

УДК 625.87:536.21

КРИТЕРИЙ ВЫБОРА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД И ОСНОВАНИЙ

Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: afgalkin@yandex.ru

Актуальность проблемы обоснована кратким анализом литературных источников, содержащих результаты исследований по влиянию температурного фактора на эффективность и безопасность эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне. Анализ показал согласованность мнения профессионального сообщества в том, что, создавая дорожные одежды с дополнительным теплоизоляционным (теплозащитным) конструктивным слоем, можно снизить негативное влияние криогенных процессов на дорожное полотно и существенно повысить надежность эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне. Предложен новый способ оперативной оценки экономической эффективности использования различных материалов для теплоизоляционного слоя, при проектировании дорожных одежд. Введено два новых понятия: «единица термического сопротивления» и «единица термической проводимости». Показано на конкретном примере, как с помощью новых единиц оперативно оценить эффективность использования различных теплоизоляционных материалов при проектировании дорожных одежд в криолитозоне. Рассмотрены не только однородные материалы, но и бинарные смеси, состоящие из теплоаккумулирующего связующего и теплоизоляционного наполнителя различной концентрации. Получен простой критерий оценки эффективности использования различных материалов в конструктивных теплозащитных слоях дорожной одежды, не зависящий от проектного термического сопротивления теплозащитного слоя. Установлено, что выбор экономической эффективности материалов для конкретного проектного решения не зависит от физических характеристик дорожной одежды и основания и полностью определяется критерием, численно равным произведению стоимости единицы объема (кубического метра) строительного материала на коэффициент его теплопроводности.

Ключевые слова: автомобильная дорога, криолитозона, прогноз, глубина оттаивания, дорожная одежда, коэффициент теплопроводности, термическое сопротивление, затраты, экономическая эффективность, выбор

SELECTION OF THERMAL INSULATION MATERIAL FOR THE STRUCTURAL LAYER OF ROAD CLOTHING

Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: afgalkin@yandex.ru

The urgency of the problem is justified by a brief analysis of literature sources containing the results of studies on the influence of the temperature factor on the efficiency and safety of the operation of highways in the cryolithozone. The analysis showed the consistency of the opinion of the professional community that by creating road clothes with an additional thermal insulation (heat-protective) structural layer, it is possible to reduce the negative impact of cryogenic processes on the roadway and significantly increase the reliability of the operation of highways in the cryolithozone. A new method of operational evaluation of the economic efficiency of using various materials for the thermal insulation layer in the design of road clothes is proposed. Two new concepts "unit of thermal resistance" and "unit of thermal conductivity" have been introduced. It is shown by concrete examples how, with the help of new units, to quickly assess the effectiveness of using various thermal insulation materials in the design of road coverings in the cryolithozone. Not only homogeneous materials are considered, but also binary mixtures consisting of a heat-accumulating binder and a heat-insulating filler of various concentrations. A simple criterion for evaluating the effectiveness of the use of various materials in the structural heat-protective layers of the pavement, independent of the design thermal resistance of the heat-protective layer, is obtained. It is established that the choice of cost-effective materials for a specific design solution does not depend on the physical characteristics of the pavement and the base and is completely determined by a criterion numerically equal to the product of the cost of a cubic meter of building material by its thermal conductivity coefficient.

Keywords: automobile road, cryolithozone, forecast, thawing depth, thermal conductivity coefficient, road clothing, thermal resistance, costs, economic efficiency, choice

Эксплуатация автомобильных дорог в криолитозоне осложнена негативным влиянием ряда криогенных процессов, к которым, прежде всего, относятся: пучение грунтов, криогенное растрескивание грунтов, образование наледей и т.п. [1–3]. Наиболее значимыми по степени влияния на дорожные покрытия в городских условиях являются процессы криогенного растрескивания грунтов в осенний период. Например, авторами работ [4, 5] проведены системные

наблюдения за влиянием процесса морозобойного растрескивания дорожных одежд на магистральных улицах г. Якутска. Отмечается, что, несмотря на систему мер борьбы и регулярные ремонты дорожного полотна, процессы морозобойного растрескивания ликвидировать не удастся уже многие годы. Причем появляются морозобойные трещины в одних и тех же местах и в один и тот же период года, затрагивая при этом не только собственно проезжую часть

дороги, но и придорожные тротуары и водоотводные придорожные лотки. Материальные и финансовые издержки на поддержание автомобильных дорог криолитозоны в рабочем состоянии, как отмечают авторы работ [4–6], довольно значительны. При этом в широких инженерных кругах давно утвердилось мнение, что избежать влияния многих негативных криогенных процессов на безопасность, повысить надежность эксплуатации и продлить безремонтный период дорог возможно путем использования теплоизоляции дорожных оснований [7–9] или использованием специальных теплозащитных слоев в дорожных одеждах [10–12]. При этом предлагается использовать различные теплоизоляционные материалы, как однородные, так и специальные смеси, состоящие из теплоаккумулирующего связующего материала и гранул синтетического теплоизоляционного наполнителя, например, пенополиуретановых гранул. Многие исследователи и инженеры-практики считают перспективным использование пеностекла в качестве материала для устройства теплозащитных слоев в дорожных одеждах и основаниях [7]. Отмечается также эффективность использования горелых пород при строительстве автомобильных дорог. Анализ основных способов и средств тепловой защиты автомобильных дорог в криолитозоне содержится в работе [6].

При проектировании дорог в криолитозоне остается актуальным выбор наиболее эффективного материала (как в техническом, так и экономическом плане) для устройства теплозащитных конструктивных слоев в дорожной одежде либо теплоизоляционных подсыпок для защиты дорожных оснований от негативного влияния криогенных процессов, в том числе процессов сезонного промерзания-оттаивания грунтов дорожного основания [13]. Прежде всего, это связано с существенной зависимостью прочностных свойств большинства грунтов криолитозоны от фазового состояния и температуры льда в порах. При понижении температуры прочность дисперсных пород возрастает. А при повышении, наоборот, снижается, причем даже в зоне отрицательных значений температуры пород. При наличии фазового перехода «лед – вода», в некоторых случаях дисперсные мерзлые породы полностью теряют свою прочность, превращаясь в сыпучий материал. Подробно этот вопрос рассмотрен в работах [14–16]. Обобщение исследова-

ний по данному направлению приведено в аналитическом обзоре в работе [17].

Цель настоящего исследования – получение простой инженерной зависимости для оперативной оценки экономической эффективности использования различных материалов в теплоизоляционном слое дорожной одежды.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели введем понятия «единица термического сопротивления» (R_1) и «единица тепловой проводимости» строительного материала (λ_1). По физическому смыслу термическое сопротивление – это отношение расстояния (толщины конструктивного слоя) к коэффициенту теплопроводности материала конструктивного слоя. То есть это расстояние, на котором при коэффициенте теплопроводности материала, равном единице, градиент температуры равен 1,0 К (1,0 °С). Соответственно, единица термического сопротивления – это расстояние, равное 1,0 м, на котором при коэффициенте теплопроводности материала, равном единице, градиент температуры равен 1,0 К (1,0 °С). Величина, обратная единице термического сопротивления, – единица проводимости материала ($\alpha_1=1/R_1$). По физическому смыслу – это значение коэффициента теплопроводности, которое обеспечивает перепад температуры в 1,0 К (1,0 °С) на расстоянии, равном 1,0 м. Размерность единицы термического сопротивления равна [м²·К/Вт], а единицы проводимости [Вт/м²·К].

Теперь, если нам известно из теплового расчета необходимое термическое сопротивление конструктивного слоя (R_T), используя понятие единицы термического сопротивления (R_1), мы можем определить, сколько «единиц термического сопротивления» конкретного материала содержится в заданном термическом сопротивлении по формуле

$$N = R_T / R_1. \quad (1)$$

Поскольку в единицу термического сопротивления входит толщина слоя в один метр (при площади в 1 м² это дает объем материала в 1 м³, что удобно для экономической оценки), то количество слоев N будет, как правило, меньше единицы. Поэтому более корректно называть параметр N частью «единицы термического сопротивления». Впрочем, для количественной оценки это роли не играет.

Если стоимость единицы термического сопротивления конкретного материала равна «С» (стоимость одного слоя), то стоимость материала всего теплозащитного слоя (руб./м³) определится по формуле

$$C_T = N \cdot C. \quad (2)$$

Формулу (2) с учетом (1) запишем в виде $C_T = C \cdot R_T / R_1 = R_T \cdot C_1 \cdot \lambda / (\delta=1) = R_T \cdot (C_1 \cdot \lambda)$, (3) где λ – коэффициент теплопроводности конкретного материала (Вт/м·К) стоимостью C_1 (руб./м³).

Анализ выражения (3) позволяет сделать важный вывод. Если нам надо сравнить различные материалы для возведения теплоизоляционного слоя дорожной одежды по их экономической эффективности, то собственно заданное проектом необходимое значение термического сопротивления (R_T) никакого влияния на конечный результат не имеет. Определяющим является комплекс ($C_1 \cdot \lambda$). Например, если имеем два материала с коэффициентами теплопроводности λ_1 и λ_2 и стоимостью C_1 и C_2 , то оценка эффективности использования одного из них определится по формуле

$$C_3 = C_{T1} / C_{T2} = (C_1 \cdot \lambda_1) / (C_2 \cdot \lambda_2). \quad (4)$$

Если C_3 больше единицы, то выбираем второй материал, как экономически более эффективный. Если $C_3 \leq 1$, то выбираем первый материал.

Формула (4) однозначно позволяет утверждать, что выбор материала для возведения теплозащитного слоя не зависит от теплотехнических свойств грунтов дорожного основания и заданного проектом значения необходимого термического сопротивления теплоизоляционного слоя. А именно, допускающего оттаивание грунтов на заданную глубину или сохранение их в мерзлом состоянии в течение всего теплого периода года (проектирование и эксплуатация объектов криолитозоны по первому и второму принципу согласно СНиП [18, 19]).

Если предполагается использовать в конструкции дорожной одежды бинарные теплоизоляционные смеси [10–12], то, определяющий экономическую эффективность комплекс (критерий эффективности) будет иметь вид

$$(C \cdot \lambda) = (m \cdot C_c + C_n(1-m)) \cdot \lambda_{cn} = ((C_c - C_n) \cdot m + C_n) \cdot \lambda_{cn}, \quad (5)$$

где C_c – стоимость материала связующего, руб./м³; C_m – стоимость материала наполнителя, руб./м³; λ_{cn} – коэффициент тепло-

проводности бинарной смеси, Вт/м·К; m – концентрация наполнителя в смеси, д.е.

Коэффициент теплопроводности бинарной смеси может быть определен по формуле В.И. Оделевского или П. Шведтфейгера [20]. В работе [21] показано, что принципиальной разности в получаемом результате нет: обе формулы дают приблизительно одинаковые результаты во всем реальном диапазоне изменения концентрации легкого теплоизоляционного наполнителя в теплоаккумулирующем связующем материале. Для использования при выборе теплоизоляционного материала из трех и более компонентных смесей необходимо провести дополнительные исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим конкретный пример использования предлагаемого метода выбора теплоизоляционного материала для дорожной одежды. Пусть заданное проектом термическое сопротивление теплоизоляционного слоя в дорожной одежде « R_T », допускающее оттаивание дорожного основания на допустимую глубину, обеспечивающую безопасную эксплуатацию дороги, равно 0,5 м²·К/Вт. Для обустройства теплоизоляционного слоя в наличии имеется пять различных материалов, характеристики которых приведены в табл. 1. Характерные данные по стоимости материалов и их коэффициенту теплопроводности заимствованы из доступных открытых источников. Пятая колонка содержит результаты расчетов по формуле (3) при термическом сопротивлении теплоизоляционного слоя, равном единице.

Традиционный путь выбора строительного материала при заданном термическом сопротивлении теплоизоляционного слоя заключается в следующем. Сначала определяется необходимая толщина слоя из каждого материала по формуле

$$H = (R_T \cdot \lambda_i), \text{ м.} \quad (6)$$

Потом определяется стоимость строительных теплоизоляционных материалов на 1 м² площади дороги по формуле

$$C_i = H \cdot C_m \cdot (S = 1 \text{ м}^2), \text{ руб./м}^3. \quad (7)$$

Здесь приняты следующие обозначения: λ_i – коэффициент теплопроводности строительного материала, Вт/(м·К); $i = 1, 2, \dots, 6$ – порядковый номер материала в табл. 1; C_m – стоимость строительного материала, руб./м³.

Таблица 1

Характеристики теплоизоляционных материалов

№	Наименование материала	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Стоимость, руб./м ³	Единица эффективности, (С·λ)
1	2	3	4	5
1	Песок сухой	0,50	350,0	175,0
2	Керамзитовый щебень	0,11	1900,0	209,0
3	Керамзитовый песок	0,23	2250,0	517,5
4	Экструдированный пенополистирол	0,032	4785,0	153,1
5	Пенополистирол ПСБ-С-15Ф	0,053	2300,0	121,9
6	Пеностекло гранулированное	0,043	6250,0	268,7

Таблица 2

Затраты на материалы для устройства теплоизоляционного слоя в дорожной одежде

№	Наименование материала	Толщина слоя, м	Затраты на материалы, руб./м ³
1	2	3	4
1	Песок сухой	0,25	87,5
2	Керамзитовый щебень	0,055	104,5
3	Керамзитовый песок	0,115	258,8
4	Экструдированный пенополистирол	0,016	76,6
5	Пенополистирол ПСБ-С-15Ф	0,027	62,1
6	Пеностекло гранулированное	0,022	137,5

Далее сравниваются значения «Сi» для всех материалов и выбирается материал с наименьшим значением показателя. Результаты расчетов по традиционной методике выбора материала приведены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, наиболее экономически целесообразным для возведения теплоизоляционного слоя является применение пенополистирола марки ПСБ-С-15Ф. Этот же результат можно получить сразу, не прибегая к дополнительным расчетам по формулам (6) и (7), а используя предлагаемый критерий экономической эффективности (5 колонка в табл. 1), что значительно проще. И, главное, при выборе материалов мы никак не привязаны к конкретному проектному значению термического сопротивления. То есть при выборе строительного материала для использования в теплозащитном слое дорожной одежды или теплоизоляционной подсыпке нет необходимости в дополнительных теплофизических расчетах на предварительной стадии проектирования. Объединяя формулы (6) и (7), мы приходим к формуле (3), что свидетель-

ствует о правильности нового методического подхода.

При использовании в теплозащитном слое дорожной одежды смеси материалов с различными ценовыми и физическими характеристиками, целесообразно произвести расчет коэффициента теплопроводности смеси с использованием известных зависимостей [20] и оптимизировать целевую функцию стоимости смеси в зависимости от концентрации отдельных компонентов [11]. Предложенный методический подход и полученный критерий экономической эффективности для выбора конкретного строительного материала из имеющихся в распоряжении может быть использован при проектировании любых теплоизоляционных покрытий. В частности, при проектировании теплозащитных подсыпок для размещения топливных резервуаров, теплозащитных строительных панелей, теплозащитных крепей подземных сооружений, тепловой защиты линейных сооружений связи и других объектов гражданского и промышленного строительства.

Заключение

Актуальность проблемы обоснована кратким анализом литературных источников, содержащих результаты исследований по влиянию температурного фактора на эффективность и безопасность эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне. Анализ показал согласованность мнения профессионального сообщества в том, что, создавая дорожные одежды с дополнительным теплоизоляционным (теплозащитным) конструктивным слоем, можно снизить негативное влияние криогенных процессов на дорожное полотно и существенно повысить надежность эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне. Предложен новый способ оперативной оценки экономической эффективности использования различных материалов для теплоизоляционного слоя, при проектировании дорожных одежд. Приведена простая инженерная методика выбора оптимального строительного материала при проектировании теплоизоляционного слоя дорожной одежды. Обоснованы понятия «единица термического сопротивления» и «единица тепловой проводимости». Установлено, что выбор экономически эффективных материалов для конкретного проектного решения не зависит от физических характеристик дорожной одежды и основания и полностью определяется критерием, численно равным произведению стоимости кубического метра строительного материала на коэффициент его теплопроводности. Показано, что использование новых понятий в практике проектирования дорог криолитозоны позволяет оперативно выбрать конкретный материал из нескольких имеющихся, всего по двум характеристикам: стоимости единицы объема (1 м^3) материала и его коэффициента теплопроводности. Причем это решение (по капитальным затратам на материалы) будет наиболее экономически эффективным. Предложенный методический подход и полученный критерий экономической эффективности для выбора конкретного строительного материала может быть использован при проектировании любых теплоизоляционных покрытий, используемых в инженерных сооружениях криолитозоны, как наземного, так и подземного размещения. В частности, при проектировании теплозащитных подсыпок для размещения топливных резервуаров, теплозащитных строительных панелей, теплозащитных крепей подземных со-

оружений, тепловой защиты линейных сооружений связи. Статья будет полезна как инженерам-проектировщикам дорожной отрасли, так и научным работникам в области строительной физики и геокриологии. В методическом плане статья будет интересна преподавателям и аспирантам, обучающимся по различным специальностям направления 1.6. «Науки о Земле» и 2.1 «Технические науки», в частности – учебной специальности 08.02.05 «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и аэродромов». Дальнейшие исследования целесообразно направить на поиск оптимальных решений при использовании в дорожной одежде теплозащитного слоя, состоящего из смеси материалов с различными теплофизическими свойствами и стоимостью.

Список литературы

1. Железняк М.Н., Шестернев Д.М., Литовко А.В. Проблемы устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне // *Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»* М.: «Геомаркет», 2018. С. 223–227.
2. Шестернев Д.М., Литовко А.В. Комплексные исследования по выявлению деформаций на автомобильной дороге «Амур» // *Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»*. М.: «Геомаркет», 2018. С. 309–314.
3. Кондратьев В.Г., Кондратьев С.В. Как защитить федеральную автодорогу «Амур» Чита – Хабаровск от опасных инженерно-геокриологических процессов и явлений // *Инженерная геология*. 2013. № 5. С. 40–47.
4. Шац М.М. Современное состояние городской инфраструктуры г. Якутска и пути повышения ее надежности // *Геориск*. 2011. № 2. С. 40–46.
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.
6. Панков В.Ю., Бурнашева С.Г. Анализ способов защиты автомобильных дорог от негативных криогенных процессов // *Лучшая студенческая статья 2020. МЦНС «Наука и просвещение»*. 2020. С. 52–55.
7. Клочков 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.
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.
9. Железняк И.И., Сакисян Р.М. Методы управления сезонным промерзанием грунтов в Забайкалье. Новосибирск: Наука, 1987. 128 с.
10. Галкин А.Ф., Курта И.В., Панков В.Ю., Потапов А.В. Оценка эффективности использования слоистой конструкции тепловой защиты при строительстве дорог в криолитозоне // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2020. № 4. С. 24–28. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-4-24-28.

11. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Повышение тепловой устойчивости дорожных одежд в криолитозоне // Строительные материалы. 2021. № 7. С. 26–31.
12. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal protection of roads in the permafrost zone. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. No. 2. P. 395–399. DOI: 10.5937/jaes0-34379.
13. Галкин А.Ф. Влияние термического сопротивления на скорость оттаивания дисперсных пород // Естественные и технические науки. 2021. № 9 (160). С. 82–84.
14. Вялов С.С. Реологические основы механики мёрзлых грунтов. М.: Высш. школа, 1978. 447 с.
15. Цыгович Н.А. Механика мёрзлых грунтов. М.: Высш. школа, 1973. 448 с.
16. Teng J., Shan F., He Z., Zhang S., Sheng D. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. *Géotechnique*. 2018. DOI: 10.1680/jgeot.17.P.208.
17. Guofang Xu, Jilin Qi, Wei Wu. Temperature Effect on the Compressive Strength of Frozen Soils: A Review. *Recent Advances in Geotechnical Research, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. 2019. P. 227–236. DOI: 10.1007/978-3-319-89671-7_19.
18. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах / Под ред. Ю.Я. Вели, В.В. Докучаева, Н.Ф. Федорова. Л.: Стройиздат, 1977. 552 с.
19. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М., 1990. 54 с.
20. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
21. Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu. Calculation of thermal conductivity coefficient of thermal insulation mixtures. *IOPConf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 918. 2020. 012009.