

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Панков В.Ю., Плотников Н.А. Эффективность использования теплоизоляционных смесей при строительстве дорог в криолитозоне // Арктика и Антарктика. 2025. № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.3.74850 EDN: UOWMJP URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74850

Эффективность использования теплоизоляционных смесей при строительстве дорог в криолитозоне

Галкин Александр Фёдорович

ORCID: 0000-0002-5924-876X

доктор технических наук

Главный научный сотрудник; лаборатория геотермии криолитозоны; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН. Лаборатория геотермии криолитозоны

✉ afgalkin@yandex.ru



Жирков Александр Федотович

ORCID: 0000-0001-6721-5338

кандидат технических наук

Ведущий научный сотрудник; лаборатория геотермии криолитозоны; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

677010, Россия, республика РС(Я), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

✉ zhirkov_af@mail.ru



Панков Владимир Юрьевич

кандидат геолого-минералогических наук

доцент; кафедра Строительства дорог и аэродромов; Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

677027, Россия, республика Саха(Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, 58

✉ pankov1956@gmail.ru



Плотников Николай Афанасьевич

ORCID: 0000-0001-6013-931X

аспирант; Институт мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН

677010, Россия, республика Саха(Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

✉ plotnikov-nikolay96@mail.ru



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.3.74850

EDN:

UOWMJP

Дата направления статьи в редакцию:

15-06-2025

Аннотация: Объектом исследований являются автомобильные дороги в зоне многолетней мерзлоты, которые подвержены действию негативных факторов криогенеза. Предметом исследований являются теплозащитные покрытия на основе смесей теплоизоляционных и теплоаккумулирующих строительных материалов, которые должны обеспечивать нормативную глубину оттаивания дорожного основания. Цель работы – оценка целесообразности использования смесей строительных теплоизоляционных материалов в конструкциях дорожных одежд для управления тепловым режимом грунтов деятельного слоя криолитозоны. Одним из возможных вариантов защиты автомобильных дорог в криолитозоне от негативных криогенных процессов является использование при возведении теплоизоляционных слоев в дорожных одеждах теплозащитных смесей, которые представляют собой смесь несущего теплоаккумулирующего связующего (песок, гравий) и теплоизоляционного наполнителя (керамзит, азерит и т. п.). Исследовано влияние теплоизоляционных смесей в дорожных одеждах в качестве средства управления глубиной оттаивания дорожного основания. Приведены конкретные примеры расчетов эффективности использования теплоизоляционных смесей. Введены новые безразмерные критерии: теплофизический симплекс, характеризующий отношение коэффициентов теплопроводности наполнителя и связующего; стоимостной симплекс, характеризующий отношение стоимости единицы объема наполнителя к единице объема связующего; проектный критерий, характеризующий отношение проектного значения толщины теплоизоляционного слоя в дорожной одежде и произведения коэффициента теплопроводности связующего и нормируемого значения термического сопротивления теплозащитного слоя. Построена безразмерная целевая функция, которая позволяет определить эффективные параметры теплозащитного слоя в дорожной одежде, обеспечивающих заданную нормативную глубину оттаивания дорожного основания. Получены основные количественные закономерности, характеризующие взаимосвязь концентрации наполнителя с безразмерными симплексами, определяющими значение целевой функции. Научная новизна заключается в получении функциональных зависимостей для определения предельных значений безразмерных симплексов, определяющих целесообразность применения бинарных смесей и позволяющих найти границу эффективности использования теплоизоляционных смесей с различными теплофизическими свойствами. Показано, что теплоизоляционные смеси материалов могут быть рекомендованы в качестве эффективной замены однородных строительных материалов при проектировании дорожных одежд. Построен 3D график, позволяющий оперативно оценить, при каком значении определяющих симплексов целесообразно применять конкретную теплоизоляционную бинарную смесь в дорожной одежде. Показано, что во многих, практически интересных случаях, рациональным выбором состава теплоизоляционных смесей можно добиться нормативной глубины оттаивания дорожного основания.

ключевые слова:

криолитозона, автомобильная дорога, тепловая защита, теплоизоляция, теплопроводность, глубина оттаивания, критерий, эффективность, строительство, смесь материалов

Работа выполнена по государственному заданию по теме «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (№ 122011800062-5).

Введение

Криогенные процессы, которые происходят при антропогенном воздействии на окружающую среду в арктических регионах, негативно влияют на надежность эксплуатации линейных инженерных сооружений, в частности, автомобильных и железных дорог [1,2,3,4]. Такие криогенные проявления как морозобойное растрескивание грунтов, пучение, наледи и др. не только осложняют эксплуатацию дорог и требуют дополнительных затрат на ремонтные работы, но и могут приводить к аварийным ситуациям [5,6,7]. Многие отечественные и зарубежные ученые считают, что одним из наиболее эффективных способов снижения уровня проявлений криогенных процессов является минимизация теплового взаимодействия инженерных сооружений с мерзлыми грунтами, которое может быть достигнуто путем использования теплозащитных материалов в конструкциях дорожных одежд [8,9,10,11,12]. Это подтверждается и успешным опытом использования теплозащитных конструкций и теплоизоляционных материалов при строительстве аэродромов, железных и автомобильных дорог в криолитозоне [13,14,15,16,17]. Главным недостатком данного способа управления тепловым режимом дорожных оснований, является высокая стоимость теплоизоляционных материалов. Особенно это удорожает строительство дорог в арктических регионах, где нет своей производственной базы и приходится завозить теплоизоляционные материалы из других регионов. Транспортные расходы составляют существенную долю в общей цене продукции. Одним из возможных вариантов снижения стоимости строительства в таких случаях является использование при возведении теплоизоляционных слоев в дорожных одеждах теплозащитных смесей [18,19]. Под теплоизоляционной смесью понимается смесь несущего теплоаккумулирующего связующего (песок, гравий) и теплоизоляционного наполнителя (керамзит, азерит, гранулы пенополистирола, стекольный щебень и т. п.) [20].

Целью работы являлось определение области экономической эффективности использования двухкомпонентных строительных теплоизоляционных материалов в конструкциях дорожных одежд для достижения нормативной глубины оттаивания дорожного основания..

Метод

Для достижения цели необходимо исследовать целевую функцию затрат вида

$$F(Z) = Z_c - Z_{\text{см}} \text{ При условии } R_c = R_{\text{см}} \dots\dots\dots(1)$$

Если выполняется условие $F(Z) \geq 0$, то применение теплоизоляционных смесей строительных материалов является целесообразным. В противном случае, для возведения теплозащитного слоя можно использовать одно связующее, например песок, без добавок теплоизоляционного наполнителя. Далее везде подразумевалось

очевидное, на наш взгляд, положение, что эксплуатационные затраты на возведение слоя не зависят от вида используемого материала. При этом также считалось, что доставка материалов входит в их стоимость. Это позволяет не усложнять целевую функцию, но, в то же время, получить результат с необходимой степенью надежности.

В выражениях (1) и (2) приняты следующие обозначения: $Z_c, Z_{см}$ - удельные затраты на материалы при использовании в качестве теплозащитного слоя только связующего, или смеси связующего и наполнителя, соответственно, руб./м².

$$Z_c = \delta_c C_c \text{ и } Z_{см} = \delta_{см} C_{см} \dots\dots\dots (2)$$

Где C_c и $C_{см}$ - стоимость единицы объема связующего и смеси связующего и наполнителя, руб/м³; δ_c и $\delta_{см}$ - толщина конструктивного теплозащитного слоя, выполненного только из материала связующего и двухкомпонентного материала (связующее плюс наполнитель), м.

Стоимость единицы объема бинарной смеси может быть определена по формуле

$$C_{см} = (C_c + C_n)m - C_c \dots\dots\dots (3)$$

Здесь m - концентрация наполнителя в смеси, д. е.; C_n - стоимость единицы объема наполнителя, руб/м³.

Термическое сопротивление слоев, выполненных из различных материалов, определяется по известной формуле

$$R_c = \delta_c / \lambda_c \text{ и } R_{см} = \delta_{см} / \lambda_{см} \dots\dots\dots (4)$$

Где $\lambda_c, \lambda_{см}$ - коэффициент теплопроводности материала связующего и бинарной смеси, соответственно, Вт/мК.

Коэффициент теплопроводности бинарной смеси может быть определен по формуле К. Лихтенекера (Lichtenecker K.) [\[21,22\]](#):

$$\lambda_{см} = (\lambda_n^m)(\lambda_c^{1-m}) \dots\dots\dots (5)$$

Здесь m - концентрация наполнителя в смеси, д.е.; λ_n - коэффициент теплопроводности материала теплоизоляционного наполнителя, Вт/мК.

Подставляя полученные зависимости в уравнение (1) и учитывая выполнение обязательного условия, после несложных преобразований получим выражение для определения целевой функции

$$F(Z1) = C_c - \lambda_o^m [(C_c + C_n)m - C_c] \dots\dots\dots (6)$$

Или, в более удобном для анализа, безразмерном виде

$$F(Z2) = 1 - \lambda_o^m [1 + C_o)m - 1] \dots\dots\dots (7)$$

Здесь: $\lambda_o = \lambda_n / \lambda_c$ и $C_o = C_n / C_c$.

Из формулы (7) формулы (8) несложно получить выражение для определения соотношения цен связующего и наполнителя при известных их теплофизических свойствах, при которых использование смесей материалов для созданий теплозащитных слоев в конструкциях дорожных одежд является экономически целесообразным.

Отметим, что здесь подразумевалось очевидное, на наш взгляд, положение: эксплуатационные затраты на возведение слоя не зависят от вида используемого материала.

$$C_0 \leq [(1 + 1/\lambda_0^m)/m] - 1 \dots\dots\dots (8)$$

Концентрация наполнителя в теплоизоляционной смеси (параметр «m») должна определяться из технологических соображений – недопущения оттаивания дорожного основания больше допустимой величины [23,24]. Обычно при проектировании задается два параметра, на основании которых выбирается материал для теплоизоляционного слоя дорожной одежды: δ_0 – толщина теплоизоляционного слоя, м; R_0 – термическое сопротивление теплоизоляционного слоя, $\text{м}^2\text{К/Вт}$. Концентрацию наполнителя для обеспечения необходимого значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционной смеси может быть найдена из уравнения (5) при условии $\lambda_{\text{см}} = \delta_0 / R_0$.

$$m = (\ln R_b) / (\ln \lambda_0) \dots\dots\dots (9)$$

В данном выражении появился новый параметрический безразмерный критерий, который определяет проектные параметры теплоизоляционного слоя дорожной одежды:

$$R_b = \delta_0 / R_0 \lambda_c$$

Таким образом, осуществляется следующий алгоритм выбора вида и концентрации наполнителя в смеси: по известному значению проектного параметра R_b находится необходимая концентрация теплоизоляционного наполнителя в смеси, обеспечивающая нерастепление дорожного основания, которая по формуле (9) проверяется на выполнение условия экономической целесообразности использования данного вида смеси в дорожной одежде. Если условие выполняется, то параметры теплоизоляционного слоя дорожной одежды будут не только обеспечивать необходимый температурный режим дорожного основания, но и будут экономически целесообразными.

Анализ и обсуждение результатов

По полученным формулам были проведены варианты расчеты, которые для наглядности представлены в графической форме на рисунках 1-6.

На рис.1 представлены графики, характеризующие изменение целевой функции при различных значениях симплекса стоимости, который изменяется от 1,0 до 10,0 для двух характерных граничных значений симплекса теплопроводности материалов смеси: 0,05 и 0,5. То есть также изменяющимся в 10 раз.

а) б)

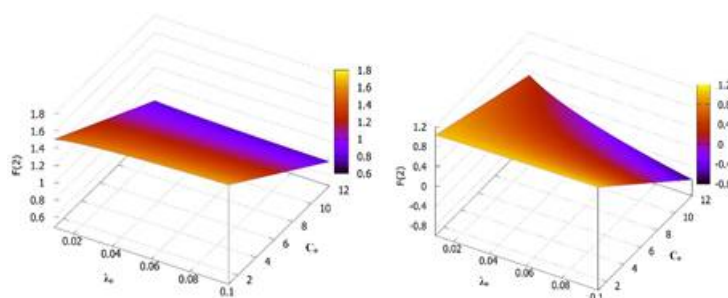


Рис. 1. Значение целевой функции в зависимости от симплексов теплопроводности (λ_0) и стоимости (C_0) материалов смеси: а) при концентрации теплоизоляционного наполнителя

$m=0,1$; б) при концентрации теплоизоляционного наполнителя $m=0,4$.

Такие значения симплекса стоимости определяются прежде всего наличием теплоизоляционного наполнителя в регионе строительства автодорог. При отсутствии местного производства и необходимости доставки из другого региона стоимость наполнителя по отношению к стоимости местного связующего, может увеличиваться многократно.

На рис.2 представлены графики, характеризующие допустимое отношение (C_0) стоимости материалов наполнителя и связующего, при котором применение теплоизоляционной смеси с концентрацией (m) и безразмерным коэффициентом теплопроводности является целесообразным

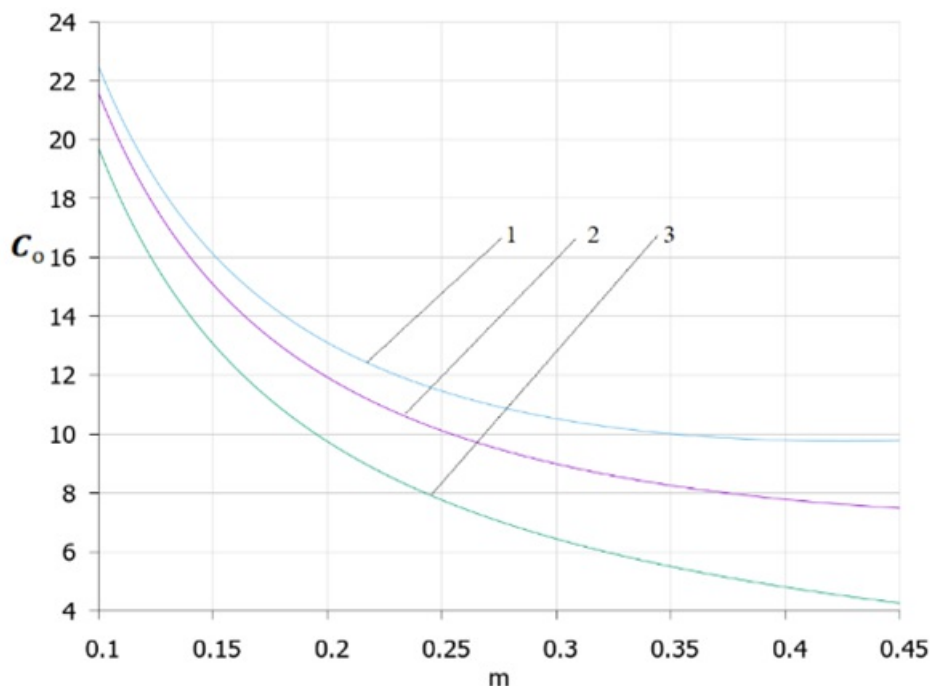


Рис.2. Допустимое отношение (C_0) стоимости материалов наполнителя и связующего, при котором применение теплоизоляционной смеси с концентрацией (m) и безразмерным коэффициентом теплопроводности является целесообразным: 1 - 0,05; 2 - 0,1 3 - 0,5.

Как видно из рисунка, степень изменения безразмерного коэффициента теплопроводности оказывает несущественную роль на степень изменения допустимого значения стоимостного показателя эффективности. Например, при увеличении безразмерного коэффициента теплопроводности в 10 раз (с 0,05 до 0,5) изменение безразмерного стоимостного симплекса изменяется не более чем в 2,5 раза даже при принятой максимальной концентрации наполнителя в смеси ($m = 0,45$). При уменьшении концентрации наполнителя, например, до значения $m = 0,2$, симплекс стоимости изменяется всего в 1,3 раза. При этом абсолютные значения предельного стоимостного симплекса растут с уменьшением концентрации наполнителя быстрее, независимо от величины безразмерного коэффициента теплопроводности смеси. Причем, темп повышения выше для смесей с большим безразмерным коэффициентом теплопроводности. Например, при уменьшении концентрации наполнителя с 0,45 до 0,25 для смесей с симплексом теплопроводности, равным 0,5, увеличение значения предельного стоимостного симплекса происходит приблизительно в 2 раза, а для смесей с симплексом теплопроводности, равным 0,05 (в 10 раз меньше) увеличение значения предельного стоимостного симплекса происходит всего в 1,4 раза.

На рис. 3 представлен 3D график допустимого значения стоимостного симплекса для различной концентрации теплоизоляционного наполнителя при изменении значений симплекса теплопроводности наполнителя и связующего от 0,05 до 0,2.

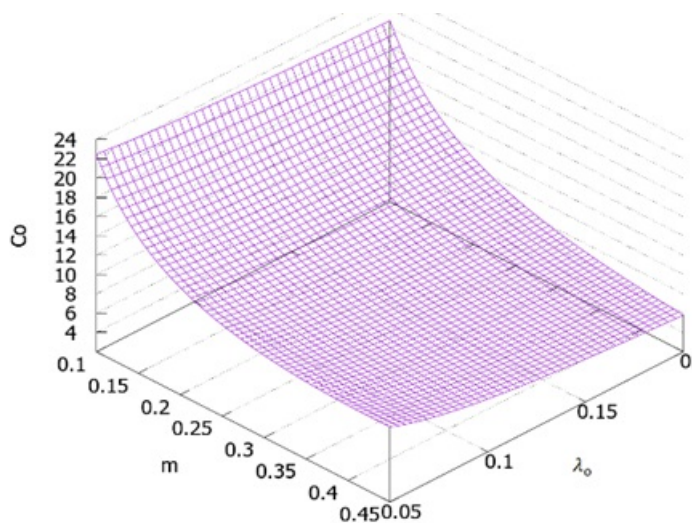


Рис. 3. Допустимое отношение (C_0) стоимости материалов наполнителя и связующего, при котором применение теплоизоляционной смеси с концентрацией (m) и безразмерным коэффициентом (симплексом) теплопроводности является экономически эффективным.

Анализ вида плоскости на рисунке подтверждает сделанные ранее заключения о характере взаимосвязи концентрации наполнителя и безразмерных определяющих экономическую эффективность симплексов. Целесообразность использования смесей увеличивается с увеличением концентрации теплоизоляционного наполнителя в смеси и уменьшением его коэффициента теплопроводности. При этом первый показатель (концентрация наполнителя) является более значимым. Чем меньше концентрация наполнителя, тем больше допустимое значение стоимостного симплекса, которое практически не зависит, от безразмерного коэффициента теплопроводности.

На рис.4 приведены графики, характеризующие необходимую концентрацию теплоизоляционного наполнителя в смеси в зависимости от коэффициента теплопроводности связующего материала для достижения нормативных значений δ_0 и R_0 при различных значениях коэффициента теплопроводности наполнителя.

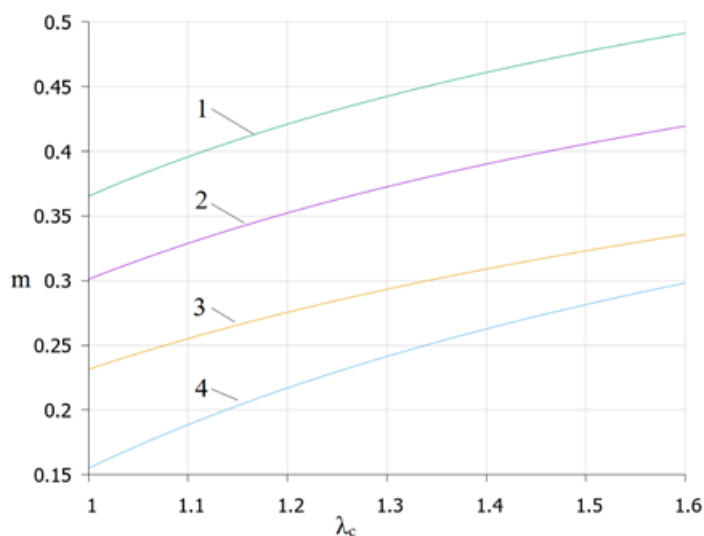


Рис. 4. Необходимая концентрация теплоизоляционного наполнителя в смеси в зависимости от коэффициента теплопроводности связующего материала для достижения

нормативных значений δ_0 и R_0 при различных значениях коэффициента теплопроводности наполнителя:

1 - 0,15 Вт/мК; ($\delta_0 / R_0 = 0,5$ Вт/мК); 2 - 0,1 Вт/мК; ($\delta_0 / R_0 = 0,5$ Вт/мК);

3 - 0,05 Вт/мК; ($\delta_0 / R_0 = 0,5$ Вт/мК); 4 - 0,1 Вт/мК; ($\delta_0 / R_0 = 0,7$ Вт/мК).

Анализ кривых на графике позволяет сделать вывод о значимости нормативных значений толщины и термического сопротивления теплозащитного слоя в дорожной одежде для выбора вида теплоизоляционного наполнителя. Так, например, как следует из сравнения кривых 2 и 4 на графике, при одинаковом значении коэффициента теплопроводности наполнителя (0,1 Вт/мК) и увеличении проектного параметра « δ_0 / R_0 » в 1,4 раза (с 0,5 до 0,7 Вт/мК) необходимая концентрация наполнителя уменьшается более чем в 1,6 раза (при коэффициенте теплопроводности связующего, равного 1,2 Вт/мК). Отмечается также, что темп роста концентрации наполнителя при постоянном значении проектного параметра « δ_0 / R_0 » (0,5 Вт/мК) практически постоянен во всем рассмотренном диапазоне изменения коэффициента теплопроводности связующего (от 0,1 до 1,6 Вт/мК): кривые 1,2 и 3, практически, параллельны оси «X».

На рис.6 представлен 3Д график, характеризующий связь концентрации теплоизоляционного наполнителя в смеси в зависимости от коэффициентов теплопроводности связующего материала и наполнителя для достижения нормативных значений проектного критерия « δ_0 / R_0 ».

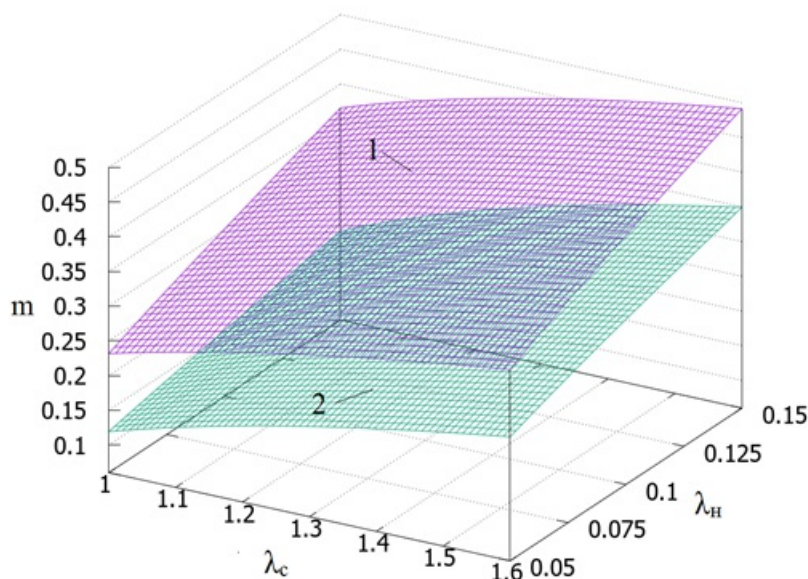


Рис. 5. Необходимая концентрация теплоизоляционного наполнителя в смеси в зависимости от коэффициентов теплопроводности связующего материала и наполнителя для достижения нормативных значений δ_0 и R_0 :

1 - (δ_0 / R_0) = 0,5 Вт/мК; 2 - (δ_0 / R_0) = 0,7 Вт/мК.

Расположение двух плоскостей на графике позволяют судить о степени влияния теплофизических свойств связующего и наполнителя на степень изменения необходимой концентрации для достижения нормативных проектных параметров толщины и термического сопротивления теплозащитного слоя дорожной одежды. Видно, что чем больше проектное термическое сопротивление теплоизоляционного слоя, тем концентрация наполнителя должна быть выше, независимо от его коэффициента

теплопроводности.

На рис.6 приведен обобщающий 3Д график изменения необходимой концентрации теплоизоляционного наполнителя в смеси в зависимости от диапазона изменения основных параметрических критериев, определяющих уровень теплового влияния дороги на грунтовое основание: теплового симплекса « λ_0 » и проектного критерия « R_b ».

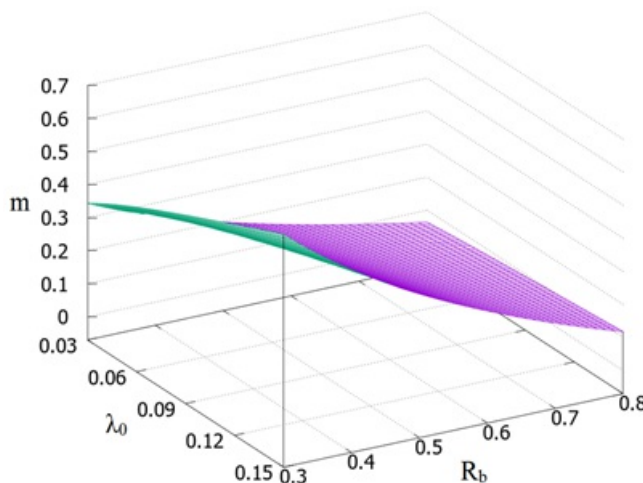


Рис. 6. Необходимая концентрация теплоизоляционного наполнителя в смеси в зависимости от соотношения коэффициентов теплопроводности наполнителя и связующего ($\lambda_0 = \lambda_n / \lambda_c$) и значений проектного критерия ($R_b = \delta_0 / (\lambda_c R_0)$).

Как видно из графика, наибольшие значения необходимой концентрации наполнителя будут при увеличении значения теплового симплекса и уменьшении значений параметрического проектного критерия. В принципе, количественные значения изменения необходимой концентрации наполнителя свидетельствуют о том, что использование смеси материалов в теплозащитном слое позволяет добиться нормативной глубины оттаивания дорожного основания, которая характеризуется проектным критерием, в широком диапазоне изменения исходных параметров.

Рассмотрим конкретные примеры определения целесообразности использования теплоизоляционных смесей при строительстве автомобильных дорог. Дорога проектируется для сложных геоэкологических условий: при наличии на различных участках трассы подземных ледяных линз, залегающих на разной глубине. В этом случае, расчетное значение термического сопротивления при постоянной толщине теплозащитного слоя дорожной одежды будет разным для различных участков трассы. По формуле (9) находим, что концентрация наполнителя, обеспечивающего нерастепление дорожного основания, будет изменяться от 10 до 40% (в зависимости от допустимой глубины оттаивания грунтов дорожного основания) при использовании песка в качестве связующего материала. Далее, для выбора оптимального проектного решения необходимо оценить выполнение условия (8). Это даст возможность обеспечить, не только технологическую, но и экономическую эффективность использования конкретных строительных материалов. (Все фактические данные заимствованы из открытых источников и являются усредненными характеристиками). 1. Оценим целесообразность использования в качестве наполнителя теплозащитной смеси керамзитового гравия (5-10 мм) при отсыпки автомобильной дороги. Исходные данные. Цена гравия составляет 2700 руб./м³. Коэффициент теплопроводности гравия данной крупности составляет 0,11-0,18. Вт/мК. Для расчетного запаса примем максимальное значение, равное 0,18. Вт/мК. Гравий используется совместно со связующим – речным

песком. Стоимость речного песка составляет 900 руб./м³. Теплопроводность песка, в зависимости от влажности изменяется от 1,1 до 1,9 Вт/мК. Расчет. Для оценки целесообразности использования при строительстве дороги смеси керамзитового гравия с песком при формировании теплоизоляционного слоя, воспользуемся формулой (8). Подсчитаем ценовой и тепловой симплексы: «C₀» и «λ₀». C₀ = (2700/900) = 3,0. λ₀ = (0,18/1,1) = 0,16 для сухого песка и λ₀ = (0,18/1,9) = 0,095 для влажного песка. По формуле (8) определяем предельное значение ценового симплекса «C₀» при различной концентрации керамзитового гравия в смеси. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Расчет значений ценового симплекса для керамзито-песчаной смеси

Концентрация керамзита в смеси, «т»	0,1	0,2	0,3	0,4
<i>Сухой песок λ₀ = 0,16</i>				
Ценовой симплекс, «C ₀ »	21,0	11,2	8,1	6,7
<i>Влажный песок λ₀ = 0,095</i>				
Ценовой симплекс, «C ₀ »	21,7	12,0	9,1	7,9

Сравнивая данные расчетов со значением предельного ценового симплекса (C₀ = 3,0) видим, что во всем диапазоне изменения теплового симплекса и концентрации наполнителя в смеси, условие (8) выполняется. То есть, использование керамзитового гравия для формирования теплоизоляционной смеси является экономически оправданным.

Выполним аналогичные расчеты для оценки целесообразности использования перлитопесчаной смеси. Цена вспученного перлита составляет 7100 руб./м³. Коэффициент теплопроводности перлита составляет 0,07-0,09. Вт/мК. Для расчетного запаса примем максимальное значение, равное 0,09. Вт/мК. Перлит используется совместно со связующим – горным песком. Стоимость горного песка составляет 830 руб./м³. Теплопроводность песка, в зависимости от влажности изменяется от 0,37 до 1,3 Вт/мК.

Подсчитаем ценовой и тепловой симплексы: «C₀» и «λ₀». C₀ = (7100/830) = 8,6. λ₀ = (0,09/0,37) = 0,24 для сухого песка и λ₀ = (0,09/1,3) = 0,07 для влажного песка. По формуле (8) определяем предельное значение ценового симплекса «C₀» при различной концентрации керамзитового гравия в смеси. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Расчет значений ценового симплекса для перлитопесчаной смеси

Концентрация керамзита в смеси, «т»	0,1	0,2	0,3	0,4
<i>Сухой песок λ₀ = 0,24</i>				

Ценовой симплекс, «C ₀ »	20,5	10,7	7,4	5,9
<i>Влажный песок $\lambda_0 = 0,07$</i>				
Ценовой симплекс, «C ₀ »	22,0	12,5	9,7	8,7

Сравнивая данные расчетов с предельным значением ценового симплекса для перлитопесчаной смеси ($C_0 = 8,6$) видим, что при концентрации 30-40% условие (8) для сухого связующего не выполняется. Дополнительные расчеты показывают, что предельным значением концентрации перлита в смеси является 25%. При более высокой концентрации для обеспечения нормативного термического сопротивления дорожной одежды, использовать перлит в качестве теплоизоляционного наполнителя экономически не целесообразно. Необходимо рассмотреть возможность замены перлита более дешевым наполнителем, даже если его коэффициент теплопроводности будет в два раза выше. Например, использовать керамзитовый гравий.

Заключение

Исследовано влияние теплофизических характеристик связующего и наполнителя на целесообразность использования теплоизоляционных смесей в дорожных одеждах. Для общности анализа введены три новых безразмерных параметрических критерия: теплофизический симплекс, характеризующий отношение коэффициентов теплопроводности наполнителя и связующего; стоимостной симплекс, характеризующий отношение стоимости единицы объема наполнителя к единице объема связующего; проектный критерий, характеризующий отношение проектного значения толщины теплоизоляционного слоя в дорожной одежде и произведения коэффициента теплопроводности связующего и нормируемого значения термического сопротивления теплозащитного слоя, не допускающего глубину оттаивания дорожного основания выше допустимого значения. Построена в безразмерном виде целевая функция, которая позволяет определить эффективные параметры теплозащитного слоя в дорожной одежде, обеспечивающие нормативную глубину оттаивания дорожного основания. Получены основные количественные закономерности, характеризующие взаимосвязь концентрации наполнителя с безразмерными симплексами, определяющими значение целевой функции. Научная новизна заключается в получении функциональных зависимостей для определения предельных значений безразмерных симплексов, определяющих целесообразность применения бинарных смесей и позволяющих найти границу эффективности использования теплоизоляционных смесей с различными теплофизическими свойствами. Установлено, что теплоизоляционные смеси материалов могут быть рекомендованы в качестве эффективной замены однородных строительных материалов при проектировании дорожных одежд. Показано, что во многих, практически интересных случаях, рациональным выбором состава теплоизоляционных смесей можно добиться нормативной глубины оттаивания дорожного основания,

Дальнейшие исследования необходимо продолжить в направлении оценки целесообразности использования в конструкциях дорожных одежд для арктического региона наряду с теплоизоляционными, теплоаккумулирующих слоев и их оптимальных параметров, обеспечивающих минимальное тепловое влияние внешней среды на дорожное основание.

Библиография

1. Галкин А.Ф., Курта И.В., Панков В.Ю. Использование горелых пород при подземной прокладке кабельных линий связи в криолитозоне // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 12. С. 131-137. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2946. EDN: LESDKA.
2. Mu Y H, Ma W, Wu Q B, et al. Thermal regime of conventional embankments along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions. Cold Reg Sci Technol. 2012; 70: 123-131.
3. Wang S J, Chen J B, Zhang J Z, et al. Development of highway constructing technology in the permafrost region on the Qinghai Tibet Plateau. Sci China Technol Sci. 2009; 52: 497-506. DOI: 10.1007/s11431-008-0355-7. EDN: BVIAUU.
4. Варламов С.П., Жирков А.Ф., Находкин Д.А. Температурный режим почвогрунтов при нарушении покровов в современных климатических условиях Центральной Якутии // Наука и образование. 2017. № 4 (88). С. 65-71.
5. Сериков С.И., Шац М.М. Морозобойное растрескивание грунтов и его роль в состоянии поверхности и инфраструктуры г. Якутска // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2018. № 1. С. 56-69. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.04. EDN: YSEQAU.
6. Шапран В. В., Фазилова З. Т. Факторы, оказывающие влияние на развитие продольных профильных деформаций земляного полотна в криолитозоне // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 2. С. 82-101. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-82-101 EDN: WZNPPP.
7. Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Шац М.М., Сивцев М.А. Численное моделирование изменения мерзлотных условий взлётно-посадочной полосы аэропорта Олекминск // Маркшейдерия и недропользование. 2021. № 5 (115). С. 22-32. EDN: DDVWSC.
8. Бессонов И. В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах // Транспортное строительство. 2022. № 1. С. 14-17. EDN: UNQHNE.
9. Galkin A., Pankov V.Y. Thermal protection of roads in the permafrost zone. Journal of Applied Engineering Science. 2022. Т. 20. № 2. С. 395-399. DOI: 10.5937/jaes0-34379. EDN: NLYVAN.
10. Ma W, Feng G L, Wu Q B, et al. Analyses of temperature fields under the embankment with crushed-rock structures along the Qinghai Tibet Railway. Cold Reg Sci Technol. 2008; 53: 259-270.
11. Ключков Я.В., Непомнящих Е.В., Линейцев В.Ю. Применение пеностекла для регулирования теплового режима грунтов в сложных климатических условиях // Вестник ЗабГУ. 2015. № 06 (121). С. 9-15. EDN: UMMZKZ.
12. Mu Y H, Ma W, Wu Q B, et al. Cooling processes and effects of crushed rock embankment along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions. Cold Reg Sci Technol. 2012; 78: 107-114.
13. Бек-Булатов А.И. Применение Styrodur® в автодорожном строительстве // Строительные материалы. 2000. № 12. С. 22-23. EDN: IAJLOH.
14. Hanli Wu, Jenny Liu, X. Zhang. Feasibility study on use of cellular concrete for air convection embankment on permafrost foundations in Fairbanks, Alaska. Transportation Geotechnics. 2020. Vol. 22. 100317. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100317.
15. Sun Y F. Permafrost Engineering in the Qinghai-Tibet Railway: Research and Practice. J Glaciol Geocryol. 2005; 27: 153-162.
16. Wu Q B, Zhang Z Q, Liu Y Z. Long-term thermal effect of asphalt pavement on permafrost under embankment. Cold Reg Sci Technol. 2010; 60: 221-229.
17. Золотарь И.А. Некоторые вопросы проектирования и строительства автомобильных дорог в северных районах области многолетней мерзлоты // Вопросы транспортного

строительства в районах вечной мерзлоты. М.: ЦНИИС, 1959. С. 24-33.

18. Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu. Calculation of thermal conductivity coefficient of thermal insulation mixtures. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 918 (2020) 012009.

19. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Фёдоров Я.В. Расчетный коэффициент теплопроводности бинарной смеси // Арктика и Антарктика. 2022. № 4. С. 11-19. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.4.39349 EDN: ZORQDG URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=39349

20. Galkin, A.F., Zheleznyak, M.N., Zhirkov, A.F. Increasing Thermal Stability of the Roads in Cryolithic Zone // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. P. 412-419. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.029. EDN: XYMWGU.

21. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.

22. Lichteneker K. Zur Widerstands berechnung misch kristall freier Legierungen. Physikalische Zeitschrift. 1929. Bd. 30. No. 22. SS. 805-810.

23. Галкин А.Ф. Определение допустимой глубины оттаивания дорожного полотна криолитозоны // Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 5. С. 18-22. DOI: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-5-18-22> EDN: KBSVHT.

24. Галкин А.Ф., Плотников Н.А. Выбор строительного материала для теплоизоляционного слоя дорожной одежды // Строительные материалы. 2023. № 9. С. 57-64. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-57-64> EDN: KKKYBQ.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом изучения является исследование экономической эффективности применения теплоизоляционных смесей при строительстве дорог в криолитозоне.

Тема исследований актуальна. Одним из наиболее эффективных способов снижения уровня проявлений криогенных процессов является минимизация теплового взаимодействия инженерных сооружений с мерзлыми грунтами, которое может быть достигнуто путем использования теплозащитных материалов в конструкциях дорожных одежд. Главным недостатком данного способа управления тепловым режимом дорожных оснований, является высокая стоимость теплоизоляционных материалов. Одним из возможных вариантов снижения стоимости строительства в таких случаях является использование при возведении теплоизоляционных слоев в дорожных одеждах теплозащитных смесей. Целью работы являлось определение экономической эффективности использования двухкомпонентных строительных теплоизоляционных материалов в конструкциях дорожных одежд.

Методология исследования основана на применении метода формализации (исследования целевых математических функций). По полученным формулам были проведены варианты расчеты.

Научная новизна исследований в статье не отражена автором. По-видимому, она заключается в применении самой методики оценки экономической эффективности применения теплоизоляционных смесей при строительстве дорог. Ее необходимо в статье дополнить.

Стиль статьи – научный. Авторами в статье представлены собственные расчеты, графики, рисунки и обоснования к ним. Объем статьи не совсем выдержан, его следует увеличить на 3-4 тыс. знаков.

Автором показано, что абсолютные значения предельного стоимостного симплекса

растут с уменьшением концентрации наполнителя быстрее, независимо от величины безразмерного коэффициента теплопроводности смеси. Причем, темп повышения выше для смесей с большим безразмерным коэффициентом теплопроводности. Например, при уменьшении концентрации наполнителя с 0,45 до 0,25 для смесей с симплексом теплопроводности, равным 0,5, увеличение значения предельного стоимостного симплекса происходит приблизительно в 2 раза, а для смесей с симплексом теплопроводности, равным 0,05 (в 10 раз меньше) увеличение значения предельного стоимостного симплекса происходит всего в 1,4 раза.

Поскольку в статье экономическая эффективность применения теплоизоляционных смесей при строительстве дорог не приводится в стоимостном выражении (нет суммы производственных затрат в рублях, нет периода окупаемости затрат и т.п.), поэтому, предлагается скорректировать название статьи. Например: «Изменение стоимостного симплекса при строительстве дорог в криолитозоне с применением теплоизоляционных смесей».

Библиография статьи включает в себя 22 литературных источника, в том числе 11 - на иностранном языке. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на литературные источники.

Выводы в статье обоснованы и отражают результаты проведенных исследований. Автором установлено, что целесообразность использования смесей увеличивается с увеличением концентрации теплоизоляционного наполнителя в смеси и уменьшением его коэффициента теплопроводности. При этом первый показатель (концентрация наполнителя) является более значимым. Чем меньше концентрация наполнителя, тем больше допустимое значение стоимостного симплекса, которое практически не зависит, от безразмерного коэффициента теплопроводности.

Данная статья может быть полезна широкому кругу ученых. Она рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения замечаний.

Результаты процедуры повторного рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, определение области экономической эффективности использования двухкомпонентных строительных теплоизоляционных материалов в конструкциях дорожных одежд для достижения нормативной глубины оттаивания дорожного основания для реализации возможных вариантов снижения стоимости строительства в таких случаях и использование при возведении теплоизоляционных слоев в дорожных одеждах теплозащитных смесей.

Методология исследования, исходя из анализа статьи можно сделать вывод о том, что автором статьи использовался метод математического анализа с исследованием целевую функцию затрат, осуществляется следующий алгоритм выбора вида и концентрации наполнителя в смеси: Коэффициент теплопроводности бинарной смеси может быть определен по формуле К. Лихтенеккера, по известному значению проектного параметра R_b находится необходимая концентрация теплоизоляционного наполнителя в смеси, обеспечивающая нерастепление дорожного основания, которая по формуле проверяется на выполнение условия экономической целесообразности использования данного вида смеси в дорожной одежде. При выполнении условия параметры теплоизоляционного слоя дорожной одежды будут не только обеспечивать необходимый температурный режим дорожного основания, но и будут экономически целесообразными.

.Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о криогенных процессах, которые происходят при антропогенном воздействии на окружающую среду в арктических регионах, негативно влияющих на надежность эксплуатации линейных инженерных сооружений, в частности, автомобильных и железных дорог.

Научная новизна заключается в попытке автора в получении функциональных зависимостей для определения предельных значений безразмерных симплексов, определяющих целесообразность применения бинарных смесей и позволяющих найти границу эффективности использования теплоизоляционных смесей с различными теплофизическими свойствами. Установлено, что теплоизоляционные смеси материалов могут быть рекомендованы в качестве эффективной замены однородных строительных материалов при проектировании дорожных одежд. Показано, что во многих, практически интересных случаях, рациональным выбором состава теплоизоляционных смесей можно добиться нормативной глубины оттаивания дорожного основания. Дальнейшие исследования необходимо продолжить в направлении оценки целесообразности использования в конструкциях дорожных одежд для арктического региона наряду с теплоизоляционными, теплоаккумулирующих слоев и их оптимальных параметров, обеспечивающих минимальное тепловое влияние внешней среды на дорожное основание.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим механизм влияния теплофизических характеристик связующего и наполнителя на целесообразность использования теплоизоляционных смесей в дорожных одеждах.

Библиография исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, однако не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся у автора статьи информации, полученной в результате анализа литературных источников и собственных исследований.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.