

ИННОВАЦИОННЫЙ ДРЕНАЖНЫЙ ГЕОКОМПОЗИТ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ МЕРЗЛОТНОГО ПУЧЕНИЯ В ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Одной из первостепенных задач для районов с холодным климатом является борьба с мерзлотным пучением, ускоряющим повреждение дорожного покрытия в результате процесса замерзания и оттаивания в сочетании с движением большегрузных транспортных средств.

Мерзлотное пучение возникает в результате замерзания воды в мелкозернистой почве выше горизонта промерзания. Сохранение низкой степени водонасыщения почвы в зоне, которая подвержена промерзанию, может значительно уменьшить величину мерзлотного пучения. Вода может проникать в грунтовую массу выше глубины промерзания двумя путями: капиллярный подъем от верховодки или нисходящая или боковая инфильтрация под дорогой. Оба источника воды можно успешно ограничить путем укладки капилляропрерывающего слоя, образованного либо дренажной каменной засыпкой, либо геокомпозитом.

Капилляропрерывающий слой, если он правильно уложен, предотвратит капиллярный подъем воды и обеспечит дренаж инфильтрационной воды над капилляропрерывающим слоем, осушая грунтовую массу. Водонепроницаемый материал, расположенный над верховодкой, также предотвратит капиллярный подъем, но он не будет дренировать грунт и может привести к накоплению воды, образованию подвешенного слоя грунтовых вод над горизонтом промерзания или увеличению порового давления под насыпью, если условия грунтовых вод изменятся. Оба эти обстоятельства могут привести к ухудшению качества дороги.

Мерзлотное пучение грунтов, подверженных промерзанию, является, пожалуй, самой распространенной причиной раз-

рушения дорожного покрытия в условиях холодного климата. Промерзание грунта и «рост» ледяных линз в почве вызывает подъем поверхности грунта. В результате дорожное покрытие поднимается, трескается и повреждается.

Во время весенней оттепели грунт основания ослабевает по мере таяния льда, что значительно ослабляет конструктивное основание дорожного покрытия. Автомобильное движение в это время наносит серьезный ущерб дорожному покрытию из-за сочетания слабого грунта основания, трещин, ослабленного покрытия и нагрузки. Обычно в таких условиях дорожное покрытие требует капитального ремонта и даже ежегодного восстановления.

В компании «Маккаферри» разработан геокомпозит MacDrain Arctic Blanket (AB), который предназначен для исключения или значительного ограничения мерз-

лотного пучения, что предотвращает повреждение дорожного покрытия благодаря:

- созданию капилляропрерывающего слоя;
- быстрому боковому отводу осадков и талых вод;
- высокой стойкости к повреждениям конструкции и к ползучести при сжатии из-за перегруженности тела насыпи.

Процесс мерзлотного пучения

Есть различные определения грунта, подверженного промерзанию. Согласно критерию Инженерного корпуса армии США, доля частиц размером менее 0,02 мм не должна превышать 3%. Чтобы повысить практическую применимость, Корпус также рекомендовал критерий, по которому сквозь сито № 200 (0,075 мм) (обычно это самое маленькое сито, используемое при анализе размера зерна) не должно проходить более 2% частиц. Было установлено, что в некоторых случаях этот критерий может быть чрезмерно консервативным. Другие специалисты считают неоправданным использование только одного размера зерна 0,075 мм в качестве показателя подверженности грунта промерзанию.

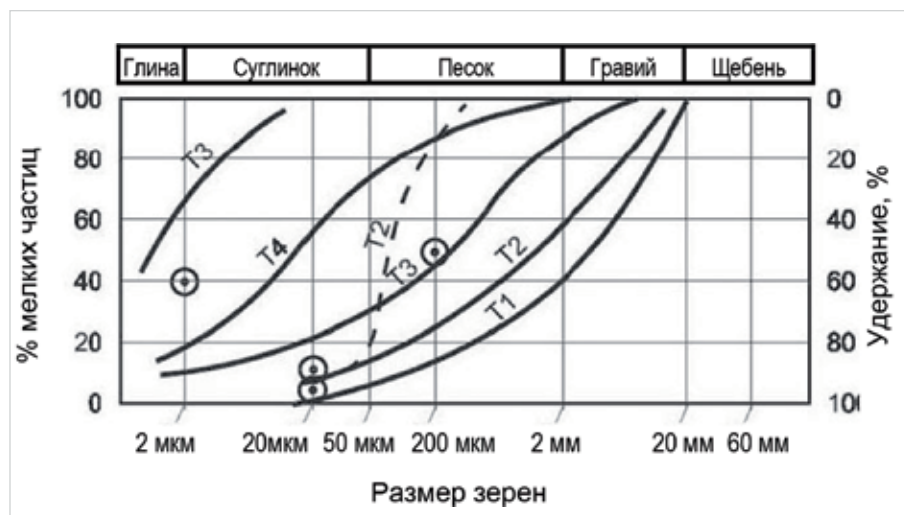


Рис. 1. Норвежские критерии грунта, подверженного промерзанию

В Норвегии критерии размера зерна для оценки подверженности грунта промерзанию включают размеры 0,002 мм, 0,02 мм и 0,2 мм (Knutson, 1993). Грунты подразделяются на четыре группы, от Т1 (не подверженные промерзанию) до Т4 (с высокой подверженностью промерзанию), как показано на рис. 1. Грунт, подверженный промерзанию, как правило, представляет собой мелкопесчаный суглинок, в котором менее 40% частиц меньше 0,002 мм, более 12% частиц меньше 0,02 мм и более 50% частиц меньше 0,2 мм.

Мерзлотное пучение вызывается водой в мелкозернистых грунтах, таких как суглинок и глина, когда она расширяется при замерзании. Мерзлотное пучение под дорогой приводит к потере ее качества, что требует высоких затрат на техническое обслуживание.

Для возникновения мерзлотного пучения необходимы три условия (Henry & Holtz, 2001):

1. Условия промерзания;
2. Грунт, подверженный промерзанию;
3. Поступление воды к фронту замерзания.

При отсутствии какого-либо из перечисленных условий мерзлотного пучения не происходит. Поэтому важны усилия для смягчения хотя бы одного из этих факторов в дорожных конструкциях.

В регионах, где промерзание глубокое, дороги часто строятся на низких насыпях, которые обеспечивают дополнительную степень

теплоизоляции грунта. При строительстве этих насыпей может быть достигнута значительная экономия за счет использования местного материала, поскольку во многих регионах гранулированные материалы, которые не подвержены мерзлотному пучению, недоступны вблизи и/или очень дорогие. Таким образом, многие насыпи строятся вплоть до дорожной конструкции с использованием местных, устойчивых к замерзанию связных материалов.

В тех случаях, когда грунт, подверженный промерзанию, используется в холодном климате, необходимо контролировать содержание воды в этом грунте, чтобы предотвратить мерзлотное пучение. Вода может проникнуть в насыпь двумя путями:

- капиллярный подъем грунтовых вод над верховодкой,
- нисходящая и боковая инфильтрация воды в насыпь дороги или непосредственно под ней.

Капиллярный подъем над верховодкой можно предотвратить двумя способами:

1. Устройство капилляропрерывающего слоя, который предотвращает миграцию воды вверх, но сохраняет опускание воды к верховодке.
2. Установка непроницаемого экрана, предотвращающего как восходящее, так и нисходящее движение воды в грунтовой массе.

Капилляропрерывающий слой был успешно использован для ограничения капиллярного подъема над верховодкой (Casagrande,

1938; Rengmark, 1963). Традиционный капилляропрерывающий слой выполнен из гранулированного камня одного размера или с зазором, уложенного слоем толщиной до 0,5 м и расположенного выше максимального уровня верховодки. Конструкция такого типа предотвращает капиллярный подъем и, таким образом, уменьшает высоту капиллярной зоны и снижает мерзлотное пучение. Если капилляропрерывающий слой уложен на правильном уровне, ниже горизонта промерзания и выше максимального уровня верховодки, то величина мерзлотного пучения будет значительно уменьшена.

Относительно недавно из геокомполитов, сердцевинной которых является геомат, зажатый между двумя слоями геотекстиля, был разработан дренаж капиллярного горизонта. Геокомполиты этого типа (рис. 2) были успешно использованы в качестве покрытия, предотвращающего мерзлотное пучение (Henry & Holtz, 2001). Там, где геокомполит укладывается с боковым уклоном, выходящие наружу края геомата также способствуют боковому дренажу, предотвращая тем самым накопление воды в грунтовой массе над геокомполитом.

Согласно Henry & Holtz (2001), альтернативой капилляропрерывающему слою является использование водонепроницаемого материала выше максимального уровня верховодки. Водонепроницаемый материал будет предотвращать капиллярный подъем вверх, однако он также будет пре-



Рис. 2. Геокомполиты, используемые в качестве капилляропрерывающего слоя

дотвращать движение вниз, таким образом вызывая напор просачивающейся воды, если над водонепроницаемым слоем не будет обеспечен надлежащий дренаж. Укладка водонепроницаемого материала на неподходящем уровне в грунте может привести к созданию повышенного порового давления под насыпью, если повысился уровень верховодки, а дренаж под водонепроницаемым материалом недостаточен. Предотвращается нисходящая инфильтрация, что приводит к возможному созданию подвешенного горизонта грунтовых вод, вызывающего увеличение степени водонасыщения массы почвы в зоне промерзания. При подпоре воды выше водонепроницаемого материала может возникнуть мерзлотное пучение. Вода может проникать в почву над капилляропрерывающим слоем или водонепроницаемым материалом непосредственно с поверхности немоощенных дорог или через трещины на дорогах с твердым покрытием. Также при благоприятных гидрологических условиях возможна боковая инфильтрация. Когда уровень верховодки замкнут под водонепроницаемым слоем или поднимается над водонепроницаемым слоем, разница в высоте между основанием водонепроницаемого слоя и поверхностью верховодки представляет собой давление выпора на водонепроницаемый слой. Возможны две ситуации:

- Восходящее поровое давление таково, что происходит разрывное вздутие, восходящее поровое давление приводит к восходящему пучению (при отсутствии замерзания) насыпи.

- Поровое давление под водонепроницаемым слоем значительно увеличивает гидравлический градиент в водонепроницаемом слое, увеличивая тем самым вероятность того, что через водонепроницаемый слой будут локально развиваться каналы потока. Развитие каналов потока наиболее вероятно именно в плохо сконструированных водонепроницаемых слоях.

Восходящее поровое давление, приводящее к пучению, может

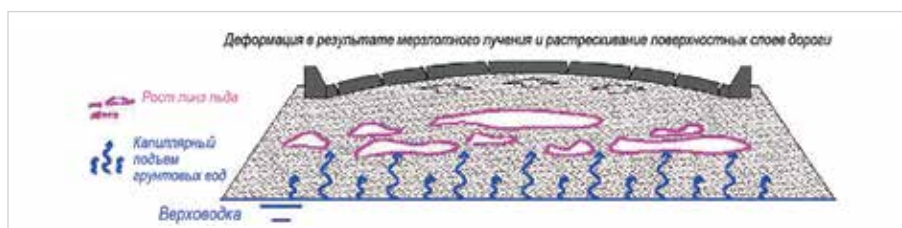


Рис. 3. Процесс мерзлотного пучения от подъема капиллярной воды

быть преодолено путем укладки достаточного веса материала на непроницаемом слое так, что на непроницаемый слой действует результирующая сила прижима. Там, где результирующая вертикальная сила направлена вверх, происходит пучение. Высота насыпи, необходимая для предотвращения пучения, может быть определена путем расчетов равновесия вертикальных сил на уровне водонепроницаемого слоя.

Чтобы уменьшить гидравлический градиент в водонепроницаемом слое, требуется дренирующая среда во всю ширину водонепроницаемого слоя. В качестве альтернативы толщина водонепроницаемого слоя может быть увеличена, и при регулярном контроле качества и инспектировании вероятность развития локализованного канала потока может быть значительно уменьшена.

Henry & Holtz (2001) показали, что для мелкозернистого грунта, расположенного в зоне промерзания с водонасыщением свыше 71%, эффект капилляропрерывающего слоя или водонепроницаемого материала устраняется, что приводит к мерзлотному пучению.

В связи с этим важно, чтобы степень водонасыщения почвы выше капилляропрерывающего слоя поддерживалась на низком уровне благодаря созданию надлежащей системы дренажа, которая позволяет воде естественным образом опускаться в верховодку или стекать по дренажному слою. Было показано, что капилляропрерывающий слой из геокомпозита (GCD), испытанного в соответствии с ГОСТ 28622-2012, практически полностью исключает мерзлотное пучение. ГОСТ 28622-2012 разработан для измерения мерзлотного пучения в

мелкозернистом грунте в результате капиллярного подъема воды в грунте.

Мерзлотное пучение возникает вследствие следующих механизмов. Вода в грунте, подверженном промерзанию, поднимается в результате капиллярного эффекта. Этот грунт в капиллярной зоне обычно ненасыщенный.

Когда влага в капиллярной зоне замерзает, вода превращается в твердый лед, капиллярные силы больше не находятся в равновесии и больше воды забирается из верховодки (рис. 3). Таким образом, процесс капиллярного подъема и замерзания грунтовых вод становится непрерывным на протяжении всего периода промерзания.

Количество воды, содержащейся в замерзшем состоянии в капиллярной зоне, может во много раз превышать водонасыщенность грунта в незамерзшем состоянии. Как следствие, грунт вспучивается. Величина пучения зависит от характера грунта и продолжительности периода промерзания.

Грунты, наиболее подверженные пучению, – это грунты, содержащие значительную долю частиц суглинка и мелкого песка. Размеры пор в таких грунтах достаточно малы для того, чтобы капиллярные силы были значительны, и в то же время достаточно велики, чтобы обеспечить сильный восходящий поток воды для подпитки льда. Это мерзлотное пучение может поднять дорожное покрытие, вызвав таким образом начальные трещины и повреждения (рис. 3).

Основное конструктивное повреждение дорожного покрытия часто происходит во время после-

дующей весенней оттепели. Когда температура воздуха поднимается выше нуля, грунт начинает оттаивать от поверхности вниз, выпуская талую воду, которой не удается стечь обратно в верховодку, поскольку земля под водой некоторое время остается промерзшей.

Содержание воды в оттаявшем грунте может во много раз превышать емкость водонасыщения грунта и, следовательно, делает его чрезвычайно мягким, или даже превращает его в суспензию, практически не имеющую прочности. В связи с этим у дорожного покрытия очень малая прочность основания. В это время автомобильное движение по уже трещиноватому и ослабленному дорожному покрытию наносит дорогам серьезный ущерб (рис. 4).

Геомат для предотвращения мерзлотного пучения

Геомат используется в качестве геомата для предотвращения мерзлотного пучения, действуя как капилляропрерывающий слой над уровнем грунтовых вод и обеспечивая быстрый боковой отвод осадков и талых вод.

Дренажный геомат (рис. 5) состоит из трех слоев, каждый с индивидуальной функцией:

- Верхний слой представляет собой нетканый геотекстиль, который, как фильтр, позволяет воде, просачивающейся из грунта, попадать в дренажную сердцевину.
- Центральный слой представляет собой дренажное ядро, состоящее из геомата с W-образным профилем, который обеспечивает высокую устойчивость к сжимающим нагрузкам (таким образом, он сводит к минимуму ползучесть при сжатии) и высокий расход, что позволяет воде, поступающей сверху и снизу, сливаться в боковом направлении в боковые дрены.
- Нижний слой представляет собой специальный нетканый геотекстиль с предназначенным для отталкивания воды гидрофобным полимерным покрытием, которое противодействует капиллярному подъему грунтовых вод снизу.

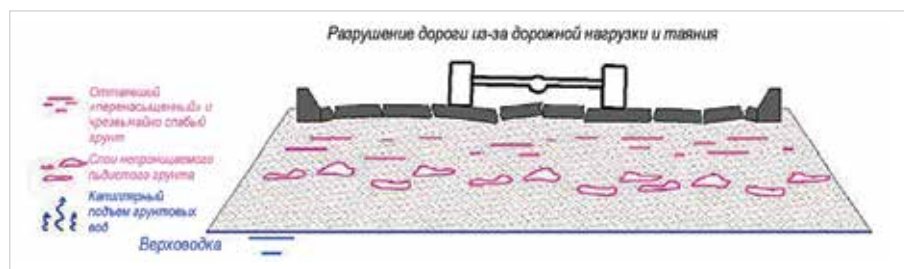


Рис. 4. Разрушение дорожного покрытия во время таяния



Рис. 5. Дренажный геомат MacDrain Arctic Blanket компании «Маккаферри»

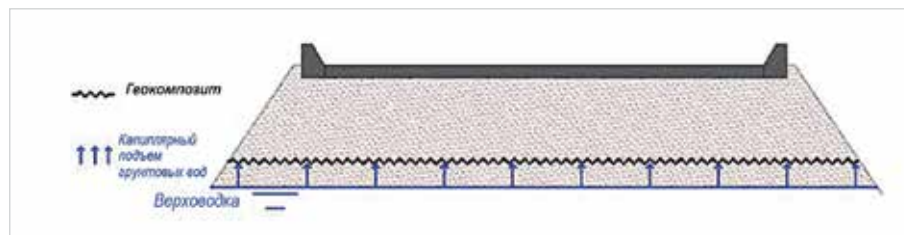


Рис. 6. Предотвращение подъема воды вверх с помощью Arctic Blanket

С помощью дренажного геоматопозита капиллярный подъем полностью прекращается за счет незаполненного промежутка дренажного ядра: на самом деле сила поверхностного натяжения воды недостаточно велика, чтобы преодолеть промежуток в 9–10 мм (рис. 6).

Кроме того, нижняя поверхность нетканого геотекстиля является гидрофобной, и для прохождения воды через нее требуется минимальный напор воды 100 мм; поскольку капиллярный эффект никогда не может образовать такого напора воды, попадание капиллярной воды в дренажную зону предотвращается.

В результате гидрофобный геотекстиль останавливает восходя-

щий поток воды, в то же время оставаясь проницаемым для нисходящего потока. Общий эффект действия этого геотекстиля похож на действие одностороннего клапана.

Гидрофобный геотекстиль, расположенный внизу, играет определяющую роль в предотвращении забивания дренажного ядра льдом из-за капиллярного подъема зимой: фактически, если капиллярная вода попадет в дренажное ядро зимой, вода замерзнет, и дренажное ядро на всю толщину заполнится льдом; тогда лед соединит верхний и нижний геотекстиль, пустое пространство будет заполнено и капиллярный подъем продолжится вверх, образуя линзы льда в насыпи.

Возможность соприкосновения верхнего и нижнего геотекстиля также предотвращается высокой относительной толщиной (9–10 мм) сердцевины геомата для предотвращения мерзлотного пучения, в то время как геокомпозит с сердцевиной низкой толщины (4–5 мм) не гарантирует отсутствия соприкосновения верхнего и нижнего геотекстиля, что может нарушить капиллярпрерывающий слой.

В условиях незамерзания нижний геотекстиль действует как фильтр, позволяющий свободное движение воды, что необходимо для эффективного дренажа: если центральный дренажный слой по какой-либо причине становится неэффективным (например, из-за плохой конструкции с неадекватным боковым уклоном), тогда вода все еще сможет просачиваться вниз.

Очень важной особенностью геокомпозита является то, что геотекстиль состоит из полипропилена, который имеет более низкую смачиваемость, чем полиэтилен, и намного более низкую смачиваемость, чем полиэстер, который является гидрофильным: фактически, если геотекстиль имеет более низкую смачиваемость, чем частицы почвы, его способность действовать как капиллярпрерывающий слой значительно повышается (Henry, 1990).

Независимые испытания геокомпозита

Геокомпозит был испытан в контролируемых лабораторных условиях компанией «Петромоделинг Лаб», Москва, Россия, с использованием испытания на мерзлотное пучение по ГОСТу 28622-2012.

Испытательное устройство (рис. 7) подвергает поверхность испытываемых образцов воздействию воздуха при температуре -4°C . Нижняя часть образцов опущена в воду, температура которой поддерживается на уровне $+2^{\circ}\text{C}$. Капиллярный подъем воды в испытываемом грунте, подверженном промерзанию, вызывает попадание воды в зону промерза-

ния. Внутри образцов образуются ледяные линзы, приводящие к увеличению высоты образцов, которая измеряется с интервалами в течение 96 часов. Максимальное зарегистрированное увеличение высоты образца определяется как его мерзлотное пучение.

Испытание геокомпозита проводилось с использованием двух грунтов, подверженных промерзанию, о которых известно, что они дают сильное мерзлотное пучение.

Кривые уклона почвы показаны на рис. 8. Геокомпозит был уложен в двух позициях внутри испытательной камеры, на расстоянии 50 мм и 100 мм от верха соответственно.



Рис. 7. Испытательный аппарат по ГОСТ 28622-2012

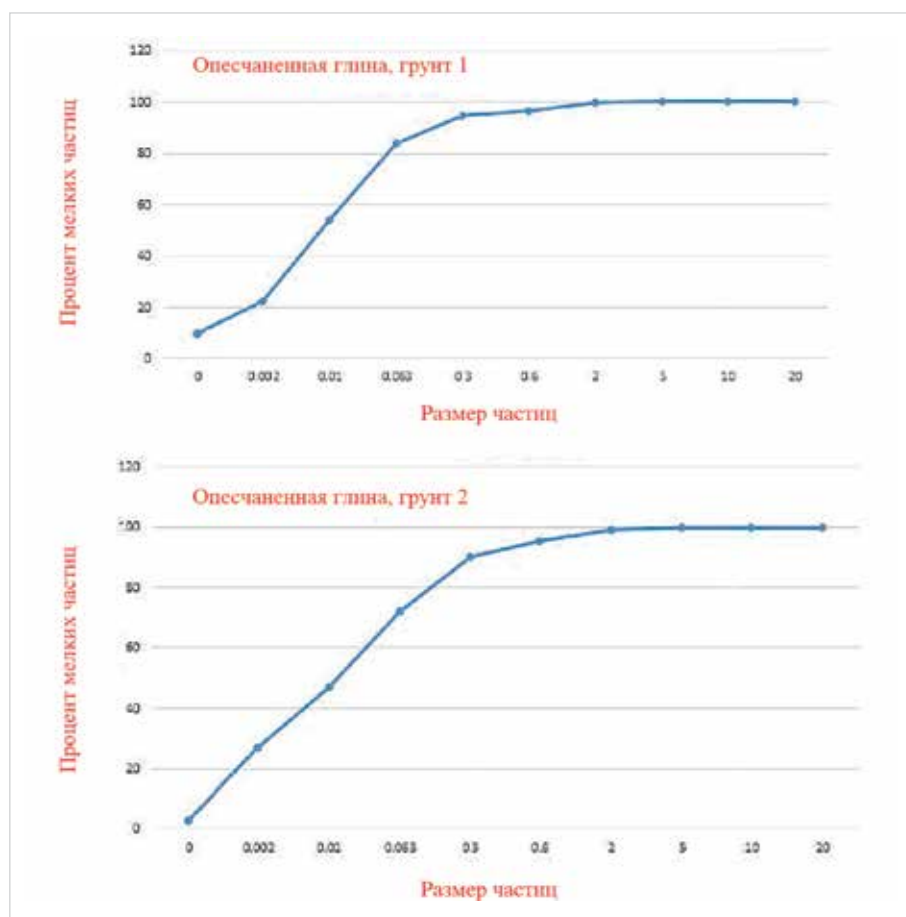


Рис. 8. Кривая распределения частиц для грунтов, подверженных промерзанию, используемая при испытаниях

Табл. 1. Результаты испытаний с грунтом при оптимальной влажности

| Деформации мерзлотного пучения после 96 часов | Без геокомпозита АВ (мм) | С геокомпозитом АВ (на 100 мм) (мм) | С геокомпозитом АВ (на 50 мм) (мм) |
|-----------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| № 1 Плотный суглинок | 7,38 | 0,23 | 1,74 |
| № 2 Слабый суглинок | 7,42 | 0,31 | - |

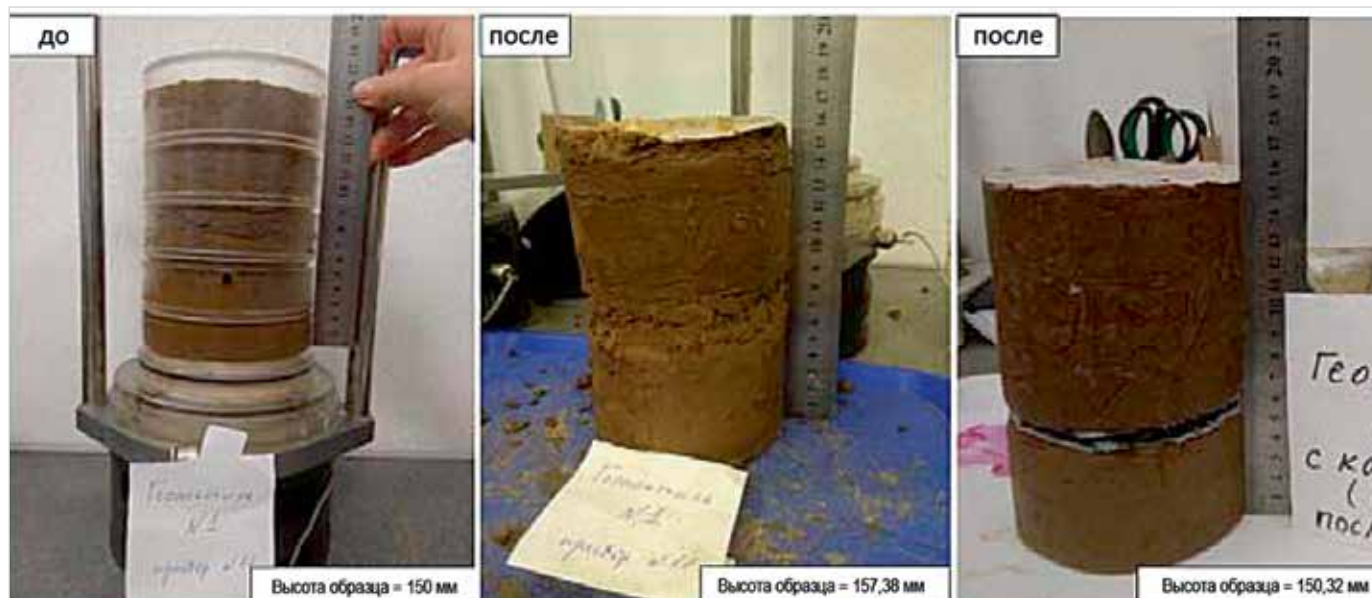


Рис. 9. Образцы мерзлого грунта, демонстрирующие мерзлотное пучение, без геокompозита и с ним

Испытания проводились как при оптимальной влажности для уплотнения, так и при повышенной влажности. Результаты представлены в табл. 1 и 2. Образцы после испытаний показаны на рис. 9.

Результаты испытаний показывают:

- геомат для предотвращения мерзлотного пучения практически полностью устраняет мерзлотное пучение;
- укладка дренажного геокompозита на расстоянии 100 мм от верха (то есть ближе к источнику капиллярного поднятия) более эффективна для уменьшения мерзлотного пучения.

Сравнение затрат

Защита от мерзлотного пучения с использованием натурального грунтово-щебеночного материала потребует укладки 300–500 мм чистого гранулированного материала. В России стоимость поиска, транспортировки, укладки, уплотнения слоя грунта толщиной всего 300 мм будет стоить ~ 900 рублей за квадратный метр насыпи. Если этот слой забивается мелкими частицами, потребуется периодическое его обслуживание. Для сравнения: стоимость поиска, транспортировки, укладки геокompозита составляет ~ 550 рублей за квадратный метр насыпи. Дренажный геокompозит при правильной установке практически не требует технического обслуживания.

Табл. 2. Результаты испытаний с грунтом при влажности > оптимальной

| Деформации мерзлотного пучения после 96 часов | Плотность грунта, (кН/м³) | Влажность грунта W, % | Без АВ, (мм) | С АВ (на 100 мм), (мм) |
|-----------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------|------------------------|
| № 1 Плотный суглинок | 15,8 | 25,9 | 9,47 | 2,12 |
| № 2 Слабый суглинок | 17,1 | 23,1 | 8,54 | – |

Очевидно, что геомат для предотвращения мерзлотного пучения обеспечивает очень высокую экономию, гарантируя при этом гораздо более эффективную защиту от мерзлотного пучения по сравнению с использованием гранулированной отсыпки.

Проектирование и монтаж геокompозита

Защита от мерзлотного пучения обеспечивается специально разработанной конструкцией дренажного геокompозита. Кроме того, проектирование геокompозита в качестве дренажного слоя должно

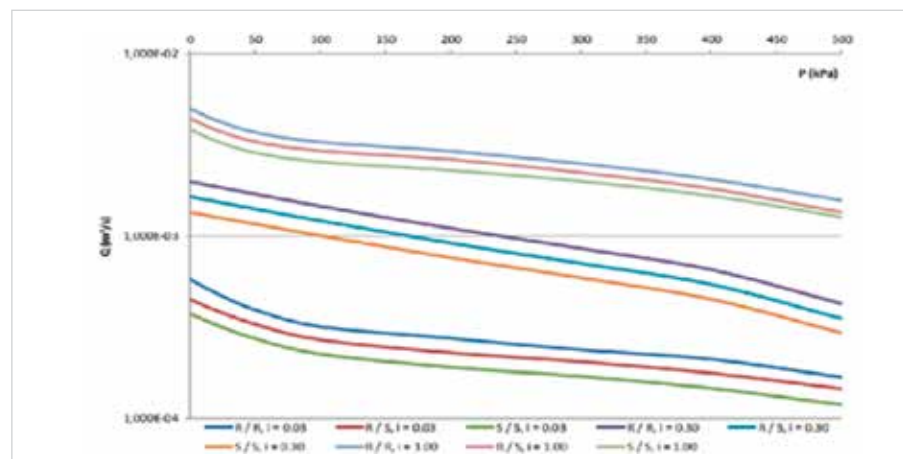


Рис. 10. График расхода дренажного геокompозита MacDrain AB 1101 компании «Маккаферри»

Табл. 3. Эквивалентный геокомпозит MacDrain AB для типичного слоя дренажа из гранулированного материала при общих проектных условиях

| Высота насыпи (м) | Толщина гранулированного дренажного слоя (м) | Водопроницаемость (м/с) | Эквивалентный геомат для предотвращения мерзлотного пучения |
|-------------------|----------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 3 | 0,30 | 3×10^{-3} | MacDrain AB 1091 |
| 7 | 0,30 | 3×10^{-3} | MacDrain AB 1091 |
| 10 | 0,30 | 3×10^{-3} | MacDrain AB 1101 |

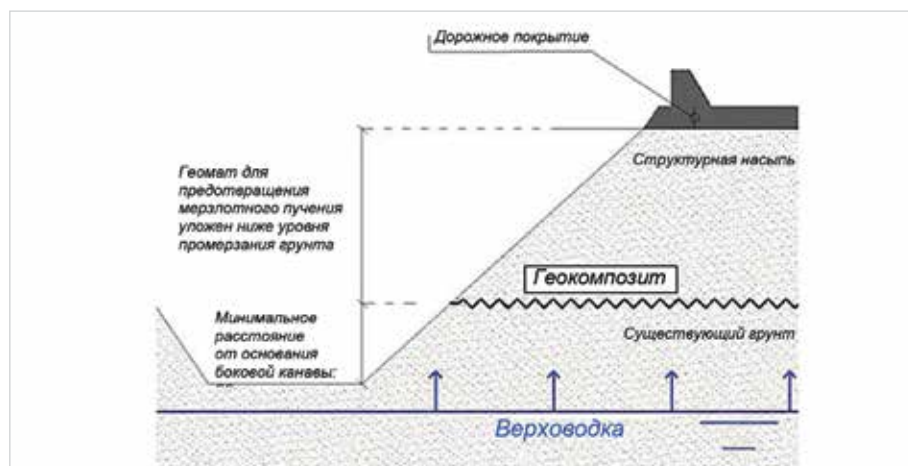


Рис. 11. Укладка геокомпозита

выполняться на основе графиков расхода, полученных в результате испытаний расхода ISO 12958 (рис. 10), в соответствии с ISO/TR 18228-4.

Для слоя гранулированного материала толщиной 300 мм, расположенного ниже тела насыпи разной высоты, эквивалентный геомат для предотвращения мерзлотного пучения представлен в табл. 3

Геокомпозит выполняет функцию устранения капиллярного подъема грунтовых вод в подверженных промерзанию грунтах в периоды сильных морозов, предотвращая тем самым повреждение дорожных покрытий, вызванное мерзлотным пучением.

Для того чтобы обеспечить выполнение этой функции, дренажный геокомпозит следует укладывать ниже глубины промерзания грунта, но выше зимнего уровня верховодки.

Геомат для предотвращения мерзлотного пучения следует укладывать так же, как и стандартный геотекстиль, со следующими дополнительными рекомендациями:

- Геокомпозит нужно укладывать таким образом, чтобы гидрофобный геотекстиль был обращен вниз.
- Внешний край дренажного геокомпозита должен выходить на лицевой стороне насыпи, чтобы обеспечить беспрепятственный

отвод наружу любой воды, поступающей в зону дренажа.

- Для эффективного бокового дренажа геокомпозит следует укладывать с боковым уклоном 2-3% к стороне насыпи с беспрепятственным водоотводом.

Заключение

Геокомпозит MacDrain Arctic Blanket – это материал, который обеспечивает экономически эффективное решение проблемы мерзлотного пучения.

Лабораторные испытания были проведены в соответствии с требованиями к испытанию на мерзлотное пучение согласно ГОСТ 28622-2012: результаты подтвердили, что геокомпозит полностью подавил мерзлотное пучение в слабых суглинистых грунтах. Предложения по проектированию и установке были предоставлены для обеспечения максимальной эффективности дренажного геокомпозита.

Леонардо Мартино,
Пьетро Пеццано, Морено Скотто,
Пьетро Римольди,
Officine Maccaferri S.p.A.,
Дзола-Предоза, Болонья, Италия,
Андрей Петряев,
Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I

MACCAFERRI

**ООО «ГАБИОНЫ
МАККАФЕРРИ СНГ»**
115088, Москва
ул. Шарикоподшипниковская,
д. 13, стр. 1
тел.: +7 (495) 108-58-84
info@maccaferri.ru
www.maccaferri.ru

Литература

1. ГОСТ 28622-2012, Грунты. Метод лабораторной процедуры определения деформаций мерзлотного пучения. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Россия (2012).
2. Казагранде Л. (Casagrande, L.). Исследование земляного полотна дорог. В материалах VIII Международного дорожного конгресса, Гаага. С. 1-27 (1938).
3. Генри К.С. (Henry, K.S.) (1990). Лабораторное исследование использования геотекстиля для предотвращения мерзлотного пучения, отчет CRREL 90-6, Инженерный корпус армии США, (1990)
4. Генри К.С., Хольц Р.Д. (Henry, K.S. and Holtz, R.D.) Геокомпозитные противокапиллярные экраны для уменьшения мерзлотного пучения в грунтах. Канадский геотехнический журнал. Т. 38. С. 678-694 (2001).
5. Кнутсон А. Мерзлотные процессы в грунтах. Норвежская дорожно-исследовательская лаборатория, Осло, Норвегия (1993).
6. ISO 12958. Геотекстиль и связанные с ним изделия. Определение пропускной способности воды в их плоскости. ISO, Женева, Швейцария.
7. ISO/TR 18228-4. Проектирование с использованием геосинтетики. Часть 4: Дренаж ISO. Женева, Швейцария.
8. Ренгмарк Ф. (Rengmark, F.) Проектирование дорожного покрытия в зонах промерзания грунта в Швеции. Протокол исследований автомагистрали 33, проектирование дорожного покрытия в районах промерзания II. Проектные сообщения. С. 137-157 (1963).