплого периода года для насыпи высотой 12 м: а – по продольной оси трубы, б – по продольной оси насыпи. Труба покрыта по всему периметру теплоизоляцией. В зоне трубы устанавливается 4 термоопоры

существенно уменьшить деформации и напряженное состояние трубы. Среди этих предпосылок следует особо отметить возможность формирования «мерзлотной траншеи», «мерзлотной балки» и «мерзлотной арки». При этом эти три образования, вероятно, по-разному будут изменять напряженно-деформированное состояние, хотя можно предположить, что влияние во всех трех случаях будет в благоприятную сторону.

3. Следует иметь в виду, что создание «мерзлотной балки» и «мерзлотной арки» возможно, если насыпь будет отсыпана талыми грунтами, которые потом замерзнут.

4. В следующих разделах целесообразно количественно оценить влияние указанных трех видов мерзлотного состояния тела насыпи на деформации и напряженное состояние трубы.

5. Более эффективным с точки зрения обеспечения требуемого мерзлотного состояния тела насыпи является совместное применение 2-х мероприятий – охлаждающих установок и теплоизоляция трубы по всему периметру, выполненная из XPS ТЕХНОНИКОЛЬ.



## 6. ТЕРМООПОРЫ

Одним из стратегических для вечной мерзлоты охлаждающих технических решений являются термоопоры. Термоопоры позволяют не только осуществить охлаждение мерзлых грунтов, но и являются сами несущими конструкциями, которые можно использовать для опор мостов, для фундаментов зданий и др. сооружений.

Термоопоры осуществляют глубинное охлаждение, т.е. они передают холод в зимнее время непосредственно в грунт. В летнее время они выключаются из работы. В этот период грунт вокруг опоры протаивает не менее, чем на глубину деятельного слоя. Это приводит к тому, что верхние 2-3м термоопоры, расположенные непосредственно у дневной поверхности грунта, выключаются из зоны смерзания с грунтом. Это приводит к двум последствиям:

- 1) Уменьшается несущая способность на вертикальную нагрузку за счет уменьшения площади смерзания по боковой поверхности;
- 2) Понижается уровень условной заделки столба при работе на изгиб, что существенно увеличивает величину изгибающего момента.

Устройство теплоизоляции вокруг опоры позволяет существенно улучшить температурный режим.

Для пояснения этого эффекта было проведено два сопоставительного расчета (с теплоизоляцией и без теплоизоляции).

На рис. 6.1 представлена схема расчетной области. В связи с тепловой симметрией для расчета одиночной термоопоры в плане «вырезан» один радиан. Размеры приведены на чертеже, а исходные данные приняты в соответствии с табл. 6.1.

Грунт принят однородным со следующими характеристиками: коэффициент теплопроводности для талого и мерзлого состояния принят равным соответственно 1,6 и 1,9 ккал/(м.час.град), объемная теплоемкость равна 650 и 500 ккал/(м<sup>3</sup> град) и скрытые теплоты равны 200000 ккал/м<sup>3</sup>.

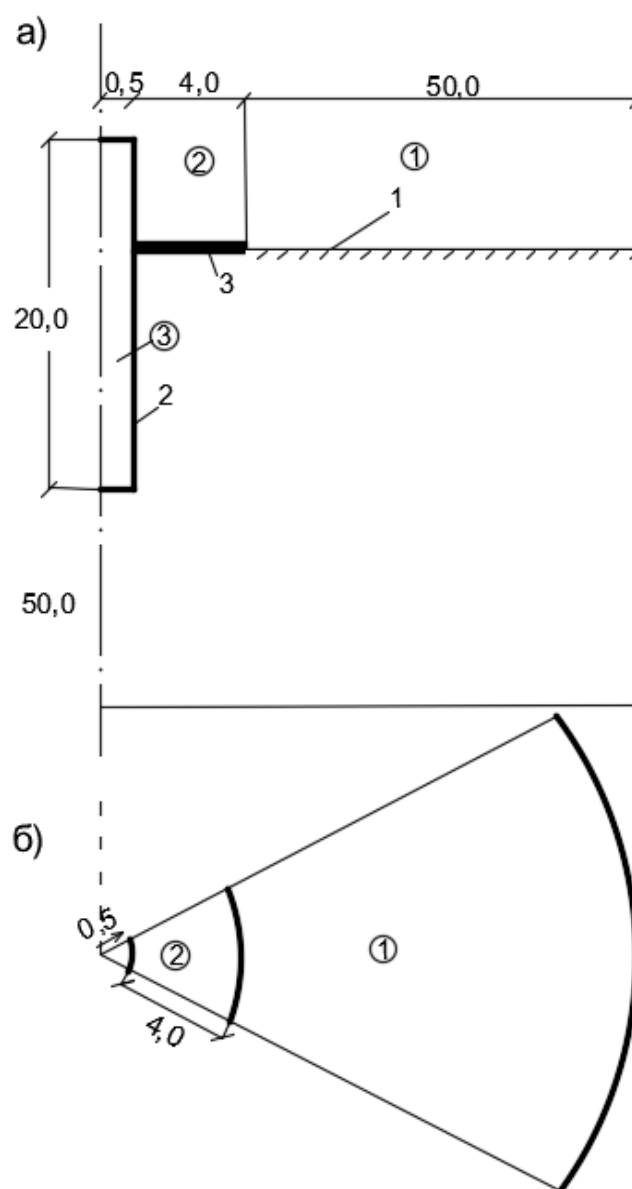


Рисунок 6.1 - Схема расчётной области:

①, ②, ③ - номера зон граничных условий;

а) – сечение по оси термоопоры; б) – план;

1 – естественная поверхность грунта;

2 – термоопора диаметром 1,0 м и глубиной заложения 20,0 м;

3 – теплоизоляция в виде XPS ТЕХНОНИКОЛЬ толщиной 10 см.

Таблица 6.1 - Среднемесячные приведенные температуры воздуха  $t$ (град) и коэффициенты теплопередачи  $A$  (ккал/(м<sup>2</sup> · час · град))

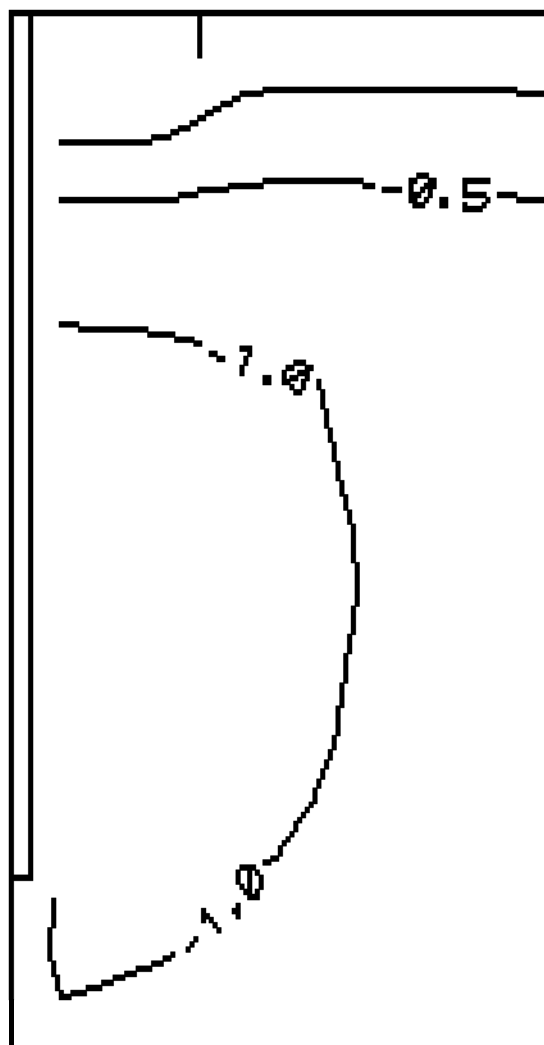
Пара- метры	Месяцы года											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_1$ и $t_2$ (гр.усл.1 и 2)	-23,6	-22,2	-18,3	-6,4	+1,4	+10,8	+18,8	+14,6	+8,4	-3,7	-15,3	-21,2
$t_3$ (гр.усл.3)	-6,0	-6,0	-6,0	0	0	0	0	0	0	0	-6,0	-6,0
$A_1$ (гр.усл.1)	0,55	0,63	0,92	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,2	0,8	0,65	0,56
$A_2$ (гр. усл 2., вар.1)	0,26	0,28	0,32	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,36	0,31	0,28	0,26
$A_3$ (гр.усл.3)	10,0	10,0	10,0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	10,0	10,0
$A_4$ (гр. усл.2, вар. 2)	0,55	0,63	0,92	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	1,2	0,8	0,65	0,56

В рассмотренных вариантах фоновая температура мерзлоты равна минус  $0,5^{\circ}\text{C}$ . В варианте 1 в зоне 2 (рис. 6.1) укладывалась теплоизоляция, а в варианте 2 в зоне 2 летом была оголенная от растительного покрова поверхность и теплоизоляция отсутствовала.

Результаты расчетов представлены на рис. 6.2. Нулевая изотерма в зоне термомоопоры поднялась почти на 3 м, а зона охлаждения с температурой ниже минус  $1,0^{\circ}\text{C}$  увеличивалась почти в 1,5 раза.

Аналогичный эффект может быть получен и при применении теплоизоляции совместно с жидкостными и парожидкостными установками.

а)



б)

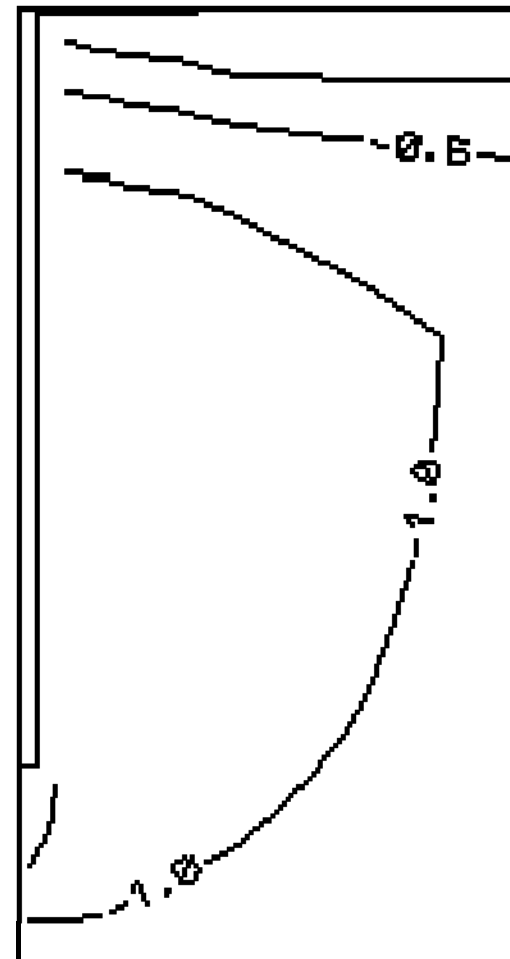


Рисунок 6.2 - Температурное поле по оси термоопоры на момент окончания тёплого периода года в установившемся режиме: а, б – соответственно без теплоизоляции вокруг опоры и с теплоизоляцией

## 7. ОТДЕЛЬНОЕ ЗДАНИЕ

Здание на вечной мерзлоте (рис. 7.1) содержит фундамент 1, расположенный на грунтах основания 2 корпус 3, размещенный на фундаменте 1, и охлаждающей грунты системы 4, причём грунты основания 2 содержат на момент окончания теплого периода года расположенную сверху талую зону 5, а снизу – мерзлую зону 6, при этом здание имеет прямоугольную в плане форму длиной « $\ell$ » и шириной « $b$ » и содержит слой теплоизоляции 7 толщиной « $\Delta$ », расположенный между корпусом 3 здания и его фундаментом 1. Охлаждающая грунты система 4 выполнена из полых труб с внутренним диаметром « $D$ », заглушенных с обоих торцов крышками и погруженных частично в грунт 2 в вертикальном положении, причём трубы расположены с внешней стороны корпуса 3 здания вдоль его стороны длиной « $\ell$ » с расстоянием « $c$ » между собой и на расстоянии « $a$ » от стены здания, а также по одной трубе у торцов здания на их середине. Глубина талой зоны 5 в естественных условиях, т.е. до постройки здания может превышать толщину деятельного слоя и характеризуется границей 8. После возведения здания под ним граница талой и мёрзлой зон изменяется и характеризуется кривой 9. Глубина талой зоны от уровня естественной поверхности грунта в зоне полых труб равна « $h_B$ », а в центре здания « $h_{Ц}$ ». Кроме того, охлаждающая система формирует зону повышенного охлаждения (вечномерзлое ядро) 10. Основные параметры связаны между собой следующим образом:

$$d = b + 2a, \text{ м}; \quad (1)$$

$$D = m^2 \cdot D_C, \text{ м}; \quad (2)$$

$$H = m \cdot 20 D, \text{ м}; \quad (3)$$

$$h = 0,15m \cdot H, \text{ м}; \quad (4)$$

$$h_y = md \left( \frac{1.15}{n+1} - 0.36 \right), \text{ м}; \quad (5)$$

$$n = \frac{\Delta}{0.5m}, \text{ б/р } (\Delta \leq 0,5m); \quad (6)$$

$$c = 0,3md, \text{ м}; \quad (7)$$

$$\ell \geq b, \text{ м}, \quad (8)$$

- где  $d$  – расстояние между противоположными рядами полых труб, м;  
 $D_c$  – внутренний диаметр полой трубы, м (принят равным 1,0 м);  
 $m$  – поправочный коэффициент, принимаемый равным  $(0,8 \div 1,2)$ , б/р. Коэффициент  $m$  принимается равным 1.0 при  $H=20$  м, при увеличении или уменьшении  $H$  он соответственно увеличивается или уменьшается;  
 $h, H$  – соответственно высота надземной и подземной частей полых труб, м.

Кроме того, полые трубы могут содержать внутри полости коаксиально расположенную трубу диаметром  $d_k$ , имеющую в верхнем и нижнем концах боковые вырезы площадью  $S$ , при этом  $d_k = 0,7d$ , м;  $S = \frac{\pi d_k^2}{4}$ , м<sup>2</sup>.

Формулы (1 – 8) выводились, исходя из следующих предпосылок.

Расстояние « $d$ » между термоопорами и соотношение « $n$ » расчётной и максимальной толщины теплоизоляции принимались как основные параметры при теплофизических расчётах. При этом « $H$ » принималось постоянным равным 20 м. Эта величина рекомендуется для использования в практике. Формула (5) получена на основании трёхмерных теплофизических расчётов. Коэффициент « $m$ » учитывает возможное изменение высоты « $H$ ». Введение в формуле (2) значения « $m$ » в квадрате означает то, что при изменении диаметра термоопоры эффект охлаждения изменяется нелинейно.

Соотношение (7) было принято, как исходное условие в теплофизических расчётах и при выводе формулы (5).

Здание на вечной мерзлоте работает следующим образом.

Нагрузка от сооружения воспринимается фундаментом; тепловой режим грунтов основания 2 поддерживается сочетанием охлаждающей грунты системы 4 и теплоизоляции 7.

Охлаждение основывается на конвекции воздуха в полостях труб системы 4 зимой и происходит следующим образом. Охлажденный в надземной части полостей охлаждающей системы 4 воздух опускается вниз и отдает холод в грунт через стенки труб охлаждающей системы 4, после чего поднимается вверх, в надземную часть, где вновь охлаждается и т.д. При наличии коаксиальных вставок потоки воздуха разделяются: теплые восходящие перемещаются внутри коаксиальной вставки, а холодные нисходящие - внутри полости образованной зазором между стенками трубы охлаждающей системы 4 и коаксиальной вставкой. В летний период конвекция прекращается, и тепло в грунт не поступает.

Теплоизоляция 7 играет пассивную роль: она снижает интенсивность тепловых потоков из здания в грунт. Учёт мощности теплоизоляции производится за счёт коэффициента « $n$ » в формуле (5). Теплоизоляция позволяет регулировать глубину  $h_{\text{ц}}$  талой зоны с нижней границей 9 (рис. 7.1), при необходимости доводя его практически до нуля.

Существо предлагаемого технического решения основано на возможности использования на вечной мерзлоте обычных зданий без проветриваемого подполья за счёт сочетания теплоизоляции под зданием и расположенных по его периметру термоопор. Такая система может быть рациональна при ширине « $d$ », не превышающей некой величины  $d_{\text{max}}$ .

Особенностью такой системы является наличие мёрзлых «горбов» в зоне термоопор с глубиной талого слоя « $h_{\text{б}}$ », при этом  $h_{\text{б}} < h_{\text{ест}}$ , т. е. глубины деятельного слоя в естественных условиях.



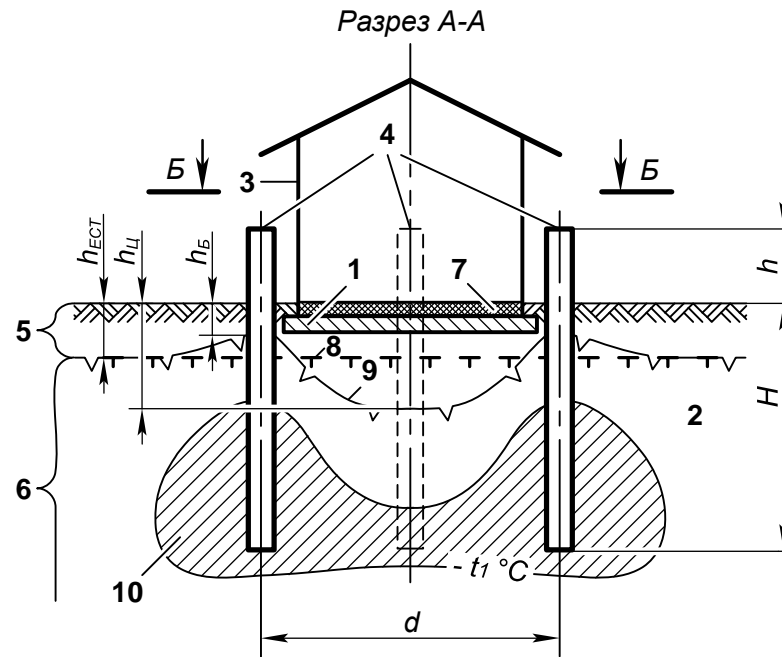
Термоопоры формируют также твёрдомёрзлую зону 10, обеспечивающую несущую способность термоопор по боковой поверхности и по торцу. При заданных формулой (5) параметрах твёрдомёрзлое ядро 9 под центром здания смыкается, обеспечивая расчётные параметры талика, т. е. гарантию того, что более определённых по формуле (4) размеров он не увеличится.

Фундамент может быть:

- 1) из балки на горбах;
- 2) из плиты с учётом её осадки, которая фиксирована охлаждающей системой (рис. 7.1). При этом глубина  $h_{\text{ц}}$  талика фиксирована формулой (4);
- 3) на коротких сваях, усиливающих фундамент 1;
- 4) но самое главное – это то, что сами охлаждающие устройства (термоопоры) могут быть использованы как основной несущий элемент конструкции – на них может быть опёрта плита 1 фундамента.

Повышение надёжности охлаждающей системы сооружения достигается за счёт сочетания теплоизоляции и глубинных охлаждающих систем. Эффективность такого сочетания определяется следующим. Теплоизоляция может предохранить от протаивания грунта основания непосредственно под зданием. Однако тепловое влияние соседних со зданием зон может привести к протаиванию грунтов под зданием рядом с неблагоприятной зоной, что приведет к неравномерным деформациям. В этом случае вертикальная завеса из термоопор предохраняет от бокового теплового влияния и усиливает мерзлоту непосредственно под зданием. Применение только одних термоопор без теплоизоляции приводит к резкому снижению допускаемой ширины здания, которая определяется расстоянием между термоопорами, при котором имеет место их взаимовлияние. В связи с изложенным получается, что суммарный эффект выше суммы эффектов от отдельных мероприятий.

а)



б)

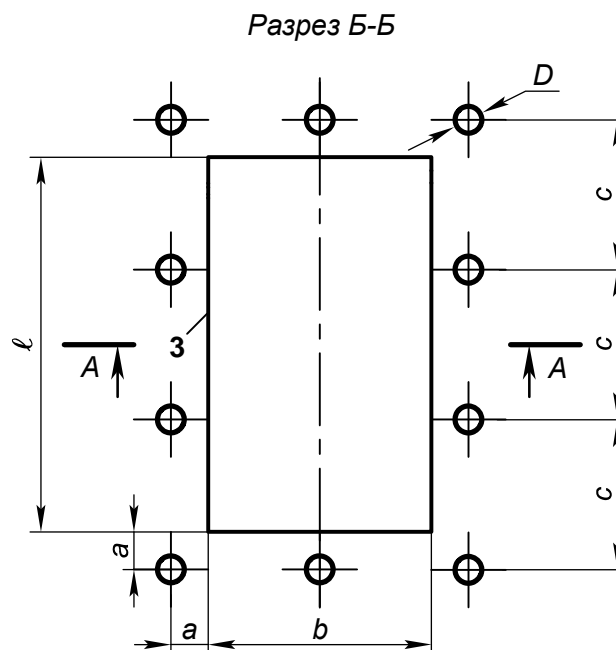


Рисунок 7.1 - Схема здания на вечной мерзлоте: а)- разрез А-А; б) - разрез Б-Б; 1- фундамент, 2- грунты основания, 3- корпус здания, 4- охлаждающая система, 5- талая зона грунтов основания, 6- мерзлая зона грунтов основания, 7- теплоизоляция, 8- граница деятельного слоя в естественных условиях, 9- граница мерзлых и талых грунтов в установившемся режиме, 10- твердомерзлое ядро

## 8. ЗАЩИТНЫЕ СИСТЕМЫ

При возведении сооружений на вечной мерзлоте в первую очередь обращают внимание на температурный режим грунтов в пределах самого сооружения, чтобы предотвратить различного рода протаивания. Однако в ряде случаев имеет место нарушение сложившихся в течение длительного времени естественных условий на смежных территориях, которые приводят иногда к отрицательным последствиям на этих территориях, вплоть до аварийных. Рассмотрим один из таких случаев.

При возведении земляных сооружений (дорожные насыпи, площадки под строительство, насыпные территории под жилые массивы и т.п.), расположенных на местности с уклоном, находящаяся рядом территория (участок), часто небольших размеров, подвергается влиянию этих сооружений. Это влияние выражается в осуществлении искусственной планировки со срезкой поверхности, в формировании повышенных снежных заносов, подтоплению, нарушению растительного покрова и т.п. Указанные нарушения способствуют дополнительному протаиванию грунтов, а это протаивание на уклоне местности по разному протекает для слабольдистых и высокольдистых грунтов. Уклон местности может быть естественный, а может быть искусственный, например, откос дорожной выемки.

В обычных грунтах малой и средней влажности (льдистости) протаивание и деформации происходят по схеме, изображенной на рис. 8.1. На этом рисунке изображено состояние протаивания грунтов применительно к железнодорожной выемке. Грунт в начале летнего периода начинает протаивать в направлении, перпендикулярном поверхности, и к середине летнего периода на контакте с общим мёрзлым массивом 6 формируется слой талого грунта 4. Толщина этого слоя увеличивается к концу теплого периода года, но грунт остается на месте. В зимний период он снова промерзает, затем снова оттаивает, то есть формируется так называемый деятельный слой, при этом расстояние  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$  нулевой изотермы 5 от поверхности

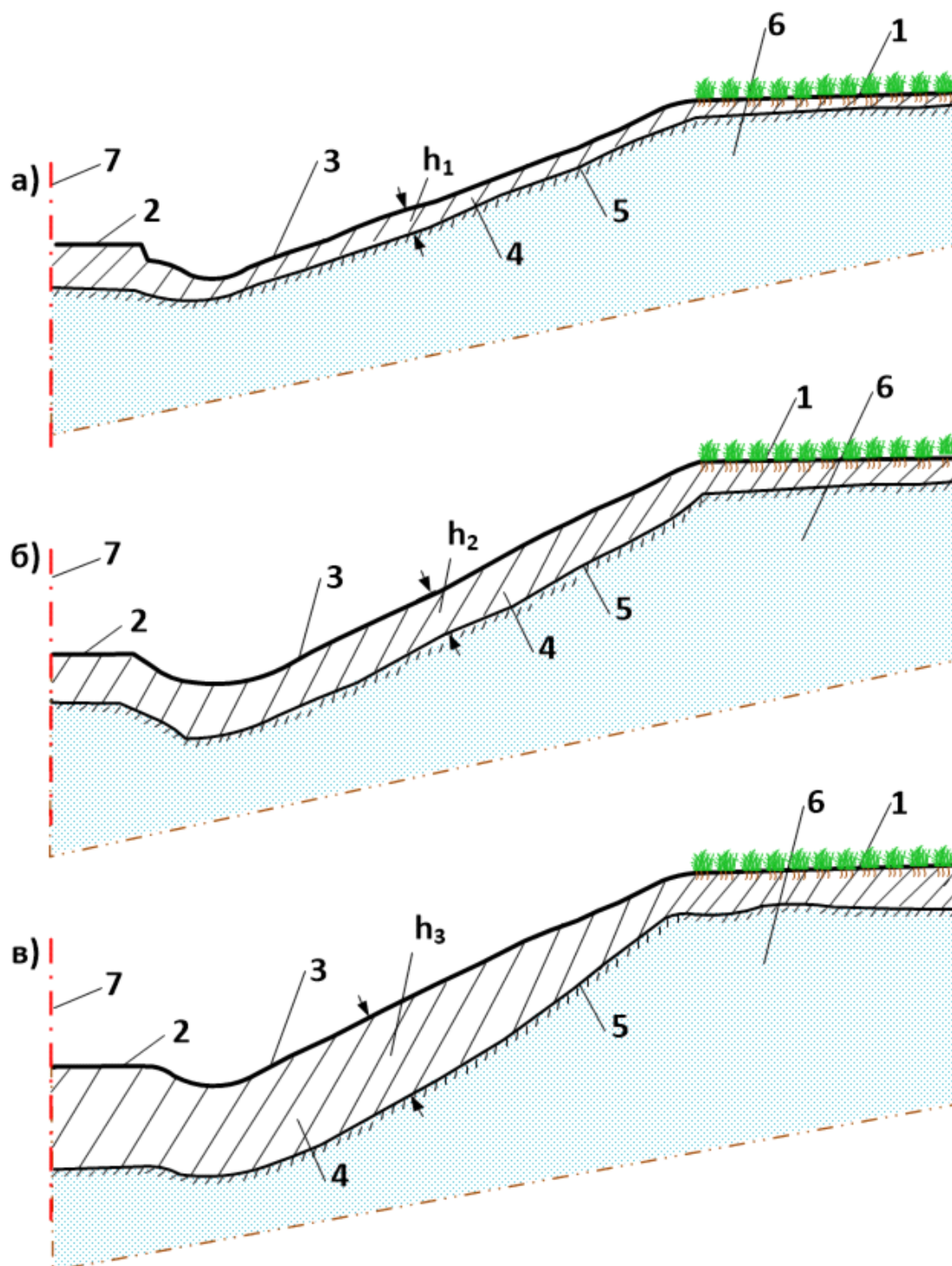


Рисунок 8.1 - Характер протаивания откосов выемки при грунтах маловлажных: а, б, в, - положение нулевой изотермы соответственно в начале, середине и конце тёплого периода года, 1 – естественная поверхность грунта с растительным покровом, 2 – полотно дороги, 3 – поверхность откоса выемки, 4 – зона талого грунта, 5 – положение нулевой изотермы, 6 – вечномёрзлый грунт, 7 – ось дороги

изменяется от нуля в конце зимнего периода до некоторой величины в конце летнего периода (в общем случае различной в зависимости от средней температуры воздуха).

Совсем по-другому происходят процессы протаивания и деформации при залегании льдогрунтов (рис. 8.2). Если в маловлажном грунте при протаивании формируется его скелет, и грунт остается на месте, то при протаивании льдогрунта образуется жидкая масса, которая при наличии уклона стекает вниз, образуя новую поверхность 8 с уклоном  $1:i_2$ .

В то же время образуется зона 9 грунта без прослойки талого грунта на поверхности. А раз прослойки грунта нет, то нет термического сопротивления, и процесс протаивания не замедляется в течение лета, то есть за сезон протаивает не 1-2 метра грунта, а десятки и даже сотни метров! Но самое главное то, что протаивание меняет направление, которое становится не перпендикулярным к естественной поверхности, а параллельным по отношению к ней. При этом если направление протаивания совпадает с повышением уровня естественной поверхности (т.е. идёт вверх по уклону), то зона 9 увеличивается по высоте, и за летний сезон могут протаять большие массивы.

На рис. 8.3 представлен реальный пример такого протаивания на одной из железных дорог в заполярной тундре. При постройке насыпи 1 была произведена искусственная срезка грунта I с образованием почти вертикальной поверхности 4. В летний период началось протаивание на направлении 5 зон II, III, IV, V. В результате весь холм шириной сотни метров был разрушен, а вместо уклона  $1:i_1$ , (угол наклона  $\alpha_1$  поверхности 2 сформировался новый участок жидкого грунта с уклоном  $1:i_2$  (угол наклона  $\alpha_2$ ) поверхности 6.

На рисунке 4 показан общий вид деформации. На рис. 8.4,а хорошо видно, что травяной покров (позиция 1 на рис. 8.2) не остаётся на месте и закрывает зону 9, а разрывается и уносится вместе с жидким грунтом.

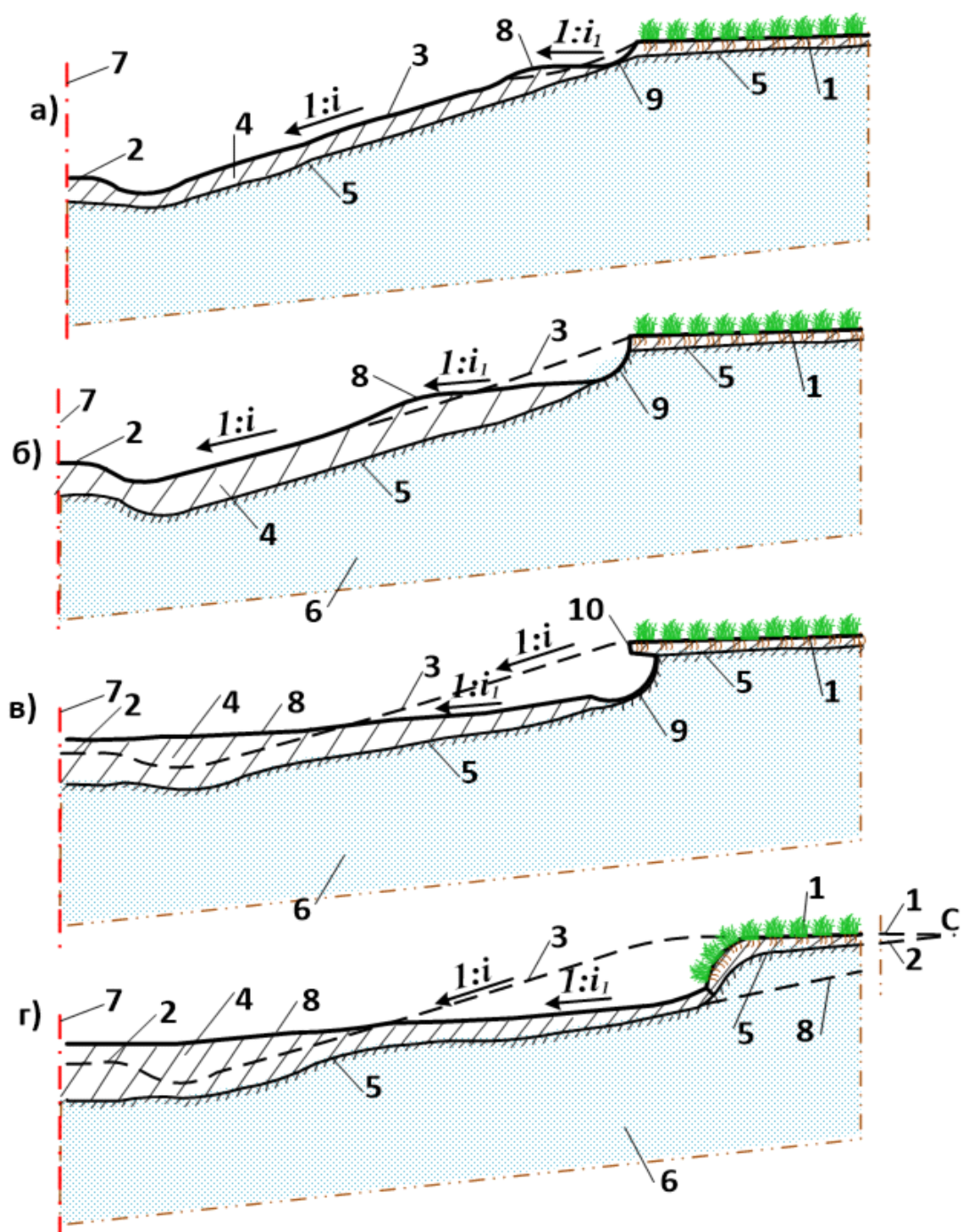


Рисунок 8.2 - Характер протаивания в зоне выемки при текущих при оттаивании грунтах: а, б, в, г - стадии протаивания, 1 – естественная поверхность грунта с растительным покровом, 2 – полотно дороги, 3 – поверхность откоса выемки, 4 – зона талого грунта, 5 – положение нулевой изотермы, 6 – вечномёрзлый грунт, 7 – ось дороги, 8 – верхняя поверхность оплывшего грунта, 9 – зона грунта без прослойки талого грунта на поверхности, 10 – корка талого поверхностного слоя грунта, скреплённого корнями растительного покрова

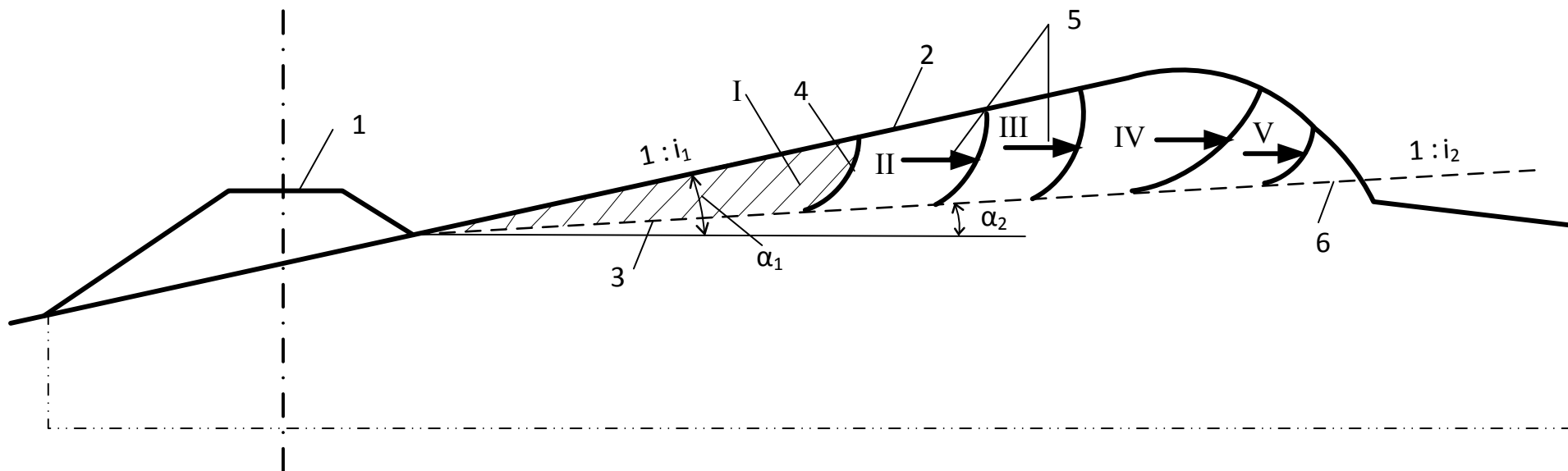


Рисунок 8.3 - Схема разрушения прилегающей к дорожному земляному полотну территории: 1 – земляное полотно, 2 – поверхность прилегающей территории в виде холма из льдогрунта с углом наклона  $\alpha_1$ , 3 – поверхность жидкого оттаявшего грунта с углом наклона  $\alpha_2$ , I – нарушение территории в виде искусственной срезки грунта, II, III, IV, V – последовательность горизонтального протаивания по направлению 5, 4 – вертикальная оголённая поверхность, 6 – верхняя поверхность оттаявшего жидкого грунта





Рисунок 8.4 – Общий вид деформаций массивов



Для предотвращения горизонтального протаивания предлагается устройство защитного массива на границе нарушенной и ненарушенной территорий. В результате формируется техническое решение, которое представляет собой земляное сооружение, содержащее непосредственно строительный объект, прилегающую территорию и защитное устройство (рис. 8.5).

Земляное сооружение на вечной мерзлоте при поперечном уклоне местности содержит тело 1 сооружения, возведённое на территории 2 с естественными природными условиями, и зону 3 поверхности с нарушенными в результате возведения тела 1 земляного сооружения природными условиями, которая непосредственно примыкает к телу 1 сооружения. При этом земляное сооружение расположено на поперечном уклоне местности. На рис. 8.5,а телом 1 сооружения является земляное полотно выемки железной дороги, а на рис. 8.5,б - это окраинная часть площадки для поселка, при этом ширина в первом случае равна « $a_1$ », а во втором – « $a_2$ ». Территория 2 с ненарушенными естественными условиями на рис. 8.5,а и 8.5,б расположена на ширине  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ . Зона 3 поверхности с нарушенными природными условиями на поверхности расположена на рис. 8.5,а и 8.5,б на ширине  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ . В первом случае (рис. 8.5,а) нарушение естественных природных условий имеет место при формировании выемки, в результате чего произведено удаление растительного покрова и срезка грунта. Во втором случае нарушение теплового баланса и, следовательно, дополнительное протаивание происходит в результате повышенных снежных отложений, которые при сильном снегопереносе, характерного для заполярной тундры, формируются по линии 4.

Земляное сооружение (рис. 8.5) содержит защитный массив 5 высотой « $h$ » и шириной « $b$ » из маловлажного грунта, расположенный вдоль границ тела сооружения. Высота « $h$ » назначается, исходя из следующих соображений. В естественных условиях, когда талый грунт в летний период находится только с поверхности (т.е. деятельный слой), а основная часть мёрзлая, то

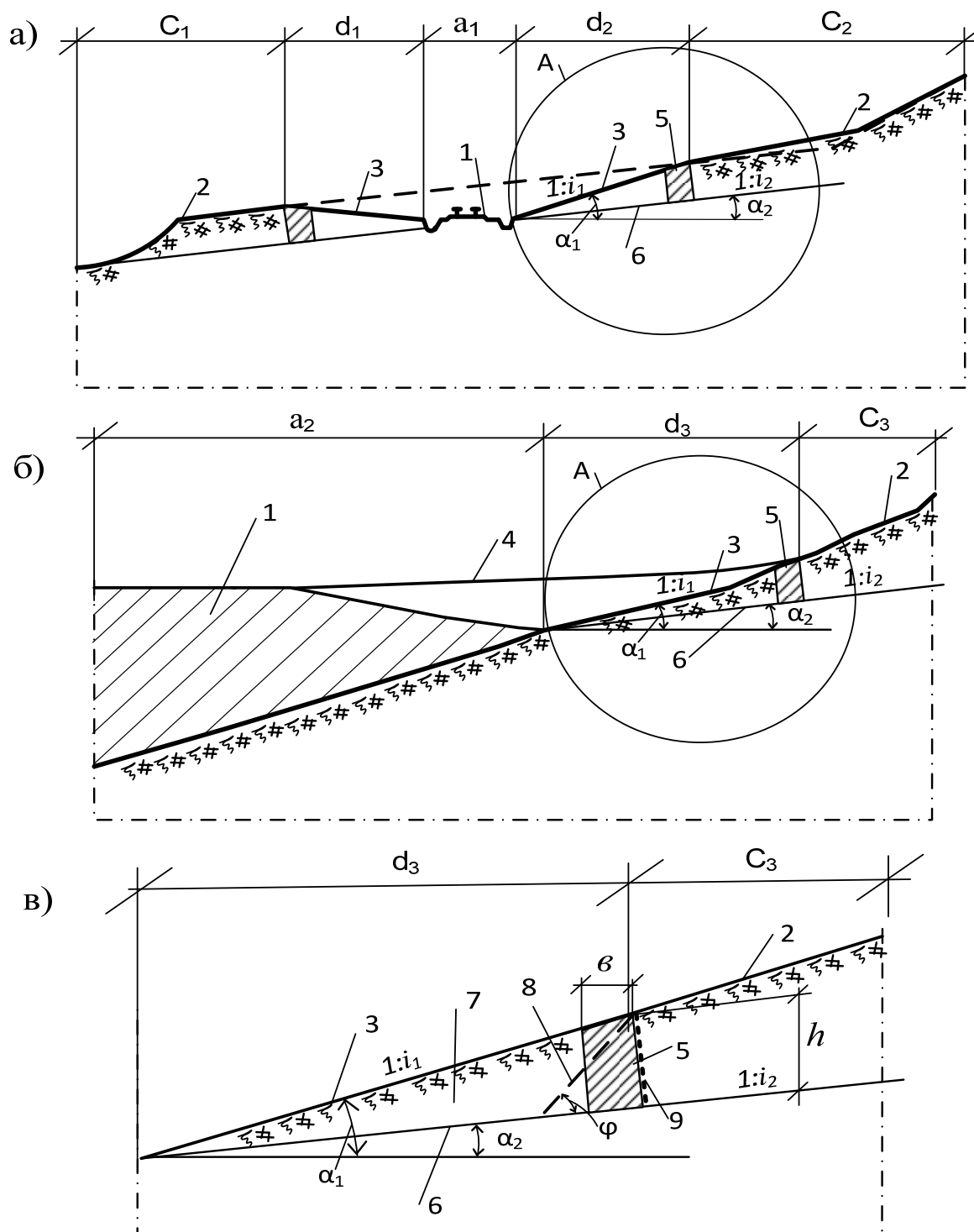


Рисунок 8.5 - Схема земляного сооружения с защитным устройством: а – земляное полотно выемки железной дороги, б – намытая площадка для посёлка (её окраинная часть), в – узел А на рис. 8.5,а и б, 1 – тело сооружения, 2 – территория с естественными природными условиями, 3 – зона поверхности с нарушенными условиями, 4 – зона повышенных снежных отложений, 5 – защитный массив, 6 – верхняя граница протаявших жидких грунтов, 7 – зона грунта, которая может оттаять и растечься, 8 – откос массива 5 после его протаивания, 9 – теплоизоляция

положение естественной поверхности определяется линиями 2 или 3 с уклоном  $1:i_1$  и углом наклона  $\alpha_1$ . Если же имеет место протаивание льдогрунтов (а данное техническое решение предназначено именно для случая залегания льдогрунтов и погребенных льдов), то верхняя граница протаявших и расплывшихся грунтов занимает положение 6 с уклоном  $1:i_2$  и углом наклона к горизонтали равном  $\alpha_2$ . Высота «h» защитного массива есть расстояние по вертикали между линией 3 и 6 в месте контакта зон 2 и 3. Ширина «b» защитного массива определяется из условий устойчивости защитного массива после оттаивания и растекания льдогрунта со стороны тела 1 сооружения.

Конструктивное исполнение защитного массива 1 может быть различным. По первой схеме грунт закладывается в траншею во время возведения земляного сооружения (рис. 8.5,в). В случае оттаивания и расплывания грунта 7 грунтовый массив принимает треугольную форму с откосом 8 и углом естественного откоса «φ». В этом случае из геометрических соображений 
$$b = \frac{h}{2tg\varphi}$$
 . Возможны другие технические решения защитного устройства, например конструкции, имитирующие работу растительного покрова 1 на рисунке 2,г.

По схеме рис. 8.6 грунт (предпочтительно скальный) закладывается в габионы 1. Защитный массив представляет собой уложенную горизонтально полосу габионов, которая в поперечном сечении состоит из нескольких габионов 1 общей шириной «h», соединенных друг с другом с помощью шарниров 4 в уровне нижних оснований и заанкерных в грунте с верховой стороны с помощью тяг 5 и анкеров 6. При этом верхняя поверхность полосы совпадает с поверхностью окружающего грунта.

Таким образом, для предотвращения горизонтального протаивания предлагаемое техническое решение содержит защитные массив, который на контакте нарушенной и ненарушенной зон создает дополнительное

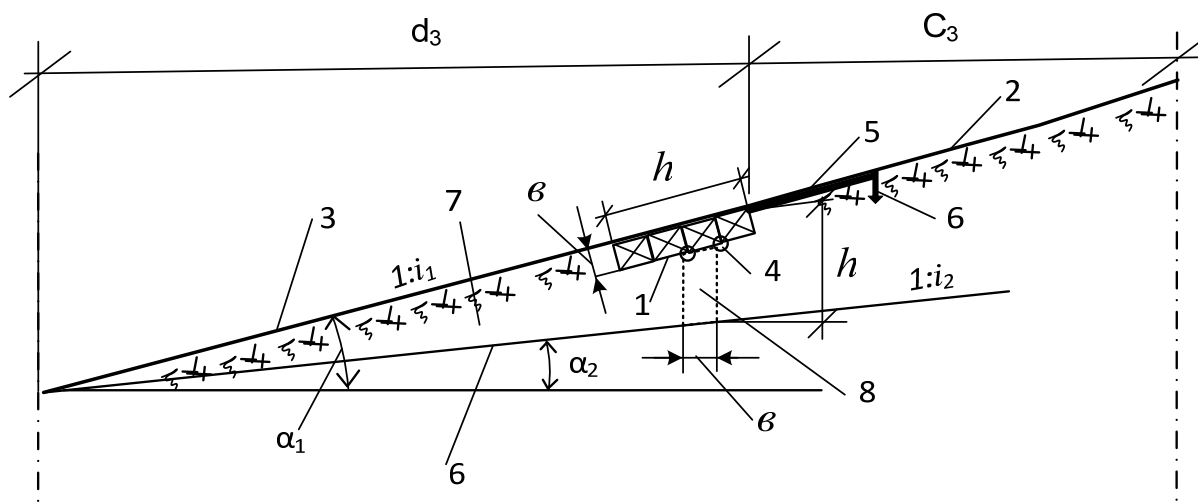


Рисунок 8.6 - Защитный массив поверхностного типа: 1 – полоса из габионов, 2 – территория с естественными природными условиями, 3 – зона поверхности с нарушенными условиями, 4 – шарниры, 5 – тяги, 6 – анкеры, 7 – зона грунта, которая может протаять и растечься, 8 – положение полосы из габионов 1 после протаивания массива 7 (теплоизоляция расположена в нижней части габионов)

термическое сопротивление и предотвращает развитие горизонтального протаивания. Защитный массив по схеме 1 работает следующим образом. При протаивании массива 7 грунт защитного массива изменяет свою форму: формируются откос 8 под углом естественного откоса «ф», чем обеспечивается его дальнейшая устойчивость. Массив 7 восстанавливается новым грунтом. Заменить сразу массив 7 при строительстве вместо защитного массива неэффективно, так как неблагоприятное протаивание формируется не всегда, а лишь в определенном числе случаев. Кроме того, восстановление массива 7 не всегда необходимо.

Защитный массив по схеме 2 работает следующим образом. При протаивании массива 7 габионы опускаются и занимают положение 8 (рис. 8.6) и «запирают» ненарушенную территорию. Роль защитного массива мог бы сыграть дерн (растительный слой), но он разрушается и уплывает вместе с протаивающим льдогрунтом.

Защитный массив по обеим схемам целесообразно усилить теплоизоляцией. В первой схеме теплоизоляцию целесообразно располагать в положении 9 (рис. 8.5,в), а во второй схеме – в пределах габионов.

На основании вышеизложенных материалов можно сделать следующие выводы:

1) На естественном или искусственном уклоне местности протаивание слабобльдистых и высокольдистых грунтов идет по-разному. Обычные грунты при протаивании остаются на месте, создавая термическое сопротивление для нижележащих грунтов. Поэтому скорость протаивания в течение лета замедляется. Протаивание высокольдистых грунтов и погребенных льдов сопровождается оплыванием жидкой массы, поскольку угол естественного откоса жидкой массы меньше угла уклона местности. При этом образуются вертикальная оголенная от протаявшего грунта поверхность. Поэтому остается термическое сопротивление близкое к нулевому значению, и скорость протаивания не уменьшается в течение лета. Направление протаивания становится близким к горизонтальному. За лето может растаять

десятки и сотни метров. Скорость протаивания может увеличиться существенно за счёт солнечной радиации и поверхностных вод;

2) В результате горизонтального протаивания могут подвергнуться разрушению прилегающие территории вместе с естественными и искусственными объектами. Обозначим этот вид разрушения первичным;

3) Вслед за первичным разрушением наступает вторичное разрушение. Площадь поверхности, занимаемая жидкой грунтовой массой в свободном от препятствий состоянии, больше первоначального объёма в мёрзлом состоянии в «n» раз,

$$n = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \text{ где}$$

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - углы наклона поверхности соответственно в естественном состоянии (мёрзлом) и жидкой грунтовой массы.

В связи с изложенным, грунтовая масса начинает растекаться в стороны, разрушая новые территории, в том числе может и закрыть и сам строительный объект. В приведенном на рис. 3 примере жидкая масса переместилась вдоль насыпи, полностью заполнив водопропускную трубу;

4) При проектировании сооружений на местности с наличием высокольдистых грунтов и погребенных льдов (а это огромные территории, например, на севере Заполярной тундры) должны приниматься меры по защите окружающей территории. В данной работе приведён пример такого вида защиты;

5) Разрушения, аналогичные рассмотренным в данной работе, могут происходить при углублении мелководного озера на вечной мерзлоте для создания, например, канала. В связи с углублением в зоне канала начнется протаивание, которое захватит смежные с каналом участки. Протаявший слой грунта при любой его льдистости не связан скелетом с остальной массой. Поэтому он насыщается водой и сплывает по уклону. Эти деформации могут приобрести непрогнозируемый характер. Поэтому при

подобных работах необходима разработка мероприятий, например, защитных массивов подобного типа;

6) Надёжность работы защитного массива определяется двумя тесно взаимосвязанными составляющими: теплоизоляционной и механической. Теплоизоляционная составляющая характеризуется термическим сопротивлением, которое формируется на поверхности протаивания и которое останавливает процесс дальнейшего протаивания. Механическая составляющая обеспечивает стабильность защитного массива. Защитный массив в обоих вариантах достаточен для обеспечения его стабильности. Но для обеспечения надёжности теплоизоляционной составляющей защитный массив должен быть увеличен. Увеличение массива требует дополнительных затрат, а его громоздкость снижает надёжность. Поэтому применение теплоизоляции существенно увеличивает надёжность защитного массива и снижает его стоимость.

## 9. БЕТОНИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТОВ, ПЛОЩАДОК

Большое количество конструкций необходимо сооружать из монолитного бетона (фундаментов зданий и сооружений, покрытий, в т.ч. аэродромных, и др.) непосредственно на вечномерзлых грунтах. Сами мерзлые грунты допускают поддержание требуемого температурного режима и набор прочности бетона за счет экзотермии цемента. Однако при отрицательной температуре воздуха требуется теплоизоляция верхней поверхности бетонной конструкции.

На рис. 9.1 приведен пример использования теплоизоляции при бетонировании бетонной плиты толщиной 0,5 м при температуре грунтов и температуре воздуха минус 5°C.

Если теплоизоляцию не применять, то через 3 дня верх бетонной смеси замёрзнет (верх кривой 7 соответствует температуре минус 3.0°C). Применение теплоизоляции позволяет бетонную плиту расположить в диапазоне температур от плюс 15 °C до плюс 20 °C (кривая 6).



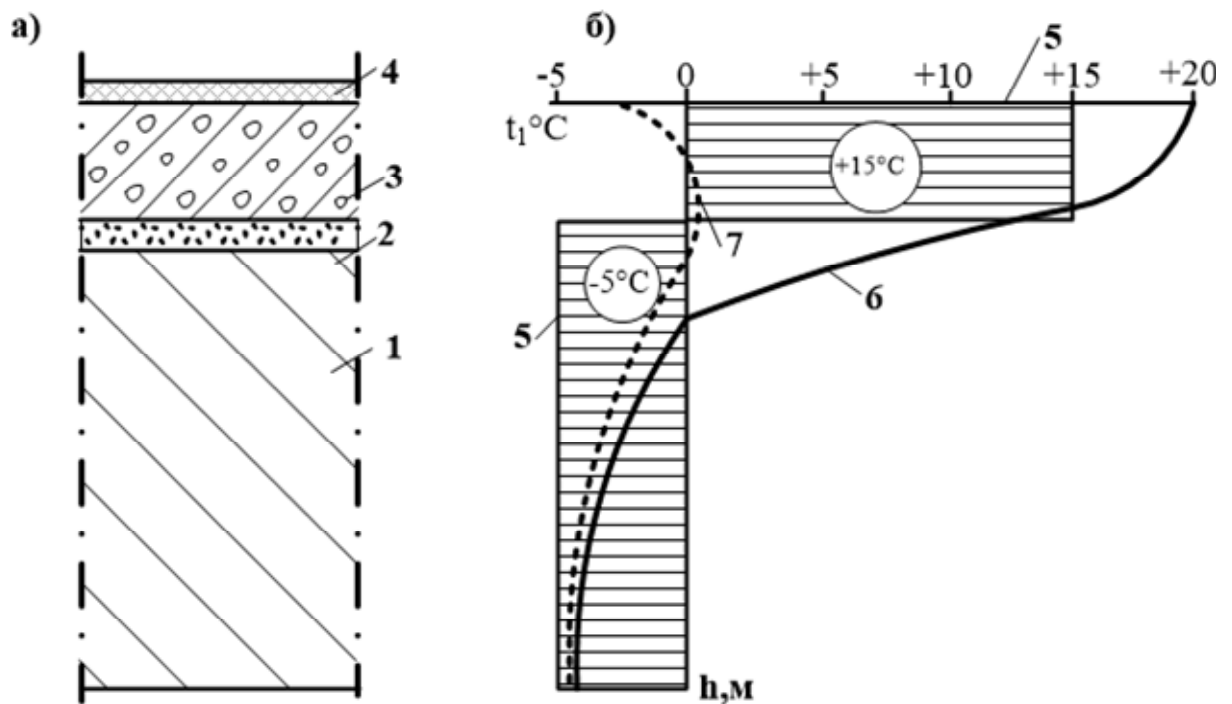


Рисунок 9.1 – Пример использования теплоизоляции при бетонировании бетонной плиты толщиной 0,5 м: а) – схема расположения плиты; б) – распределение температуры по глубине  $h$ ; 1 – мёрзлые грунты основания; 2 - щебёночная подсыпка; 3 - бетонизируемый массив; 4 – теплоизоляция; 5 – начальное распределение температуры; 6, 7 – распределение температуры через 3 дня после начала бетонирования соответственно с применением и без применения теплоизоляции

## 10. ОПОРЫ ДЛЯ НЕФТЕПРОВОДА

Нефтепровод представляет из себя металлическую трубу диаметром порядка 30 см. Температура нефти в трубе достигает плюс 60°C. На вечной мерзлоте в качестве опор используется пакет мешков, заполненных грунтом и уложенных непосредственно на поверхность грунта. Однако в процессе эксплуатации нефтепровода имеют место деформации опор, что ставит под угрозу возможность нормальной эксплуатации и увеличивает вероятность аварий.

Для повышения надёжности нефтепровода разработана конструкция опоры, представленная на рис. 10.1.

Отмеченные на рисунках 2.1 и 2.1,а элементы имеют следующие характеристики и назначения.

1 - основной грунт является вечномёрзлым, при этом в летний период со стороны естественной поверхности имеет место сезонное протаивание глубиной порядка 1,5 м. Температура грунта на глубине нулевых амплитуд (т.е. на глубине 10-20 м) может быть равна от минус 0,3°C до минус 3,0°C. Возможны случаи мерзлоты несливающегося типа, когда верхняя граница вечной мерзлоты расположена на 5-10 м ниже естественной поверхности, а в зимний период со стороны естественной поверхности замерзает 1,5-2,0 м. На естественной поверхности грунта находится мохорастительный слой. В зависимости от конкретных местных характеристик несущая способность и надёжность опоры будет различной, что потребует для каждого сочетания природных условий в пределах указанных выше диапазонов разрабатывать отдельные конструкции опор или изменять характеристики каждой конструкции;

2 - щебеночная подушка предназначена для обеспечения твердости поверхности опирания. При наличии мохорастительного покрова (если он не срезается), при наличии переувлажнённых грунтов в поверхностном слое щебеночная подушка играет важную роль. Особенно эффективным может оказаться устройство щебеночной подушки в зимний период, когда

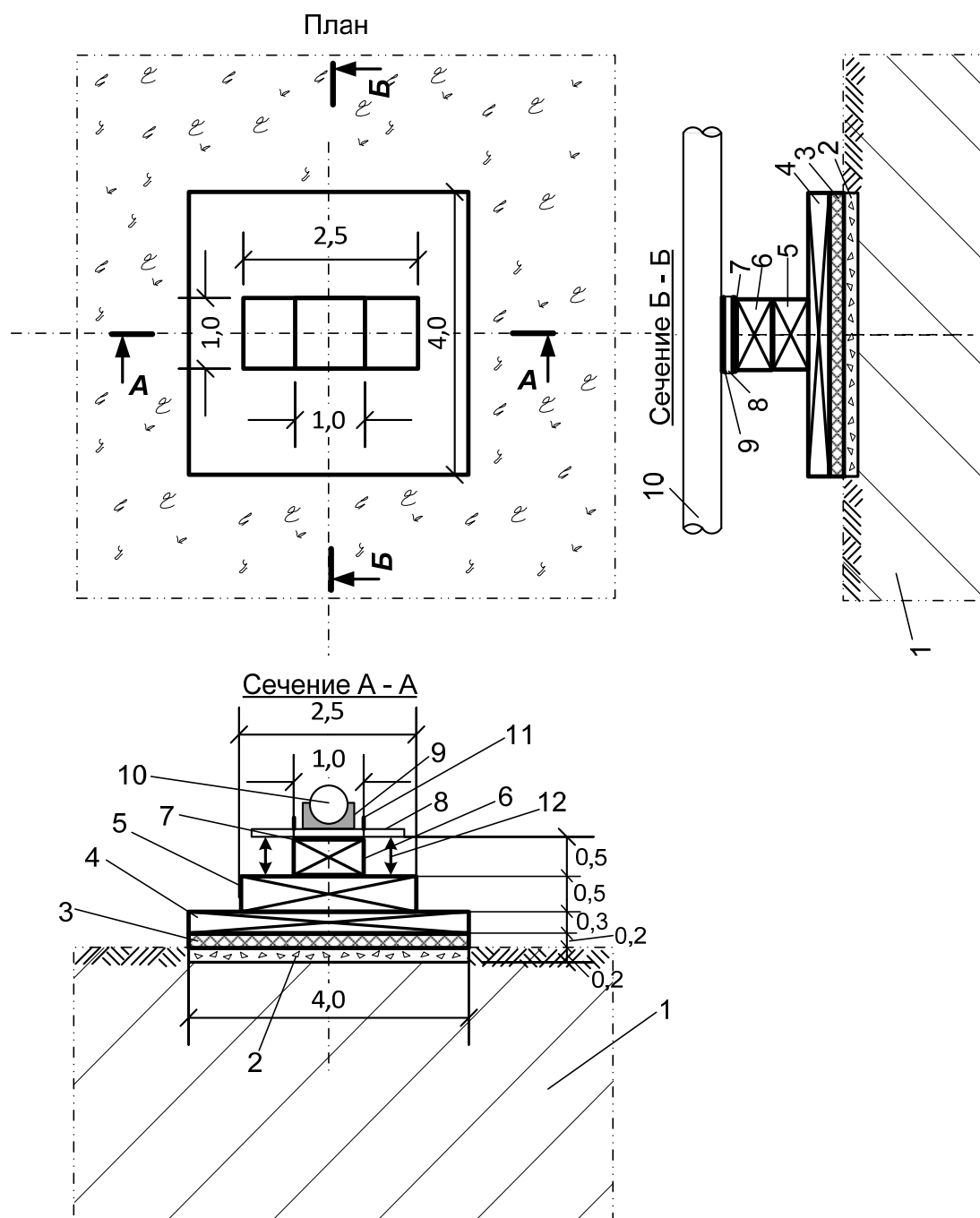


Рисунок 10.1 – Схема опоры для нефтепровода: 1 – основной грунт, 2 – щебеночная подушка, 3- пенополистирол, 4 – габионная опорная плита, 5 – распределительная плита, 6 – тело опоры, 7 – прокладка (одна или несколько) для регулирования уровня нефтепровода при неровностях рельефа, 8- опорная плита, 9-кондуктор для фиксации нефтепровода, 10- нефтепровод, 11- упоры для ограничения горизонтального перемещения кондуктора 9 по опорной плите 8, 12 – домкраты для осуществления установки прокладок 7 в процессе осадки во время эксплуатации нефтепровода

расчищенная от снега поверхность (с наличием и при отсутствии растительного покрова) является рыхлой. В случае очисток поверхности от мохорастительного покрова и наличии твердого поверхностного слоя грунта необходимость щебеночной подушки может отсутствовать;

3 - XPS ТЕХНОНИКОЛЬ служит для защиты грунта от теплового влияния опоры;

4 - габионная опорная плита имеет два назначения: защитить пенополистирол 3 и распределить давление от опоры на грунт;

5 - распределительная плита предназначена для распределения давления от тела опоры на габионную опорную плиту 4 и повысить устойчивость тела опоры 6;

6 - тело опоры предназначено для размещения на ней нефтепровода и снижения теплового влияния трубопровода на грунты (с этой целью целесообразно для тела опоры использовать габионы с более крупным камнем);

7 - прокладка для регулировки уровня нефтепровода по высоте при неровности местности или в процессе деформаций во время эксплуатации;

8 - опорная плита служит непосредственно для размещения нефтепровода 10. Она содержит упоры 11 для ограничения перемещения нефтепровода 10 с кондуктором 9 в поперечном направлении. Опорная плита должна быть шире тела опоры, чтобы ее можно было поднимать в процессе эксплуатации или монтажа для установки прокладки 7.

При неблагоприятных мерзлотно-грунтовых условиях может оказаться недостаточно надежным применение опор поверхностного типа. В этом случае потребуется переход на опоры глубинного действия – термоопоры одностоечные и двустоечные.

Требуемую прочность XPS ТЕХНОНИКОЛЬ-плит определяют расчётом.

## ЧАСТЬ ВТОРАЯ

### ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ, В КОТОРЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ ИГРАЕТ ВЕДУЩУЮ РОЛЬ

#### 11. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Теплофизический смысл теплоизоляции однозначен: теплоизоляция увеличивает термическое сопротивление прохождению тепла между двумя точками. Это может быть выражено формулой:

$$q = \frac{(t_1 - t_2) \cdot \tau}{R + R_u},$$

где  $q$  – количество тепла (ккал) происходящее между токами 1 и 2 с температурой соответственно  $t_1$  и  $t_2$  (град) за время  $\tau$  (час);

$R, R_u$  – термическое сопротивление соответственно самого материала расчетной области и теплоизоляции, час  $\cdot$  град ккал;

$$R = \frac{l}{\lambda \cdot F}, \quad R_u = \frac{\delta}{\lambda_u \cdot F},$$

где  $l$  – длина зоны (с материалом расчетной области), расположенной между точками 1 и 2, м;

$\delta$  – толщина теплоизоляции, м;

$l + \delta$  – расстояние между двумя токами 1 и 2, м;

$F$  – площадь поперечного сечения, через которые происходит тепловой поток  $m^2$ ,

$\lambda, \lambda_u$  – коэффициент теплопроводности соответственно материала и теплоизоляции ккал/(м  $\cdot$  час  $\cdot$  град).

Таким образом, теплоизоляция всегда является термическим сопротивлением, и ничем другим, но, поскольку тепловые процессы формируются в общем случае в трехмерной области с различными

тепловыми воздействиями на разных границах рассматриваемой области, соответствующая установка теплоизоляции (по месторасположению, размерами) может решать различные задачи и по-своему влиять на тепловой процесс (она может замедлять тепловой процесс, ускорять, разделять его составляющие и т.п.). Эти особенности должен знать проектировщик для правильного формирования схем конструкций и технологий.

## 12. ФУНКЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ В РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ САМОСТОЯТЕЛЬНО

1) Тепловая амортизация. Одной из главных характеристик рассматриваемых процессов является сезонность: в зимний период идет промерзание, в летний – протаивание. Теплоизоляция, уложенная на поверхности, контактирующей с наружным воздухом, позволяет уменьшить глубину протаивания и тем самым уменьшить объем грунтов, требующих замены. Для дорожных насыпей это свойство теплоизоляции позволяет бороться с пучением, а в выемках это можно использовать в борьбе с недопустимыми осадками.

2) Охлаждение грунтов оснований. Расположение теплоизоляции на естественной поверхности грунта при наличии зимой снежных отложений вызывает охлаждающий эффект. На рис. 12.1 приведена зависимость температуры грунта на глубине нулевых амплитуд от высоты снежного покрова для двух вариантов: без теплоизоляции и с теплоизоляцией на поверхности. Температура грунта на глубине нулевых амплитуд определялась расчетами для каждой толщины снега для климатических условий Салехарда. Из графиков рис. 12.1 мы видим следующее

При полностью оголенной от снега (и летом от растительного покрова) поверхности температура грунта на глубине нулевых амплитуд в обоих случаях в установленном режиме устанавливается одна и та же - примерно минус 6°C. Но далее, при увеличении толщины снега кривые резко расходятся: при толщине снега 0,3 м на глубине нулевых амплитуд устанавливается температура 0°C. (т.е. начинается деградация мерзлоты), а при наличии XPS ТЕХНОНИКОЛЬ толщиной 0,1 м температура равна минус 3,5°C. А нулевого значения температура достигает только при толщине снега 0,75 м. Именно это свойство теплоизоляции используется при укладке ее в зоне подошвы откоса ее в зоне подошвы откоса насыпи (рис. 12.2 и рис. 12.3).

3) Утепление элементов сооружений. Теплоизоляция широко используется для утепления различных трубопроводов, расположенных на открытом воздухе и в мерзлых грунтах.

4) Разделение нагреваемой и охлаждаемой зон Эти функции хорошо видны в техническом решении. «Площадка под строительный комплекс» (гл. 4). Это техническое решение предусматривает наличие насыпного планировочного слоя 1, который содержит два яруса: верхний (защитный) 4 и нижний (охлаждающий) 3. Верхний и нижний ярусы разделены теплоизоляцией, которая, во-первых, способствует сохранению холода в грунтах оснований, а во-вторых, способствует быстрому нагреву в летней период верхнего яруса, что способствует созданию благоприятных условий для растительности.

5) Замедление процесса охлаждения.

На рис. 12.2 представлена колонка грунта, условно вырезанная по глубине в естественном массиве грунта. Колонка имеет площадь поперечного сечения  $2,0 \times 1,0$  м. Сопоставлялись два процесса: замерзание грунта по глубине при абсолютно оголенной круглой год верхней поверхности и при наличии на ней теплоизоляции. Начальное состояние грунта талое. Температура воздуха приведена в строчке 1 табл. 12.1, а коэффициенты теплопередачи для обоих вариантов – в строчках 2 и 3. Коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта приняты соответственно 1,6 и 1,9 ккал / (м· час ·град), объемная теплоемкость талого и мерзлого грунта 650 и 500 ккал/(м<sup>3</sup>·град), скрытые теплоты 20000 ккал/м<sup>3</sup>. Скорость промерзания для оголенной поверхности представлена на рис. 12.3 кривой 1, а при наличии теплоизоляции – кривой 2. Из этих графиков видно, что при наличии теплоизоляции на поверхности и при одинаковых условиях теплообмена зимой и летом теплоизоляция существенно может замедлить процесс замерзания.



### 13. ФУНКЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ В РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ

#### 1) Замедление процесса охлаждения.

Фактически строительное сооружение контактирует с наружными воздухом по нескольким зонам с различными граничными условиями, и поведение каждого граничного условия определяется не только характеристикой самого граничного условия, но и характеристикой граничных условий в смежных зонах. Если на рис. 12.2 общую колонку шириной 2,0 м разделим на 2 колонки шириной по 1,0 м и для каждой колонки зададим свои граничные условия, то мы увидим, что в системе работа изменяется. Например, если на половине верхней поверхности обеспечить полностью круглых год оголенную поверхность (коэффициент теплопередачи  $A_1$  из строчки 2 табл. 12.1), а на другой половине обеспечить круглый год одинаковую во времени теплоизоляцию (коэффициент теплопроводности  $A$  из строчка 3 табл. 12.1), то будет тоже замедление процесса (кривая 3 на рис 12.3). Но эффект замедления процесса количественно составляет не 50% от варианта с полным покрытием теплоизоляцией, а значительно меньше.

2) Ускорение процесса охлаждения. Принципиально другой (т.е. обратный) эффект теплоизоляция дает, если поверхность зимой покрыта снегом. На рис. 13.1 кривой 1 показан случай, когда в сдвоенной колонке грунта (рис. 12.2) на одной стороне полностью круглый год оголенная поверхность (коэффициент теплопередачи  $A_1$  из строки 2 табл. 12.1), а на другой стороне зимой снег, а летом оголенная поверхность (коэффициент теплопередачи  $A_3$  из строки 4 табл. 12.1). Если же мы вместо  $A_3$  примем  $A_4$  (добавлена теплоизоляция), то процесс замораживания представлен кривой 2 на рис. 13.1. Мы видим ускорение процесса охлаждения. В практике эта условная схема соответствует реальной схеме на рис. 2.2,б (дорожная насыпь).

3) Улучшение расчетного температурного поля при сочетании теплоизоляции с поверхностным охлаждением.

В разделе 2.2 наглядно показана эффективность разрывов при укладке теплоизоляции: уменьшение суммарной ширины теплоизоляции приводит не к снижению, а к повышению эффективности.

4) Улучшенные расчетные температурные поля при сочетании теплоизоляции с глубинным охлаждением (см. раздел 6 «Термоопоры»).

5) Улучшение расчетного температурного поля с боковым охлаждением (см. раздел 7 «Отдельное здание»).

Таблица 12.1 - Приведенные температуры воздуха  $t$  (град) и коэффициенты теплопередачи  $A$  ( ккал/(м<sup>2</sup>· час·град))

№№ п/п	Параметры	Месяцы года											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$t$	-23,6	-22,2	-18,3	-6,4	+1,4	+10,8	+18,8	+14,6	+8,4	-3,7	-15,3	-21,2
2	$A_1$	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
3	$A_2$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
4	$A_3$	0,33	0,33	0,33	0,36	0,56	2,27	20,0	20,0	20,0	2,06	0,75	0,44
5	$A_4$	0,20	0,20	0,20	0,21	0,26	0,41	0,49	0,49	0,49	0,40	0,43	0,23

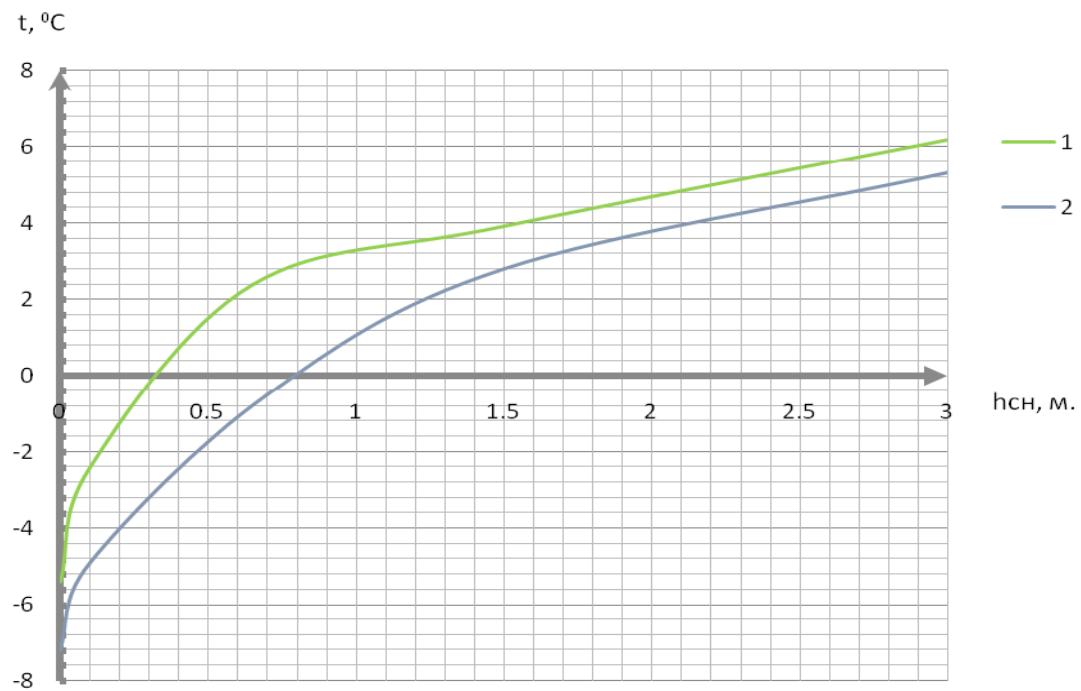


Рисунок 12.1 - Зависимость температуры на глубине нулевых амплитуд от высоты снежного покрова для вариантов берм: 1 - из обычного грунта, 2 - из обычного грунта с XPS ТЕХНОНИКОЛЬ 0.1 м

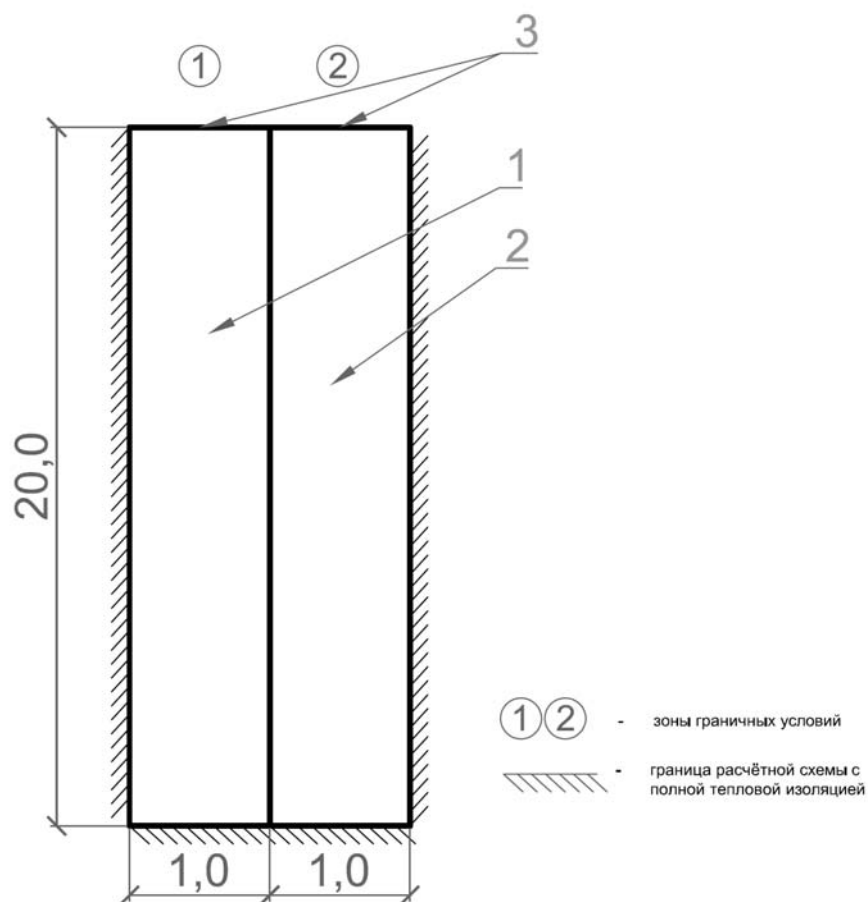


Рисунок 12.2 - Расчётная схема для выполнения замедляющего и ускоряющего эффектов теплоизоляции: 1,2 – сопоставительные колонки грунта; 3 - естественная поверхность грунта

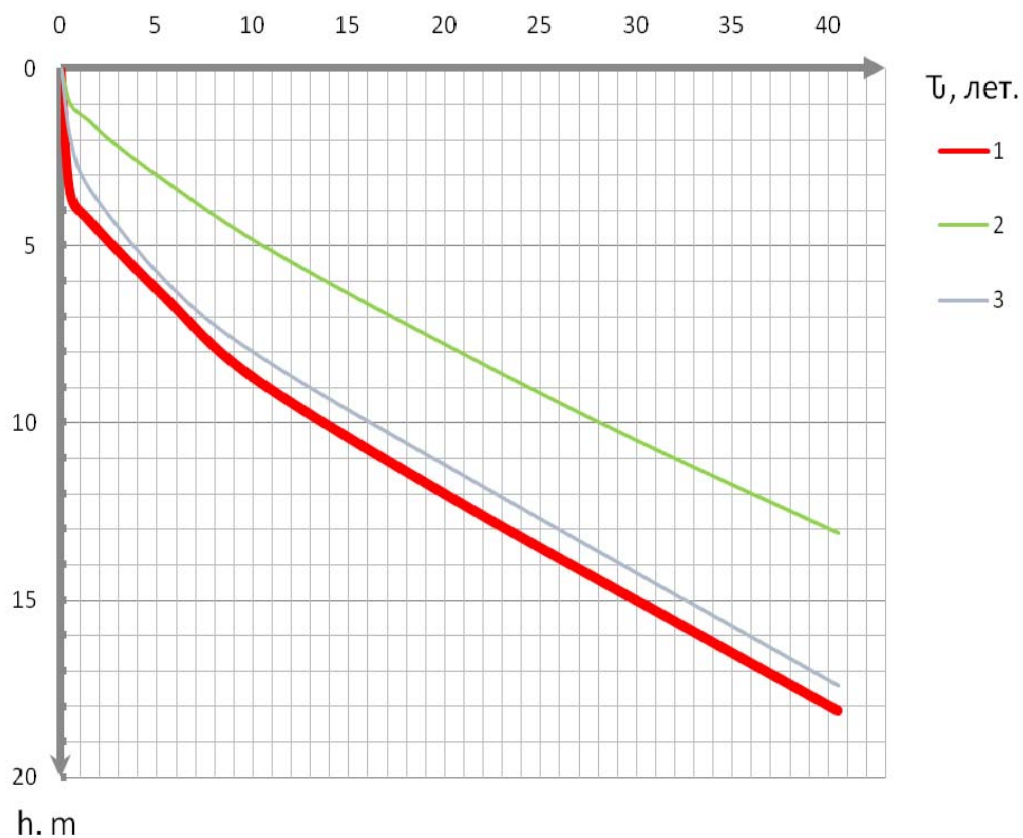


Рисунок 12.3 - Изменение по времени ( $T$ ) глубины ( $h$ ) промерзания в зависимости от условий на поверхности (эффект замедления процесса промерзания при теплоизоляции): 1 - при отсутствии теплоизоляции; 2- при наличии на всей поверхности теплоизоляции; 3 - при наличии теплоизоляции на 50% поверхности

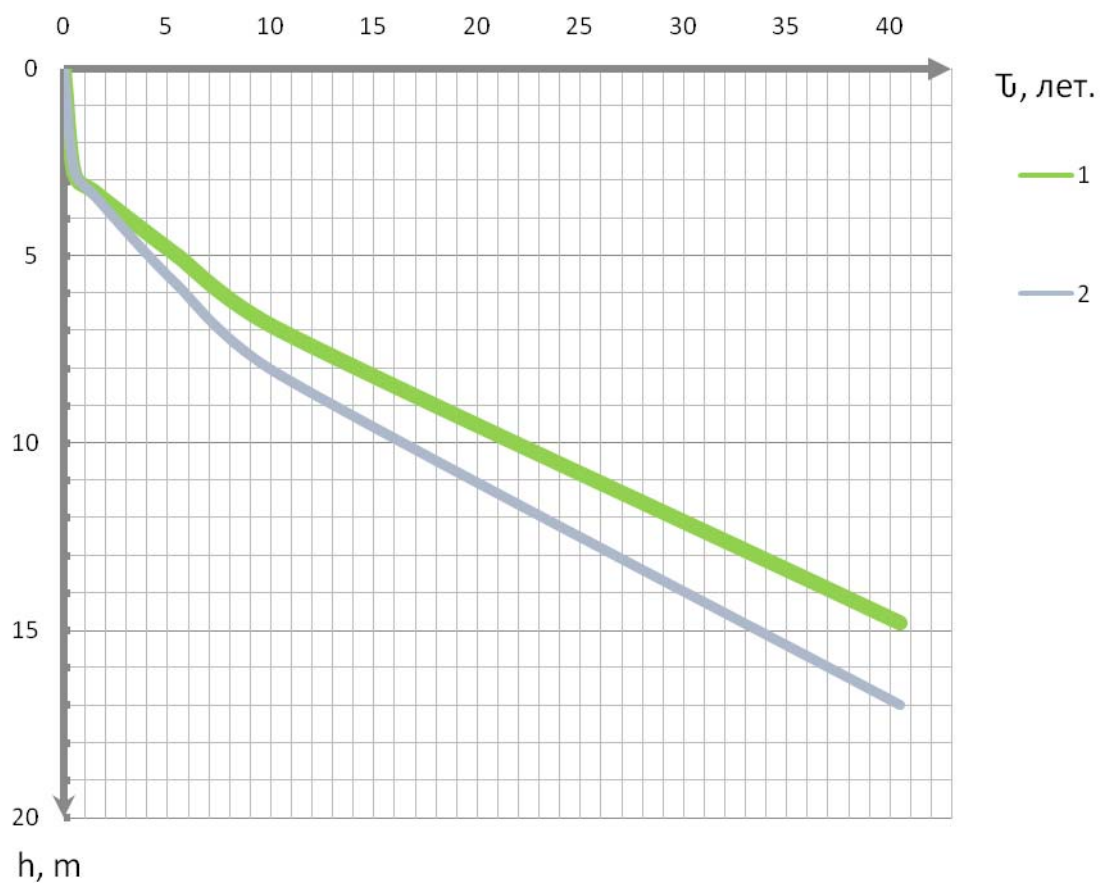


Рисунок 13.1 - Изменение во времени ( $T$ ) глубины ( $h$ ) промерзания в зависимости от условий на поверхности (эффект ускорения процесса промерзания при наличии теплоизоляции): 1 – при отсутствии теплоизоляции; 2 – при наличии теплоизоляции

## 14. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Теплофизическая сущность теплоизоляции одна - это термическое сопротивление, но размещенная в различных частях строительного сооружения она может выполнять целый комплекс различных функций. Самостоятельно она может выполнять функции тепловой амортизации, охлаждения грунтов, утепления элементов сооружений, разделения нагреваемой и охлаждаемой зон, замедления процесса охлаждения. В системе с другими мероприятиями она может выполнять функции замедления процесса замораживания, ускорения процесса замораживания, улучшения расчетного температурного поля. Зачастую одновременно выполняются, две и более функции;

2) Применение на вечной мерзлоте теплоизоляции в виде пенополистирола XPS ТЕХНОНИКОЛЬ актуально и важно для широкого круга различных объектов, в т.ч.:

- насыпи железных и автомобильных дорог. Теплоизоляция размещается в зоне откосов и прилегающей к подошве откоса территории;
- выемки железных и автомобильных дорог. Теплоизоляция размещается в зоне основной площадки и на откосах;
- мосты. Теплоизоляция размещается в зоне промежуточных опор и конусов устоев;
- водопропускные трубы. Теплоизоляция размещается как непосредственно под телом трубы, так и под трубой в теле насыпи для создания разгружающих мёрзлых массивов;
- здания. Теплоизоляция размещается как непосредственно под зданием, так и рядом с ним в зоне теплового влияния;
- площадка под строительный комплекс. Теплоизоляция размещается в средней по высоте зоне насыпной площадки над горизонтальными охлаждающими установками;



- различные специальные объекты (опоры для нефтепроводов, электролиний, защитные системы и др.) и технологии (бетонирование, отсыпка земляных сооружений и др.);

3) Применение теплоизоляции позволяет резко снизить стоимость сооружения, снизить время ввода в эксплуатацию, повысить надёжность