

# ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСТРУЗИОННЫХ ПЕНОПОЛИСТИРОЛОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ

**З**она распространения вечномерзлых грунтов составляет 66% территории РФ, в ней сосредоточена большая часть полезных ископаемых, в том числе углеводородов, следовательно, она будет осваиваться. Это обстоятельство подтверждает принятая новая «Стратегия развития Арктической зоны России и обеспечения национальной безопасности до 2035 года». Тема развития Севера становится все более актуальной. Освоение края не может быть осуществлено без строительства автомобильных дорог.

В связи со сложными и особо сложными грунтово-гидрологическими условиями сооружать насыпи целесообразно в соответствии с первым принципом проектирования, который заключается в поднятии верхнего горизонта вечной мерзлоты не ниже подошвы насыпи и сохранении его на этом уровне на весь период эксплуатации сооружения.

Для того чтобы оттаивание основания не происходило, требуется сооружение насыпи высотой, как правило, не менее 2 м, а на юге зоны вечной мерзлоты — значительно выше. Сооружение высоких насыпей сопряжено с рядом трудностей: широко распространенные в регионе пылеватые и засоленные грунты мало пригодны для сооружения насыпей, отсыпку насыпи

осуществляют в зимнее время преимущественно из сыпуче- и сухомерзлых грунтов, осушение и заготовку которых производят в летнее время.

Снизить стоимость строительства и сократить его сроки позволит снижение высоты насыпи, при этом сохранение основания в мерзлом состоянии обеспечивается применением теплоизолирующих материалов. Экструзионный пенополистирол по всем параметрам наиболее подходит для этой цели.

**Экструзионный пенополистирол (XPS)** — это жесткий теплоизоляционный материал с закрытой ячеистой структурой, полученный методом экструзии (выдавливания) полистирола или одного из его сополимеров с добавкой вспенивающих реагентов, с образованием или без образования пленки на его поверхности.

При определенных температуре и давлении гранулы полистирола смешивают с реагентами и добавками, затем помещают в экструдер. Готовая плита обладает мелкоячеистой структурой. Ячейки расположены вплотную, благодаря чему материал не впитывает влагу. Экструзионный пенополистирол обладает следующими характеристиками: прочность на сжатие 300–1000 КПа, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,031$  Вт/(мК); водопоглощение не более 0,2%.

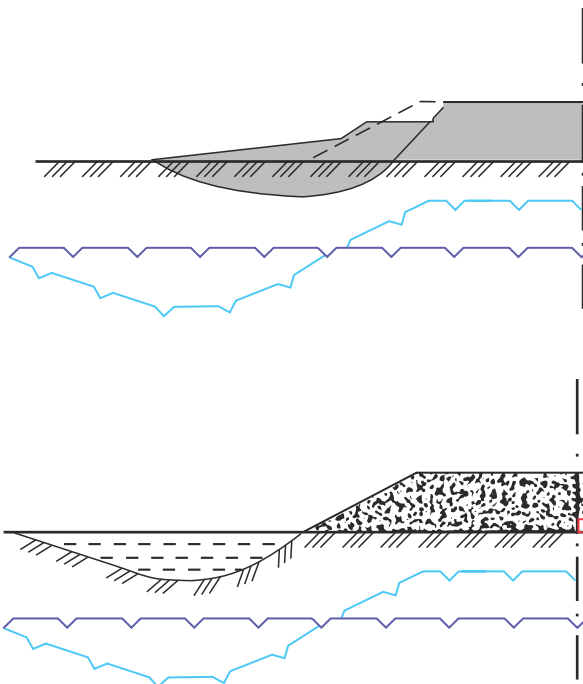


Рис. 1. Деформация откосов насыпи



Экструзионные пенополистиролы отечественного производства были применены впервые для устройства теплоизолирующего слоя в средней полосе в 2000 году. Целью применения теплоизоляции было предотвращение промерзания и, соответственно, морозного пучения. Научное сопровождение проекта осуществлял СоюзДорНИИ. Были сформулированы требования к теплоизоляторам, применяемым в дорожном строительстве. Результаты наблюдений и испытаний позволили установить, что свойства экструдированных пенополистиролов соответствуют требованиям, предъявляемым к теплоизолирующим материалам, используемым в дорожном строительстве.

В зоне вечной мерзлоты снижение высоты насыпи за счет применения теплоизоляторов дает существенный экономический эффект, поэтому экструзионные пенополистиролы находят широкое применение. Главная задача проектирования состоит в том, чтобы обоснованно назначить толщину теплоизолирующего слоя, а также его расположение в дорожной конструкции, исходя из допустимой глубины оттаивания основания к концу срока службы сооружения.

Основной особенностью зоны вечной мерзлоты является изменение водно-теплого режима основания земляного полотна и прилегающей к нему полосы на расстоянии 5–20 м от подошвы вследствие строительства дороги.

До начала строительства в регионе существует сложившийся тепловой режим, отличающийся постоянной мощностью деятельного слоя и характеризуемый определенными граничными условиями, в частности особенностями теплоотдачи с поверхности грунта. Строительство дороги вызывает изменение граничных условий.

В результате сооружения насыпи:

- увеличивается объем снежных отложений в нижней части откосов, по сравнению с фоновым, что препятствует охлаждению мерзлых грунтов;

- в процессе строительства разрушается мохорастительный покров вдоль насыпи, который является природным теплоизолятором;
- у подошвы насыпи скапливается вода, оказывающая согревающее воздействие.

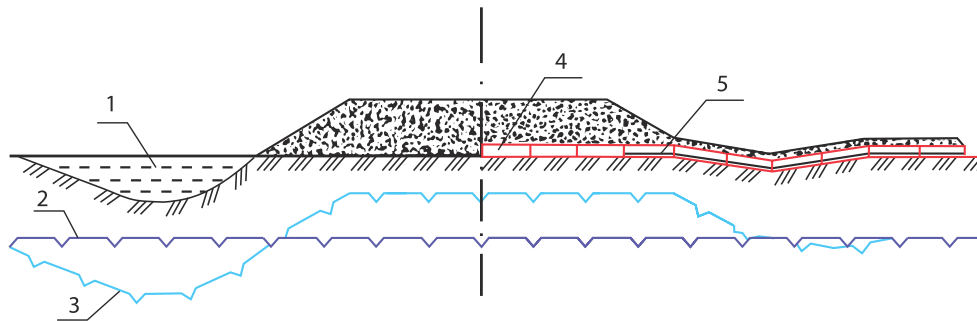
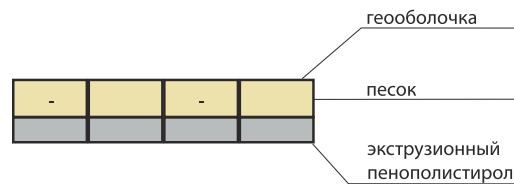
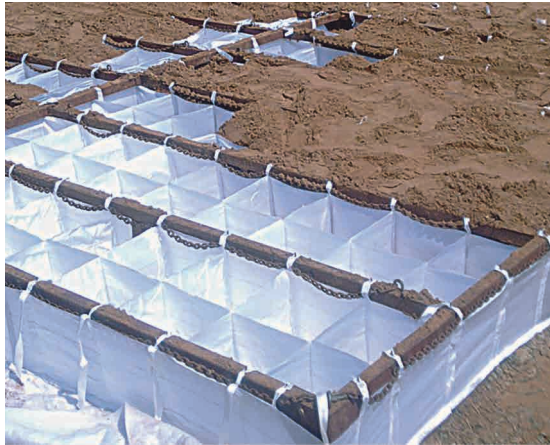
В результате температура грунтов основания повышается, происходит понижение верхнего горизонта вечной мерзлоты.

Процесс установления теплового режима, соответствующего новым граничным условиям, длится 10–20 лет, соответственно, увеличение мощности сжимаемого слабого грунта основания и накопление остаточных деформаций происходит в течение длительного периода.

Другая особенность дорожного строительства в зоне вечной мерзлоты — слева и справа от оси дороги глубина сезонного оттаивания основания нередко бывает различной, поэтому в отдельных случаях должны быть разработаны несимметричные конструкции поперечного профиля, что в строительстве автомобильных дорог обычно не практикуется.

К основным природным факторам, определяющим температурный режим дорожных сооружений, относятся температура воздуха, снежный и растительный покровы, температурный режим основания, приход солнечной радиации, затраты тепла на испарение, поверхностные и надмерзлотные воды. Интегральным выражением влияния на температурный режим сооружения является радиационно-тепловой баланс поверхности, для определения которого необходимо учитывать роль каждого из обозначенных факторов в процессе теплообмена.

В настоящее время действующими нормативными документами, регламентирующими проектирование и строительство автомобильных дорог в зоне распространения многолетне-мерзлых грунтов, являются ОДМ 218.2.094–2018 «Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых



1 — канава, образовавшаяся вследствие оттаивания вечномерзлых грунтов;  
 2 — поверхность вечномерзлых грунтов до сооружения насыпи;  
 3 — то же, после сооружения;  
 4 — геооболочка, заполненная инертным материалом;  
 5 — экструзионный пенополистирол в ячейках геооболочки

Рис. 2. Термоармирующие конструкции

переувлажненных глинистых грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов» и СП 3131325800.2017 «Дороги автомобильные в зоне вечной мерзлоты». Принципиальная ошибка изложенная в документах расчетных методов заключается в том, что максимальную глубину оттаивания основания предлагается определять на основе исходных условий, а не сформировавшихся в результате сооружения насыпи. Кроме того, на основании этих методов невозможно учесть влияние большей части перечисленных факторов.

В настоящее время известен ряд программ, позволяющих выполнить мерзлотный прогноз методом численного анализа.

Задача теплопроводности описывается тремя уравнениями: законом распределения тепла в мерзлой зоне (1), законом распределения тепла в талой зоне (2) и законом перемещения фронта промерзания — протаивания (3).

Для мерзлой зоны,  $n < n_3$  ( $\tau$ )

$$C_M(x, y, z) \frac{\partial t_M}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_M(x, y, z) \frac{\partial t_M}{\partial x}) + \dots \quad (1)$$

Для талой зоны,  $n > n_3$  ( $\tau$ )

$$C_T(x, y, z) \frac{\partial t_T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_T(x, y, z) \frac{\partial t_T}{\partial x}) + \dots \quad (2)$$

Для фронта промерзания — протаивания,  $t_M = t_T = t_3$

$$\lambda_M \frac{\partial t_M}{\partial n} - \lambda_T \frac{\partial t_T}{\partial n} = Q_0 \frac{dn_3(\tau)}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $t_M$ ,  $t_T$ ,  $t_3$  — соответственно: температура в мерзлой зоне, в талой зоне, температура замерзания;  $\lambda_M$ ,  $\lambda_T$  — коэффициенты теплопроводности, соответственно, мерзлого и талого грунта;  $C_M$ ,  $C_T$  — объемные теплоемкости, соответственно, мерзлого и талого грунта;  $n$  — координата.

В Центральной лаборатории инженерной теплофизики (ООО «ЦЛИТ») для выполнения практических расчетов был разработан комплекс алгоритмов, основанный на методе элементарных балансов, при этом дифференциальные уравнения заменяются разностными. Метод позволяет выполнить мерзлотный прогноз оснований сооружений, в том числе дорожных насыпей, построенных с применением экструзионных пенополистиролов.

В теле насыпи непосредственно под теплоизоляционными плитами обычно происходит сезонное оттаивание основания на некоторую глубину. Для того чтобы полностью исключить оттаивание, согласно расчетам, требуется слой теплоизоляции толщиной 30–50 см, что вызывает существенное удорожание строительства. Максимальное оттаивание, как правило, происходит в нижней части откоса, при этом поверхность вечной мерзлоты опускается вдоль подошвы насыпи независимо от используемого принципа проектирования. В отдельных случаях, в районах с большим снегопереносом (Ямал), увеличение высоты насыпи может увеличить глубину сезонного оттаивания вдоль ее подошвы. Если на этом участке была уложена теплоизоляционная плита, возможна ее деформация из-за неравномерных осадок основания.

В сложившейся ситуации целесообразно применить конструктивное решение, позволяющее одновременно уменьшить глубину оттаивания основания и армировать оттаявшие грунты, имеющие низкую несущую способность. Для этой цели предлагается использовать экструзионный пенополистирол совместно с геоболочкой, которая представляет собой ячеистую конструкцию, выполненную из тканого геотекстиля и имеющую дно. Ячейки геоболочки обычно заполняют инертным материалом и используют конструкцию при строительстве на слабых грунтах как армирующий элемент.

XPS укладывают в ячейки геоболочки, а над экструзионным пенополистиролом устраивают защитный слой из песка. Геоболочка снижает неравномерные деформации оттаявшего основания, удерживает оттаявшие грунты от размыва, экструзионный пенополистирол уменьшает глубину оттаивания, образуя термоармирующую конструкцию.

Термоармирующая конструкция может применяться при укреплении малых водотоков. Вследствие выемки грунта под

руслом канавы происходит оттаивание вечномерзлых грунтов, их поверхность опускается, повторяя очертание русла. Оттаявшие грунты проседают, дно канавы опускается ниже проектной отметки. Конструкция укрепления должна быть гибкой и плотно прилегать к дну канавы, чтобы исключить размыв. В этом случае следует применять термоармирующую геоболочку с пологом, плотно закрывающим ячейки и препятствующим вымыванию песка. Экструзионный пенополистирол в ячейках геоболочки уменьшит глубину оттаивания.

Требуемые толщину XPS в дорожной конструкции и прочность ткани геоболочки устанавливают на основе расчетов. Задача может решаться как обратная: на первом этапе определяют допустимую глубину оттаивания исходя из анализа устойчивости насыпи, на втором этапе подбирают толщину теплоизолирующего слоя исходя из допустимой глубины оттаивания.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Свойства экструзионных пенополистиролов соответствуют требованиям, предъявляемым к теплоизолирующим материалам, используемым в дорожном строительстве.

2. В зоне вечной мерзлоты снижение высоты насыпи за счет применения теплоизоляторов дает существенный экономический эффект, поэтому экструзионные пенополистиролы находят широкое применение.

3. Назначать положение и толщину теплоизолирующих материалов в теле насыпи следует на основе мерзлотного прогноза, выполненного с учетом грунтово-гидрологических факторов, изменившихся вследствие сооружения насыпи. Наиболее целесообразно использовать метод численного анализа.

4. Для укрепления оттаявшего грунта при невозможности сохранения его в мерзлом состоянии целесообразно использовать термоармирующие конструкции, выполняющие две функции: уменьшение глубины оттаивания и армирование талого грунта. Термоармирующая конструкция может применяться при укреплении малых водотоков.

5. Параметры термоармирующей конструкции назначают на основе решения геотехнической и теплофизической задач. ■



Ассоциация «РАПЭКС»  
г. Санкт-Петербург  
+7 (916) 125-31-21  
mb@rapex-org.ru  
www.rapex-org.ru