Корпорация ТЕХНОНИКОЛЬ
129110, Россия, Москва, улица Гиляровского, дом 47, строение 5
тел.: +7 495 925 57 75, факс: +7 495 925 81 55, www.tn.ru, info@tn.ru

Исх. № 212375 - 13.12.2025/
Информационная статья от: 04.04.2025

Возведение дорог на многолетнемерзлых основаниях и современные решения по их термостабилизации

Россия занимает наибольшую часть суши, и эта территория в большей степени подвержена воздействию суровых климатических условий. Порядка 65% территории России покрыты основаниями из многолетнемерзлых грунтов (ММГ) или вечной мерзлотой, как обычно говорили ранее. Там сосредоточена огромная часть месторождений полезных ископаемых, запасы которых предстоит осваивать.

Реалии геополитической ситуации также отводят определенную роль данным регионам: развитие транспортных связей с Востоком требуют развития Северных и Арктических регионов, совершенствование грузового коридора Северного морского пути и ряд других крупных инфраструктурных проектов. Эти регионы еще только начинают активно развиваться и их потенциал, несомненно, огромен.

Для чего нужна теплоизоляция в зоне многолетнемерзлых грунтов

При освоении Северных регионов одним из первых встает вопрос строительства железных и автомобильных дорог, который сопряжен с большими трудностями. Строительство на вечной мерзлоте приводит к нарушению сложившегося в естественных условиях теплового баланса и, как следствие, к деградации мерзлоты и к деформациям сооружений.

Чтобы предотвратить отрицательное влияние строительства и обеспечить безопасность возводимых сооружений, применяется целый комплекс конструктивно-технологических мероприятий. В большинстве этих мероприятий важной составляющей является теплоизоляция. Однако сегодня теория её применения при сооружении дорог на многолетнемерзлых грунтах отражает не все практические вопросы, что требует проведения специальных исследований.

Исследования теплофизических процессов в конструкциях дорожных насыпей

ТЕХНОНИКОЛЬ — международный производитель строительных материалов и систем. Сегодня компания уделяет большое внимание производству и применению теплоизоляции из экструзионного пенополистирола (XPS) в дорожном строительстве.

Для развития этого направления Центральная лаборатория инженерной теплофизики (ООО «ЦЛИТ») совместно с Компанией провела большое исследование и выпустила «Рекомендации по применению теплоизоляции для стабилизации температурного режима грунтов основания и тела дорожных насыпей в зоне вечной мерзлоты». Результаты описаны ниже.

В исследовании детально изучены теплофизические процессы в конструкциях дорожных насыпей. В соответствии с теорией математической физики они представлены краевой задачей, когда твёрдое тело произвольной формы и размеров омывается жидкой или газообразной средой. При этом температурный режим в пределах этого тела определяется однозначно, если заданы **пять групп параметров**:

1. Граничные условия (изменение во времени температуры жидкой или газообразной среды и условия теплообмена между этой средой и твёрдым телом, т.е. коэффициент теплопередачи).

2. Конфигурация и размеры тела.

3. Начальная температура тела.

4. Теплофизические характеристики материала тела.

5. Закон теплопередачи в пределах тела.

После возведения сооружения температурный режим грунтов основания в пределах зоны теплового влияния изменяется полностью по сравнению с естественными условиями и соответствует условиям построенной конструкции. Поэтому при проектировании должен быть заложен ряд мероприятий по термостабилизации, которые формируют расчётный температурный режим, обеспечивающий несущую способность и долговечность конструкции.

Учет сезонного протаивания при строительстве дорог

Одна из главных геотехнических характеристик на мерзлоте — глубина сезонного протаивания, которая важна как в пределах основной площадки, так и в пределах откосов и на прилегающей к откосам территории.

Строительные решения, в частности, должны быть направлены на максимальное снижение глубины сезонного протаивания. В пределах основной площадки снижение глубины сезонного протаивания позволяет уменьшить пучение, а в пределах откосов и смежной территории —

увеличить устойчивость насыпи, повысить несущую способность основания. Кроме того, это позволяет увеличить долю использования мёрзлых местных грунтов, снизить потребность в привозном высококачественном грунте.

> Мероприятия по термостабилизации строятся на подборе значений всех пяти вышеназванных групп параметров, при которых зимой в грунт холода поступает больше, чем летом тепла, т.е. создаётся отрицательный тепловой баланс. Этот баланс должен обеспечиваться ежегодно.

Рассмотрим подробнее, что входит в мероприятия по термостабилизации дорог:

Сочетание разных систем при устройстве

Перечень мероприятий широк, принципы их действия, эффективность, область действия, стоимость и т.п. различны. Классификация достаточно обширна, поэтому в статье не приводится. Стоит отметить, что каждое мероприятие имеет свою область эффективности, свои достоинства и недостатки. Поэтому целесообразно создавать системы из двух и более мероприятий. Такие системы позволяют объединить положительные свойства и парализовать отрицательные свойства. В результате суммарный эффект получается выше суммы эффектов.

Использование численных методов расчета температурного режима

Все закладываемые в проектное решение мероприятия должны быть тщательно проработаны, а возводимые конструкции проверены теплотехническими расчетами. В настоящее время обоснован целый ряд методов расчёта температурного режима. Наиболее популярными и точными сегодня являются численные методы, основанные на конечно элементной модели, которые активно используются мощными программными комплексами, например, Frost 3D.

Исследование показало, что применение теплоизоляции в мероприятиях по термостабилизации ММГ несет достаточно простой теплофизический смысл, который однозначен: ***теплоизоляция увеличивает термическое сопротивление прохождению тепла между двумя средами. Таким образом, теплоизоляция всегда является дополнительным термическим сопротивлением.***

Учет разнообразного воздействия теплоизоляции

Поскольку тепловые процессы формируются в общем случае в трёхмерной области с различными тепловыми воздействиями на разных границах рассматриваемой области, соответствующая установка теплоизоляции (по месту расположения, по форме воплощения, по размерам) может решать различные задачи и по-своему влияет на тепловой процесс: она может замедлять тепловой процесс, ускорять, разделять его составляющие и т.п.

Многообразие тепловых процессов, на которые влияет теплоизоляция, приведено на рисунке 1.

Рисунок 1. Функции теплоизоляции

Основные функции теплоизоляции

При возведении дорожных насыпей в условиях распространения ММГ теплоизоляция выполняет две основные функции — амортизацию и охлаждение.

Амортизация

Наиболее оптимальным методом снижения глубины сезонного протаивания, как показывает практика, является теплоизоляция, поэтому она является составной частью большинства комплексов мероприятий по стабилизации температурного режима грунтов. В этом случае теплоизоляция относится к мероприятиям всесезонного действия и выполняет

амортизационную функцию, что наглядно показано на рисунке 2:

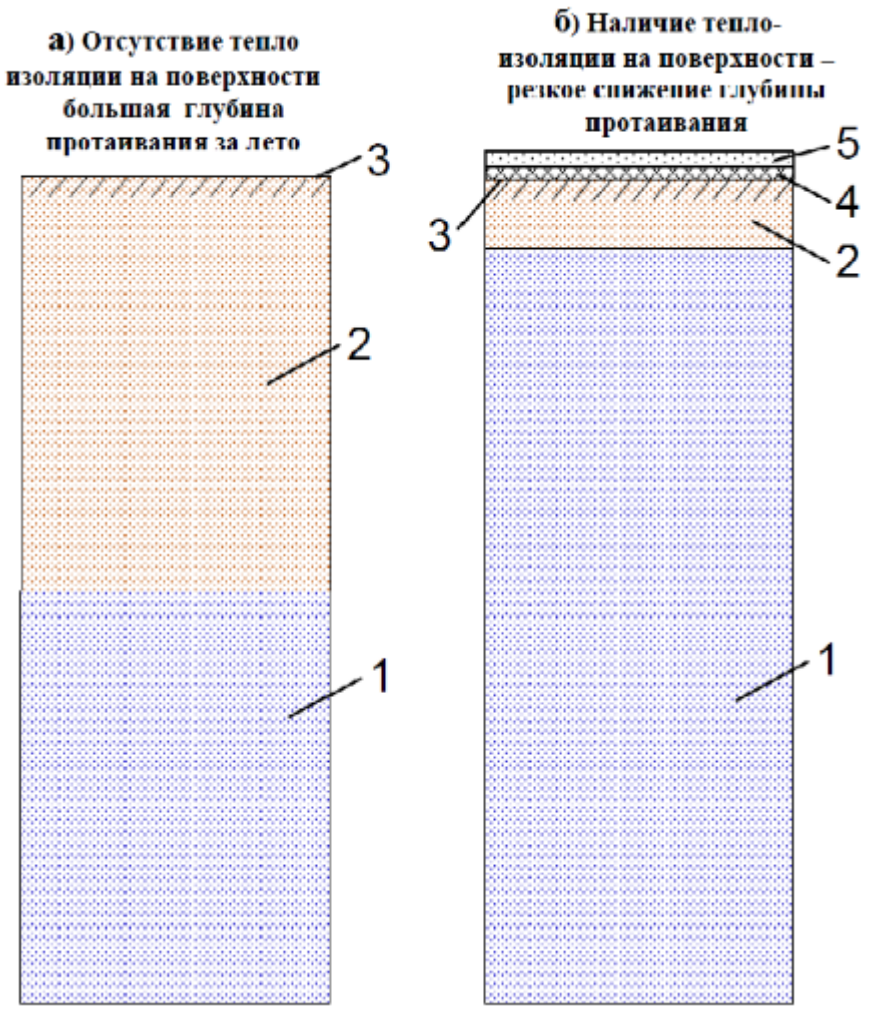

Рисунок 2. Тепловая амортизация при укладке теплоизоляции на поверхности грунта (1,2 – мёрзлый и талый грунт на момент окончания тёплого периода года, 3 – естественная поверхность, 4 – теплоизоляция, 5 – защитный слой)

Эта функция выражается в уменьшении глубины сезонного протаивания, что является важным при проектировании выемок, нулевых мест на грунтах, сильнопросадочных при оттаивании, насыпей с целью сохранения грунтов в мёрзлом состоянии при зимней отсыпке, а также для снижения опасности пучения.

Охлаждение

Расположение теплоизоляции на естественной поверхности грунта при наличии зимой значительных снежных отложений вызывает охлаждающий эффект, являясь в этом случае мероприятием летнего действия. На рисунке 3 приведена принципиальная зависимость температуры грунта на глубине нулевых амплитуд от высоты снежного покрова для двух вариантов: без теплоизоляции и с теплоизоляцией на поверхности.

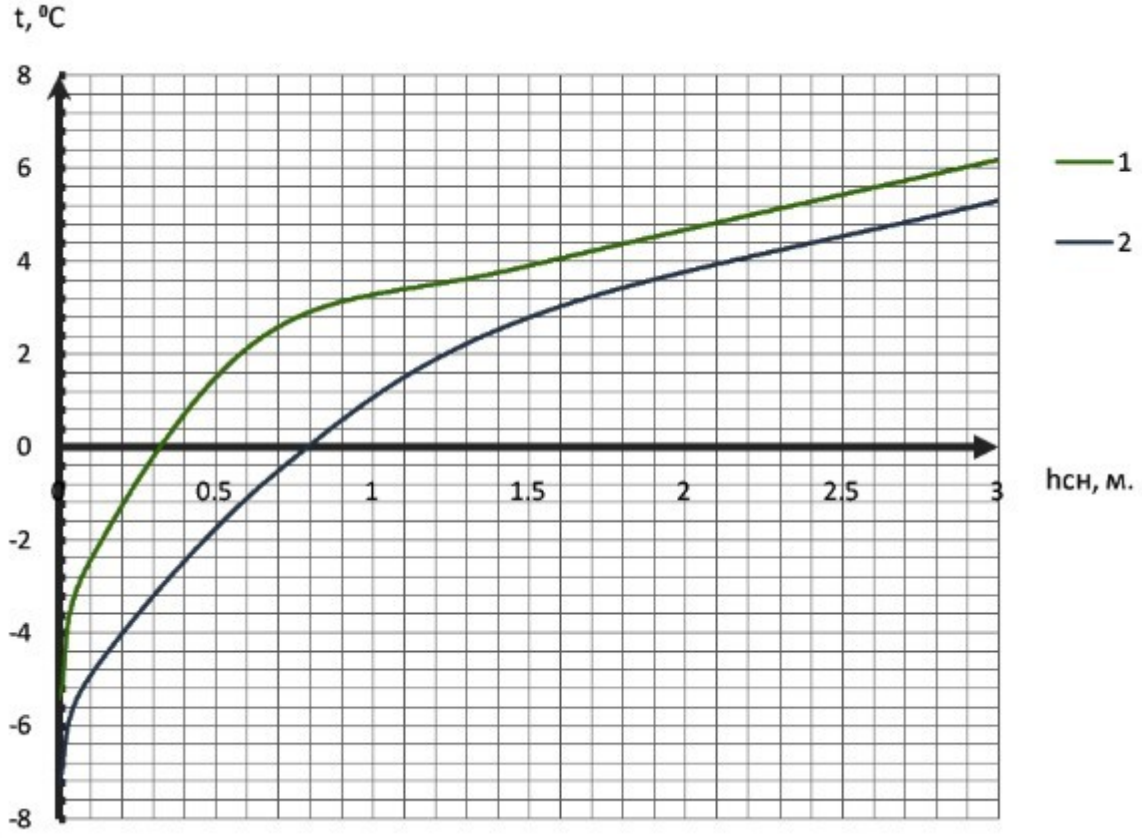

Рисунок 3. Зависимость температуры на глубине нулевых амплитуд от высоты снежного покрова по климатическим условиям г. Салехард (1 – для бермы из обычного грунта, 2 – для бермы из обычного грунта со слоем XPS ТЕХНОНИКОЛЬ толщиной 0,1 м)

Из графика видно, что при полностью оголенной от снега поверхности, температура грунта на глубине нулевых амплитуд в обоих случаях в установившемся режиме одинакова — примерно -6°С.

Но при увеличении толщины снежного покрова кривые резко расходятся: при толщине снега 0,3 м на глубине нулевых амплитуд устанавливается температура 0°С (т.е. начинается деградация мерзлоты), а при наличии пенополистирола XPS ТЕХНОНИКОЛЬ толщиной 0,1 м температура устанавливается на -3,5°С, нулевого значения температура достигает только при толщине снега 0,75 м.

Укладка теплоизоляции, снижая соотношение зимнего и летнего термических сопротивлений на поверхности, приводит к оптимизации распределения температуры, в корне меняя температурный режим грунтов тела и основания насыпи.

На рисунке 4 показано влияние теплоизоляции на температурный режим грунтов:

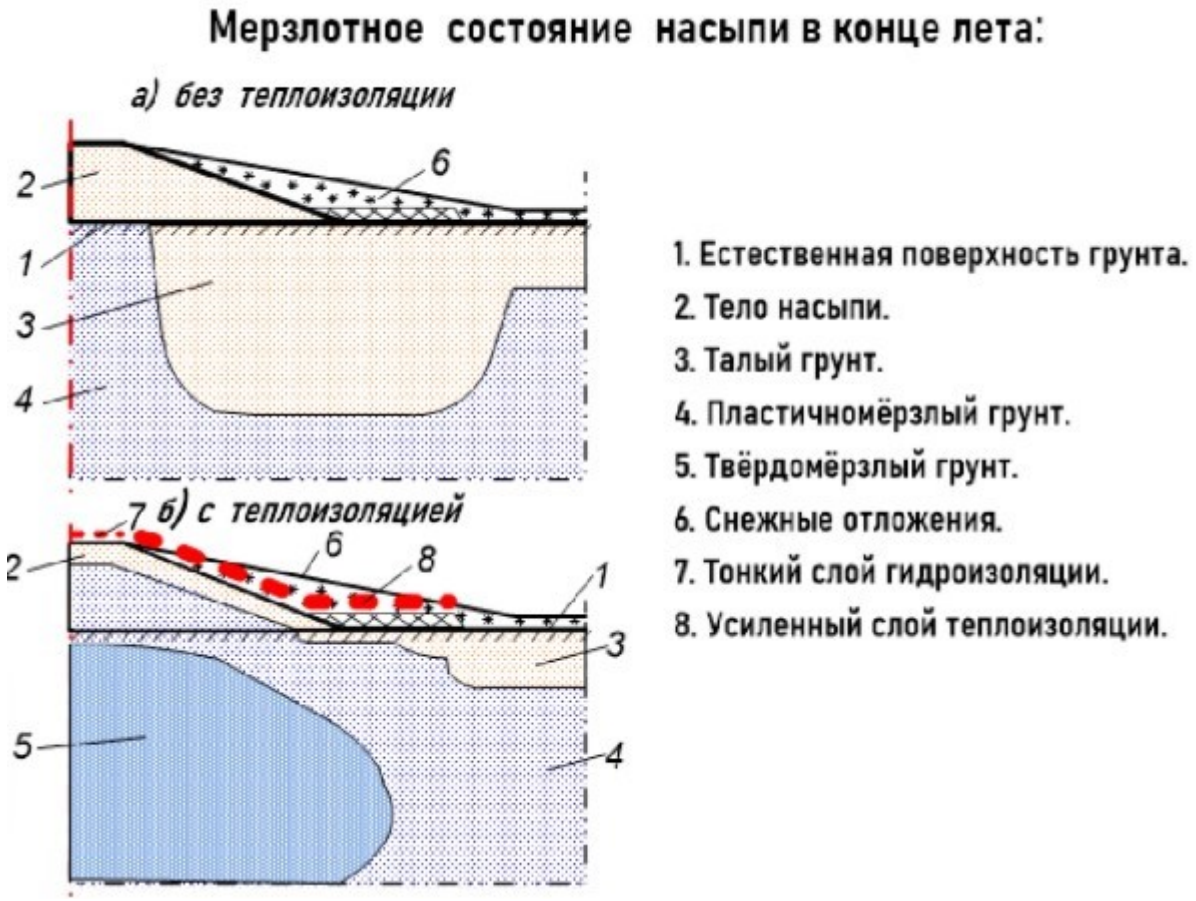

Рисунок 4. Принципиальная схема охлаждающего влияния теплоизоляции

На основании данных результатов с учетом 90-летнего опыта Лаборатории инженерной теплофизики (ООО «ЦЛИТ») по исследованию мерзлотных процессов, разработке методов математического моделирования этих процессов, разработке новых конструкций и технологий для применения на вечной мерзлоте, выработана методика учёта теплоизоляции при проектировании термостабилизации грунтов оснований и тела насыпи. Проведены практические расчеты с назначением конкретных мероприятий по термостабилизации ММГ с использованием теплоизоляции, вошедшие в Рекомендации.

Влияние снегопереноса на тепловой режим дорог

Установлено, что уровень снегопереноса оказывает определяющее влияние на количество снежных отложений на откосах насыпи, что прямо отражается на тепловом режиме, а температурные показатели воздуха и грунтов, в действительности, не столь существенны, как ранее считалось.

В Рекомендациях приведены расчеты и обоснования конструкций насыпей для различных климатических условий. Для этого на территории России выделено 5 регионов по снегопереносу, представленные в таблице 1 и на рисунке 5.

Таблица 1. Снегоперенос и уклон максимальных поверхностей снежных отложений у насыпи по регионам.

Регион	Снегоперенос, м3/м	Уклон поверхностей снежных отложений
I	более 1001	1:10
II	501-1000	1:7
III	351-500	1:5
IV	101- 350	1:3
V	менее 100	0

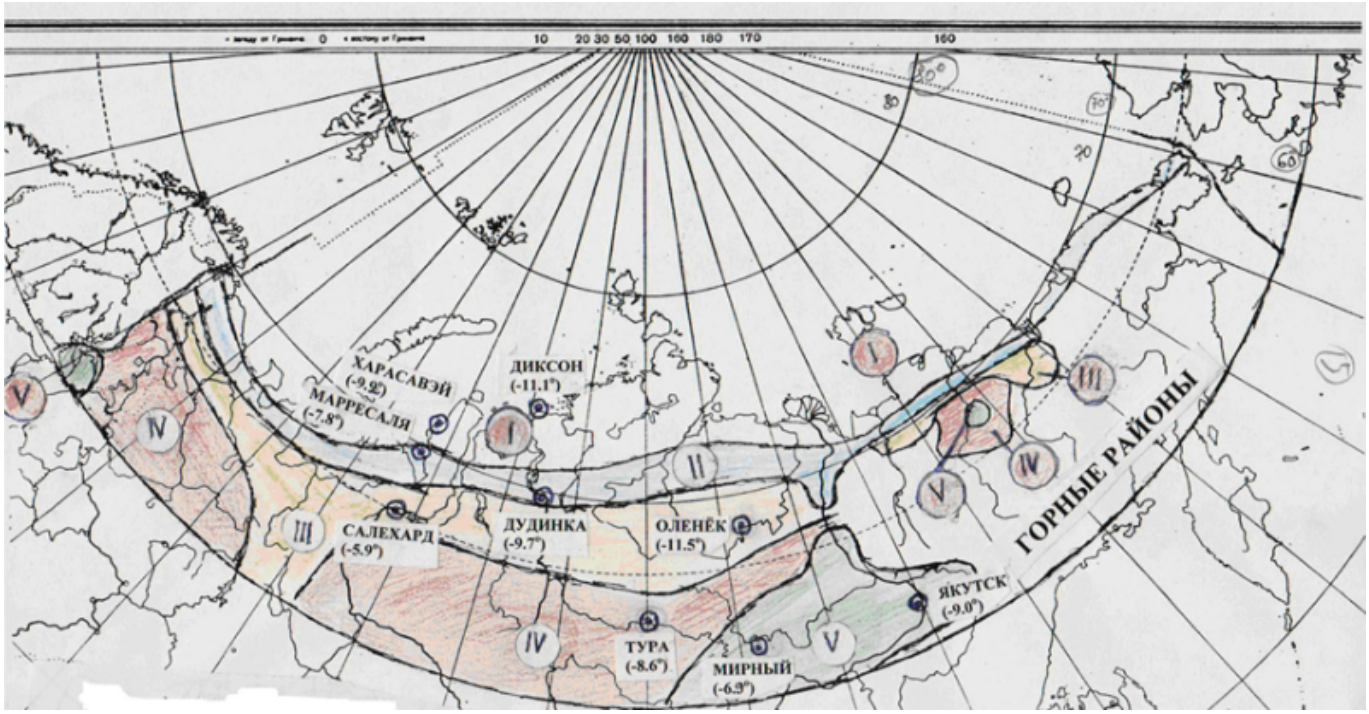

Рисунок 5. Схема расположения опорных пунктов в регионах с различным снегопереносом

Возведение дорог на мерзлоте несливающегося типа

Сложности строительства

Отдельно изучены вопросы строительства на мерзлоте несливающегося типа, то есть когда в результате сезонного промерзания в конце зимнего периода остаётся талая прослойка грунта. Это также может быть и в случае, когда в естественных условиях изменились граничные условия на поверхности с деградацией мерзлоты с поверхности, и в случае, когда высота земляного сооружения превышает глубину сезонного промерзания.

Проблемой при таком мерзлотном состоянии грунтов является то, что нижележащая мерзлота, не имея подпитки холода сверху, начинает растепляться, увеличивается деформативность грунта, зона деформации сооружения увеличивается по высоте.

Решения

При строительстве насыпей на мерзлоте несливающегося типа по первому принципу (то есть с восстановлением мерзлоты в грунтах основания и тела сооружения) возможно применение поверхностного охлаждения. В этом случае на поверхности самого сооружения и прилегающей

территории применяются мероприятия по охлаждению: развиваются элементы поверхности, оголённые зимой от снега (охлаждающие площадки), применяется тепловые диоды, теплоизоляция и т.д.

В результате в процессе эксплуатации сооружения постепенно происходит замерзание талого слоя и образование мерзлоты сливающегося типа. Однако имеется значительный недостаток — медленность процесса замерзания, который может длиться много лет. Поэтому данное решение, как самостоятельное, применимо при небольших толщинах талого слоя (1,0–1,5 м).

Также возможно применение глубинного замораживания талого слоя охлаждающими устройствами, например, сезонного действия (СОУ). При благоприятном стечении обстоятельств замораживание можно осуществить за один зимний сезон.

Однако недостатками такой схемы являются:

- большой расход термостабилизаторов (они устанавливаются на всю глубину талого слоя, а в плане – через 1,5–2,5 м друг от друга) значительно увеличивает стоимость работ;
- устройства не везде могут быть установлены (снежные заносы в зоне сооружений достигают иногда 2-3 м и полностью закрывают теплообменники);
- теплообменники термостабилизаторов над поверхностью земли выступают на 1,0–1,5 м по высоте и при расстоянии между собой 1,5–2,5 м загромождают территорию.

Поэтому оптимальным является система мероприятий, основанная на принципе поддержания температуры нижележащей мерзлоты. Несущая способность сооружения рассчитывается исходя из условия стабильности нижележащей мерзлоты и талого состояния грунтов вышележащих слоёв.

Деформации вышележащих талых слоёв проявляются достаточно быстро, а далее идёт постепенное замораживание этих слоёв снизу. В эксплуатации сооружение можно принимать сразу после постройки.

Данное состояние достигается сочетанием глубинного и поверхностного охлаждения, при этом объемы данных мероприятий снижаются относительно их отдельного применения (например, уменьшается количество СОУ, уменьшается толщина теплоизоляции).

Помимо прочего, при разработке мероприятий по стабилизации температурного режима следует учитывать глобальное потепление климата, которое имеет место последние 100 лет. Процесс потепления идет неравномерно: периоды быстрого потепления сменяются периодами похолодания. При повышении среднегодовой температуры воздуха изменяться характер работы различных мероприятий по термостабилизации грунтов, что нужно учитывать при выполнении расчетов термостабилизации.

Заключение

Проведенное исследование позволило:

- показать многочисленность теплофизических функций, выполняемых теплоизоляцией (амортизация тепловых процессов, охлаждение, замедление, ускорение теплового процесса и др.);

- разработать методику учёта теплоизоляции при проектировании системы стабилизации температурного режима грунтов оснований и тела насыпей;

- понять особенности применения теплоизоляции при строительстве на мерзлоте несливающегося типа;

- получить рациональные принципиальные схемы поперечных сечений насыпи для различных регионов и условий.

Строительство дорог в зоне распространения многолетнемерзлых оснований практически всегда требует специальных решений по термостабилизации температурного режима грунтов. Данные мероприятия очень разнообразны и в разных случаях работают по разному, многогранность проходящих тепловых процессов требует тщательного изучения условий работы конструкции дороги. Теплоизоляция при термостабилизации может выступать как самостоятельное решение, так и как дополняющее, для увелечения общей эффективности специальных мероприятий.

Автор статьи:
Ярослав Хомяков
Технический специалист направления «Теплоизоляционные материалы XPS. Транспортно-дорожное строительство»