

Научная статья
УДК 624.159.2
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_102

Стабилизация земляного полотна из дренирующих грунтов при проектировании вторых путей железных дорог в условиях вечной мерзлоты

Александр Леонидович Исаков^{1✉}, Ирина Сергеевна Моисеева²

^{1, 2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ mylab.alex@yandex.ru✉

² is_moiseeva@mail.ru

Аннотация. При длительной эксплуатации железных дорог в криолитозоне, в частности Байкало-Амурской магистрали, под существующим земляным полотном из дренирующих грунтов в районах распространения высокотемпературных мерзлых грунтов образовались так называемые чаши протаивания. Ключевым фактором их формирования является инфильтрация атмосферных осадков в тело земляного полотна. Количественная оценка этого эффекта в рамках традиционных теплофизических расчетов весьма проблематична в связи с неконтролируемым характером фильтрационных процессов, происходящих в теле земляного полотна. Особую актуальность проблема фильтрации осадков приобретает в связи с тем, что в рамках модернизации Байкало-Амурской магистрали с целью повышения пропускной способности предусматривается строительство вторых путей на общем земляном полотне, которое отсыпается преимущественно из дренирующих крупнообломочных скальных грунтов с учетом действующих норм проектирования.

В данной статье предложена и проиллюстрирована расчетами гипотеза о решении проблемы учета отепляющего действия атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна. Суть ее заключается во введении понятия инфильтрационной теплопроводности, учитываемой при определении суммарного коэффициента теплопроводности дренирующих грунтов земляного полотна, находящихся в талом состоянии. Такой подход к описанию теплофизической картины дренирующих грунтов земляного полотна и его основания позволил обосновать предложенную в работе технологическую схему поэтапной стабилизации границы мерзлых грунтов в основании насыпи при строительстве вторых путей. Технологическая схема, предложенная в статье, обеспечивает исключение отепляющего воздействия атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна. Отличительной особенностью схемы является поэтапная укладка гидроизоляции в верхней части как вновь возводимого, так и существующего земляного полотна, способствующая восстановлению мерзлого состояния грунта под эксплуатируемым путем.

Ключевые слова: земляное полотно, многолетне-мерзлые грунты, коэффициент теплопроводности, вторые пути, инфильтрация атмосферных осадков, гидроизоляционный экран

Для цитирования: Исаков А. Л., Моисеева И. С. Стабилизация земляного полотна из дренирующих грунтов при проектировании вторых путей железных дорог в условиях вечной мерзлоты // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 102–113. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_102.

Original article

Stabilization of the subgrade formed by draining soils in the design of second tracks on railways in cold regions

Alexander L. Isakov^{1✉}, Irina S. Moiseeva²

^{1, 2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ mylab.alex@yandex.ru✉

² is_moiseeva@mail.ru

Abstract. During the operation of railways in the cryolithozone, in particular the Baikal-Amur Mainline, so-called thawing bowls were formed under the existing earth bed from draining soils in areas of high-temperature frozen soils. The infiltration of atmospheric precipitation into the body of the earth's surface is a key factor in its formation. Quantification of this effect is very problematic due to the uncontrolled nature of filtration processes in the body of the earth bed within the framework of traditional thermophysical calculations. The issue of precipitation filtration is particularly pressing given that the modernization of the Baikal-Amur Mainline, aimed at increasing its capacity,

envisioning the construction of second tracks on a common subgrade, which is primarily made of drainable coarse-grained rocky soils, in accordance with current design standards.

In this article, a hypothesis is proposed and justified by numerical modeling to solve the problem of accounting for the warming effect of atmospheric precipitation on the soils of the foundation of the roadbed. Its essence lies in the introduction of the concept of infiltration thermal conductivity, which is taken into account when determining the total coefficient of thermal conductivity of the draining soils of the earth bed in a thawed state. This approach to the description of the thermophysical picture of the draining soils of the earth bed and its base allowed us to substantiate the technological scheme proposed in the work for the phased stabilization of the frozen soil boundary at the base of the embankment during the construction of the second tracks. The process flow diagram proposed in the article eliminates the impact of the warming effect of atmospheric precipitation on the soils of the subgrade foundation. A distinctive feature of the diagram is the staged installation of waterproofing in the upper portion of both the newly constructed and existing subgrade, facilitating the restoration of the frozen state of the soil beneath the operational track.

Keywords: subgrade, permafrost soils, conductivity coefficient, second tracks, precipitation infiltration, waterproofing screen

For citation: Isakov A. L., Moiseeva I. S. Stabilization of the subgrade formed by draining soils in the design of second tracks on railways in cold regions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):102–113. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_102.

Введение

В процессе эксплуатации Байкало-Амурской магистрали (БАМа) на участках распространения высокотемпературных многолетне-мерзлых грунтов по результатам мониторинга, осуществляемого Дальневосточной железной дорогой, фиксируются неравномерные осадки земляного полотна из дренирующих грунтов, искажение плана и продольного профиля трассы, расползание откосов насыпей [1–3]. В результате инженерно-геологических изысканий, выполненных СГУПС на участке Байкало-Амурской магистрали, выявлены так называемые чаши протаивания – зоны оттаявших многолетне-мерзлых грунтов, сформированные в основании земляного полотна, которые являются причиной неравномерной осадки и других

деформаций (рис. 1). Скорость деградации многолетне-мерзлых грунтов в основании земляного полотна существующих железных дорог Восточной Сибири и Дальнего Востока, по данным исследования [4], сегодня составляет около 1–2 см/год. При этом в условиях экстремальных атмосферных осадков, частота и интенсивность которых на территории России имеют тенденцию к росту, скорость деформаций может увеличиваться до 7–9 см/год [5].

Фундаментальными причинами деградации многолетне-мерзлых грунтов в основании земляного полотна железных дорог являются нарушение баланса теплового потока на его поверхности и тепляющее действие атмосферных осадков [6]. Важно заметить, что особенно сильно влияние фильтрующегося поверхност-



Рис. 1. Деформации земляного полотна из-за протаивания льдистых грунтов основания

ного стока наблюдается на участках земляного полотна, сложенного из дренирующих грунтов, через которое вода свободно попадает в подстилающие насыпь грунты. При этом вода оказывает отопляющий эффект и способствует понижению верхней границы мерзлых грунтов (рис. 2), т. е. формированию чаши протаивания непосредственно под насыпью [7].

С целью минимизации рисков возникновения деформаций из-за оттаивания мерзлых грунтов основания в настоящее время на этапе проектирования линейных объектов транспортной инфраструктуры выполняется прогноз температурного режима мерзлых грунтов основания с помощью теплофизических расчетов, а также предусматривается геокриологический мониторинг на период строительства и эксплуатации для наблюдения и контроля за температурным режимом земляного полотна.

Особую актуальность проблема фильтрации осадков приобретает в связи с тем, что в рамках модернизации Байкало-Амурской магистрали с целью повышения пропускной способности предусматривается строительство вторых путей на общем земляном полотне, которое отсыпается преимущественно из дренирующих крупнообломочных скальных грунтов с учетом действующих норм проектирования.

В настоящей статье с использованием введенного понятия инфильтрационной тепло-

проводности обосновывается технологическая схема отсыпки насыпи под вторые пути из дренирующих грунтов, исключающая отопляющее воздействие атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим схему отопляющего воздействия атмосферных осадков на многолетне-мерзлые грунты основания земляного полотна. На представленной схеме (рис. 3) проиллюстрирован механизм формирования чаши протаивания, при котором положение верхней границы мерзлых грунтов претерпевает локальное понижение непосредственно под насыпью. В отличие от связных грунтов, препятствующих влагопереносу, высокая водопроницаемость насыпи из крупнообломочных грунтов способствует свободной миграции дождевых вод. Механизм отопляющего воздействия реализуется посредством инфильтрации атмосферных осадков в тело насыпи. Фильтрующаяся вода, обладая высокой удельной теплоемкостью и имея температуру 15–20 °С, резко повышает теплообмен внутри земляного полотна, активизируя передачу теплоты мерзлым грунтам его основания. Это приводит к разбалансированию термодинамического равновесия на верхней границе многолетне-мерзлых грунтов, что способствует их деградации.

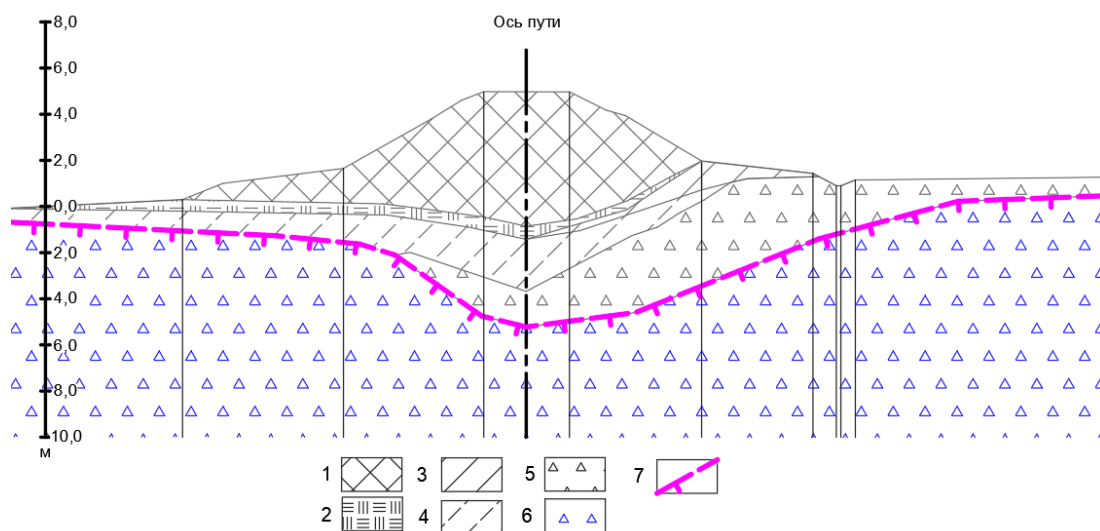


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез железнодорожной насыпи:

1 – техногенные насыпные дренирующие грунты; 2 – торфяной слой; 3 – суглинок твердый слаботорфованный; 4 – супесь щебенистая пластичная; 5 – дресвяный грунт с супесчаным заполнителем; 6 – дресвяный грунт с супесчаным заполнителем мерзлый слаболистый, при оттаивании текучей консистенции; 7 – верхняя граница многолетне-мерзлых грунтов

Принципиально иная картина наблюдается на участках насыпей, сложенных из связных (недренирующих) грунтов, характеризующихся низкими значениями коэффициента фильтрации (рис. 4). В таких условиях возможность инфильтрации атмосферных осадков через тело земляного полотна практически исключена, вследствие чего инфильтрационная составляющая теплопереноса, обусловленная миграцией теплой воды, сводится к минимуму. Теплообмен в системе «насыпь – основание» реализуется преимущественно посредством кондуктивного механизма, описываемого классическими уравнениями теплопроводности с использованием нормативных теплофизических характеристик грунтов.

При возведении насыпи происходит нарушение естественного растительно-мохового покрова и неизбежно изменяется естественный теплообмен. Тем не менее в условиях отсутствия инфильтрации атмосферных осадков в тело земляного полотна доминирующим фактором, способствующим поднятию границы мерз-

лых грунтов, становится экранирующий эффект самого тела насыпи из недренирующего грунта. Как следствие, граница вечной мерзлоты не опускается, а напротив, поднимается и входит в тело насыпи (см. рис. 4), что подтверждается традиционными теплофизическими расчетами, где коэффициент теплопроводности грунтов земляного полотна задается в соответствии с их нормативными характеристиками.

Существующие подходы к описанию теплофизической картины теплопереноса внутри земляного полотна пока не позволяют удовлетворительно решить вопрос, связанный с отепляющим воздействием атмосферных осадков на грунты его основания. Например, в работе [8] приведено математическое описание процессов тепломассопереноса в рамках механики сплошных сред, учитывающее фильтрационное воздействие осадков на понижение границы многолетне-мерзлых грунтов в естественных условиях. Результаты численных расчетов, выполненных в одномерной постановке, показали существенное влияние



Рис. 3. Схема отепляющего воздействия атмосферных осадков для насыпи из дренирующего грунта:
1 – летние осадки

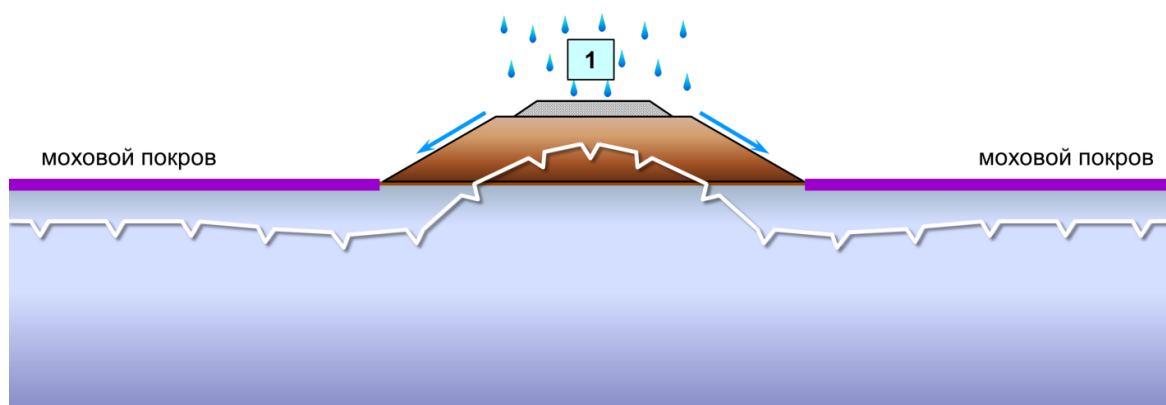


Рис. 4. Схема отепляющего воздействия атмосферных осадков для насыпи из недренирующего грунта:
1 – летние осадки

скорости выпадения осадков на скорость протаивания многолетне-мерзлых грунтов. Однако данное решение, вследствие своей идеализации, не позволяет использовать его для практической оценки в реальных условиях.

Существующие попытки решить этот вопрос путем корректировки температурного режима поверхности земляного полотна, непосредственно контактирующей с летними осадками, как это сделано, например, в [9], не являются удачными. Таким путем добиться соответствия результатов расчета с реальными профилями границы опускания многолетне-мерзлых грунтов (см. рис. 2) не удастся.

В данной работе предлагается гипотеза для решения этой проблемы путем введения дополнительной составляющей в суммарный коэффициент теплопроводности дренирующего грунта земляного полотна – инфильтрационной теплопроводности. Как известно, классическая теплопроводность среды складывается из трех основных составляющих: кондуктивной проводимости, радиационной теплопроводности и конвективного переноса тепла [10–12]. Однако применительно к рассматриваемому случаю – насыпи из дренирующих грунтов – добавляется еще один вид переноса тепла, а именно инфильтрация летних осадков в тело земляного полотна. Поэтому выглядит обоснованным введение в традиционную формулу определения коэффициента теплопроводности талого грунта дополнительного слагаемого, количественно характеризующего отепляющее воздействие атмосферных осадков:

$$\lambda_{th} = \lambda_{eff} + \lambda_{conv} + \lambda_{inf}, \quad (1)$$

где $\lambda_{eff} = \lambda_{cond} + \lambda_{rad}$ – эффективная теплопроводность; λ_{cond} – кондуктивная теплопроводность; λ_{rad} – радиационная теплопроводность; λ_{conv} – конвективная теплопроводность; λ_{inf} – инфильтрационная теплопроводность.

Здесь важно отметить, что инфильтрационная теплопроводность, как и конвективная, не является фундаментальным свойством грунта, в отличие от кондуктивной. Поэтому рассчитывать на точность количественного определения величины λ_{inf} не приходится. Тем не менее качественный анализ инфильтрационной теплопроводности, приведенный ниже, позволяет судить о реальности этого фактора при рассмотрении теплофизической картины в теле земляного полотна, сложенного дренирующими грунтами.

Тепло, переносимое летними осадками внутри земляного полотна, можно оценить как

$$Q_{inf} = C_w \rho_w V \Delta T, \quad (2)$$

где C_w – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); ρ_w – плотность воды, кг/м³; V – средняя за лето объемная скорость фильтрации атмосферной воды, м/с; ΔT – разница между средней температурой осадков (поверхности) и температурой грунта у подошвы насыпи, °C.

Наиболее важным параметром здесь является так называемая объемная скорость фильтрации, которая определяется выражением

$$V = f V_{max}, \quad (3)$$

где f – коэффициент инфильтрационного питания; $V_{max} = h_{летн}/t_{летн}$ – потенциальная скорость инфильтрации, м/с; $h_{летн}$ – суммарное количество летних осадков, м; $t_{летн}$ – продолжительность летнего периода, с.

С другой стороны, по аналогии с законом Фурье инфильтрационный перенос тепла можно представить в интегральном виде следующим образом:

$$Q_{inf} = \lambda_{inf} \frac{\Delta T}{H}, \quad (4)$$

где H – высота насыпи, м.

Приравняв правые части выражений (2) и (4), получим формулу для определения инфильтрационной теплопроводности:

$$\lambda_{inf} = C_w \rho_w V H. \quad (5)$$

Наиболее важным параметром здесь является так называемая объемная скорость фильтрации. Она зависит от слишком многих факторов, чтобы ее можно было реально определить априори. Если с величиной V_{max} все ясно, то с коэффициентом f , определяющим фактическую объемную скорость фильтрации V через толщу земляного полотна H , полная неоднозначность. И это понятно, поскольку здесь накладывается большое количество неопределенных факторов, таких как испарение, задержка воды в теле насыпи, изменение направления фильтрации, неоднородность грунта земляного полотна и т. д. Из формулы (5) видно, что λ_{inf} прямо пропорционально зависит от высоты насыпи H . Но это не означает, что чем выше насыпь, тем больше λ_{inf} , поскольку в формуле присутствует еще один сомножитель V , который обратно пропорционален величине H .

Таким образом, очевидно, что реалистичная априорная оценка коррекции инфильтрации невозможна. Для оценки неопределен-

ного параметра, которым в данном случае является суммарный коэффициент теплопроводности грунта в талом состоянии λ_{th} , может быть использован эмпирический подход. Для этого необходимо подобрать значение λ_{th} , которое соответствует фактической конфигурации верхней границы многолетне-мерзлых грунтов в основании насыпи согласно результатам инженерно-геологических изысканий. Определенный таким образом коэффициент теплопроводности λ_{th} затем может быть использован в дальнейших расчетах применительно к аналогичным условиям.

Для иллюстрации предложенной гипотезы об учете теплопередачи при проникновении атмосферных осадков в тело земляного полотна была использована специализированная программа Freeze-Cold [13], главные особенности которой состоят в следующем:

- снежные отложения, растительно-моховой покров, пенополистирол и т. д. задаются не их термическими коэффициентами, а реальными геометрическими параметрами и среднемесячными значениями их теплофизических характеристик;

- предусмотрена возможность разбиения поперечного сечения земляного полотна на

зоны с учетом или без учета сезонной инфильтрации атмосферных осадков;

- граница мерзлых грунтов определяется не изотермой температуры замерзания грунта, а условием фазовых переходов при замерзании или оттаивании воды в порах грунта.

Результаты исследования

В качестве базового объекта теплофизических расчетов была взята железнодорожная насыпь высотой 3 м, сложенная из дренирующего грунта – галечника, с типичными для восточной части БАМа параметрами. Грунт основания – суглинок. Температура на глубине нулевых годовых амплитуд (15 м) принималась равной $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Климатические характеристики сведены в табл. 1, 2; физико-механические характеристики грунтов и мха приведены в табл. 3, 4.

Ниже приведены результаты теплофизических расчетов, иллюстрирующие этапы сооружения земляного полотна второго пути, начиная со строительства насыпи первого пути.

Первый этап. Стабилизация границы мерзлых грунтов в основании насыпи из дренирующих грунтов через 30 лет после ее сооружения. На рис. 5 показан результат моделирования температурного режима грунтов

Таблица 1

Среднемесячная температура воздуха

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, $^{\circ}\text{C}$	-27,5	-23,1	-13,1	-5,0	8,6	15,3	18,0	14,9	7,4	-3,5	-18,6	-27,0

Таблица 2

Теплофизические характеристики снега

Параметр	Месяц						
	X	XI	XII	I	II	III	IV
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	180	220	230	250	270	320	400
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	0,12	0,15	0,16	0,18	0,20	0,27	0,40

Таблица 3

Физико-механические характеристики грунтов

Тип грунта	Плотность частиц грунта ρ_s , $\text{кг}/\text{м}^3$	Коэффициент пористости e	Влажность W	Коэффициент теплопроводности талого грунта λ_{th} , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта λ_f , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Удельная теплоемкость частиц грунта C_s , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$
Галечник (насыпь)	2 700	0,5	0,05	3,0	1,8	930
Суглинок (основание насыпи)	2 700	0,6	0,2	1,33	1,5	900

Расчетные характеристики растительно-мохового покрова

Тип грунта	Плотность ρ , кг/м ³	Влажность W	Коэффициент теплопроводности талого грунта λ_{th} , Вт/(м·°С)	Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта λ_f , Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость талого грунта C_{th} , Дж/(кг·°С)	Удельная теплоемкость мерзлого грунта C_f , Дж/(кг·°С)
Мох	150	2,0	0,15	0,63	3 600	2 200

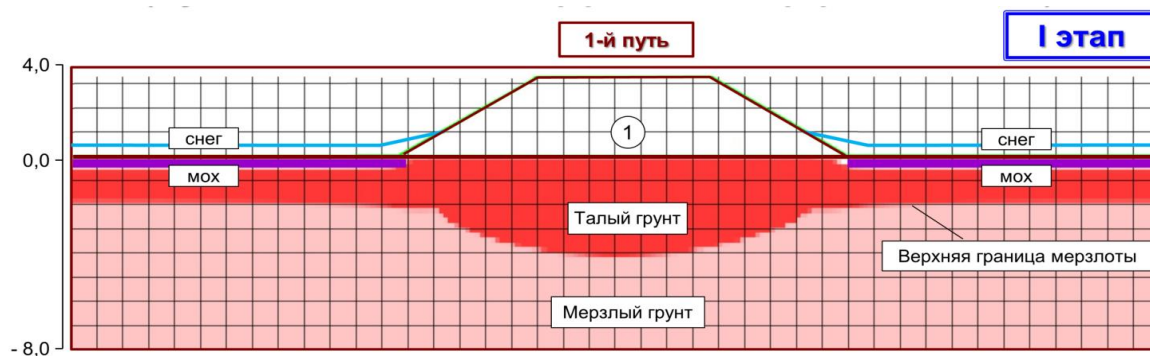


Рис. 5. Поле объемной влажности грунта насыпи из дренирующего грунта на 30-й год (конец сентября) с учетом тепляющего действия атмосферных осадков:

1 – зона инфильтрации атмосферных осадков

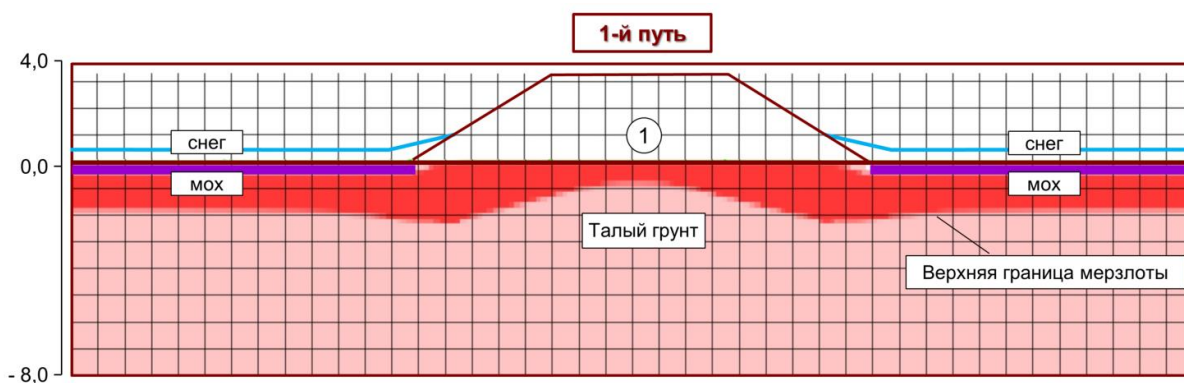


Рис. 6. Поле объемной влажности грунта насыпи из дренирующего грунта на 10-й год (конец сентября) без учета тепляющего действия атмосферных осадков:

1 – зона без учета инфильтрационной теплопроводности

основания и 3-метровой насыпи, сложенной дренирующим грунтом. В данном расчете коэффициент теплопроводности дренирующего грунта принят с учетом тепляющего воздействия фильтрующихся в теле насыпи атмосферных осадков. Стабилизация температурного поля, а соответственно, и верхней границы мерзлых грунтов произошла на 30-й год. Глубина оттаивания мерзлых грунтов под насыпью стабилизировалась на уровне 4 м. Полученный эффект достигнут посредством задания летнего коэффициента теплопроводности дренирующего грунта (см. табл. 3), который характеризует эффект фильтрации атмосферной воды в теле насыпи. Суммарный

летний коэффициент теплопроводности талого грунта, равный 3 Вт/(м·°С), получен с учетом коэффициента инфильтрационной теплопроводности, подобранного эмпирическим путем и принятого равным 1,2 Вт/(м·°С).

Для сравнения на рис. 6 приведен аналогичный расчет, где летний коэффициент теплопроводности был взят в соответствии с нормативным значением для дренирующего грунта, равным 1,8 Вт/(м·°С), без учета инфильтрационной составляющей.

На рис. 6 видно, что при отсутствии инфильтрационной составляющей в летнем коэффициенте теплопроводности дренирующего грунта насыпи верхняя граница мерз-

лоты под насыпью не опускается, а напротив, поднимается вверх и стремится войти в тело земляного полотна. Аналогичный результат может быть получен, если в нижней части насыпи из дренирующего грунта уложить слой из связного (недренирующего) грунта. Как было показано в [13], достаточная толщина слоя такого грунта, выполняющего функцию гидроизоляции, предотвращающего отепляющее воздействие атмосферных осадков на основание земляного полотна, может быть ограничена 1 м.

На **втором этапе** уширение существующего земляного полотна под второй путь предусматривается из дренирующего грунта. Для ограничения фильтрации атмосферных осадков выполняется устройство гидроизоляционного экрана – двухслойного противофильтрационного полотна (геомембраны с двусторонним термоскрепленным геотекстилем). Геокомпозит укладывается по низу выравнивающего или защитного слоя на глубине не менее 0,5 м от основной площадки с уклоном 0,04 в полевую сторону от оси пути.

На рис. 7 показан результат теплофизического расчета состояния грунта насыпи и ее

основания на второй год после сооружения второго пути.

Анализ состояния грунтов основания на втором этапе показывает, что массив талого грунта не увеличился после уширения насыпи, а в месте сопряжения с существующим земляным полотном даже уменьшился.

На **третьем этапе** предусматривается укладка геокомпозита в верхней части насыпи первого главного пути с целью предотвращения деградации многолетне-мерзлых грунтов в основании земляного полотна существующего пути и под его правым откосом. Работы выполняются по аналогии с устройством экрана на втором пути – геокомпозит размещается по низу защитного или выравнивающего слоя также на глубине не менее 0,5 м под основной площадкой. Данное мероприятие реализуется после завершения строительства второго главного пути и переключения на него движения поездов, оно может быть выполнено как в рамках реконструкции, так и во время ближайшего капитального ремонта первого пути.

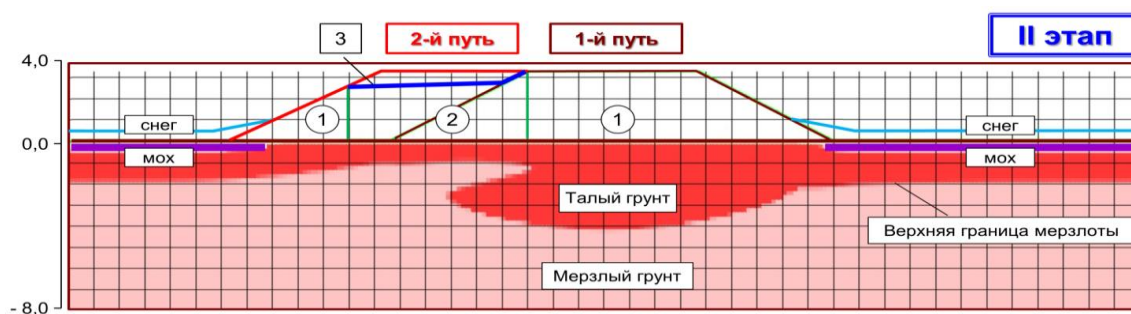


Рис. 7. Поле объемной влажности грунта насыпи из дренирующего грунта через два года после строительства второго пути (конец сентября):

1 – зона инфильтрации атмосферных осадков; 2 – зона, защищенная от инфильтрации атмосферных осадков; 3 – гидроизоляционный экран

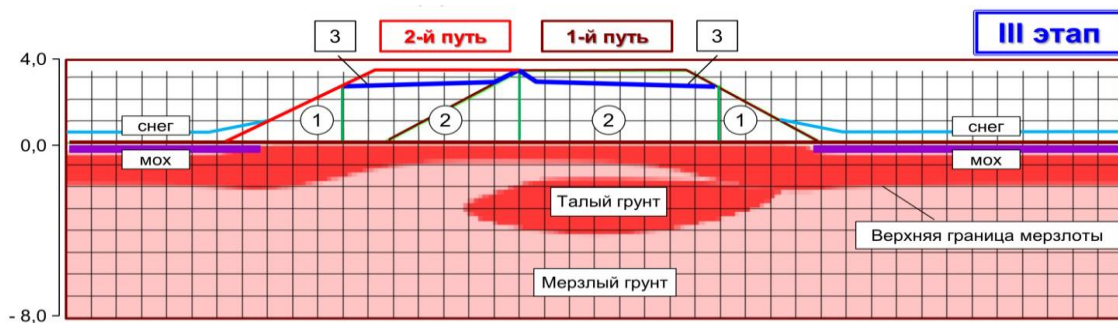


Рис. 8. Поле объемной влажности грунта двухпутной насыпи из дренирующего грунта через три года после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем (конец сентября):

1 – зона инфильтрации атмосферных осадков; 2 – зона, защищенная от инфильтрации атмосферных осадков; 3 – гидроизоляционный экран

Как хорошо видно на рис. 8, уже через три года после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем граница мерзлоты в основании основной насыпи начала подниматься вверх, оставив небольшую область талого грунта. Еще через полгода, к концу зимы, область талого грунта будет представлять собой талик, окруженный мерзлым грунтом (рис. 9).

В дальнейшем талик медленно сокращается в размерах, с тенденцией к полному исчезновению. В качестве иллюстрации на рис. 10 показана картина на конец зимы через восемь лет после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем.

На рис. 11 приведено температурное поле двухпутной насыпи с гидроизоляционным экраном, демонстрирующее эффект промора-

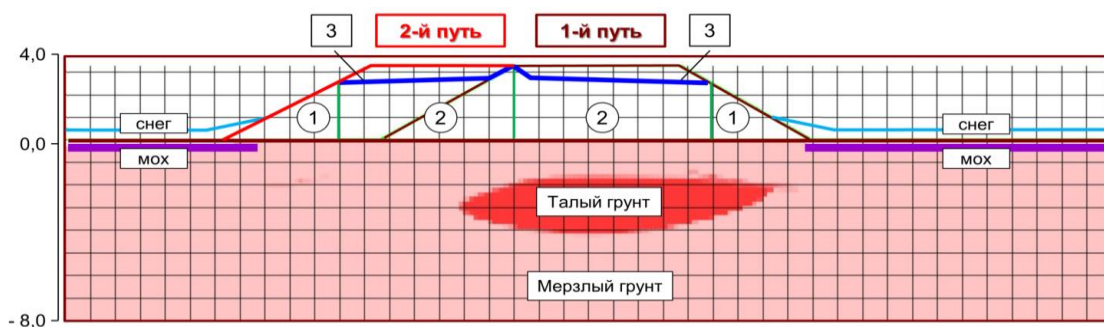


Рис. 9. Поле объемной влажности грунта двухпутной насыпи из дренирующего грунта через три года после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем (конец марта): 1 – зона инфильтрации атмосферных осадков; 2 – зона, защищенная от инфильтрации атмосферных осадков; 3 – гидроизоляционный экран

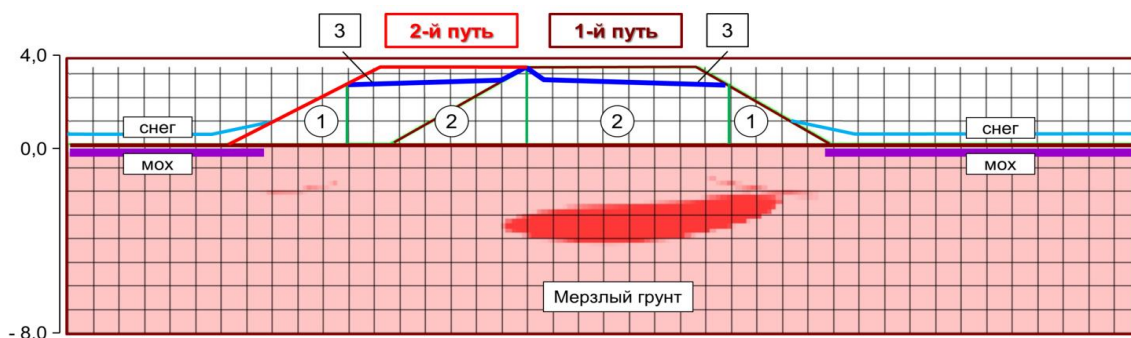


Рис. 10. Поле объемной влажности грунта двухпутной насыпи из дренирующего грунта через восемь лет после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем (конец марта): 1 – зона инфильтрации атмосферных осадков; 2 – зона, защищенная от инфильтрации атмосферных осадков; 3 – гидроизоляционный экран

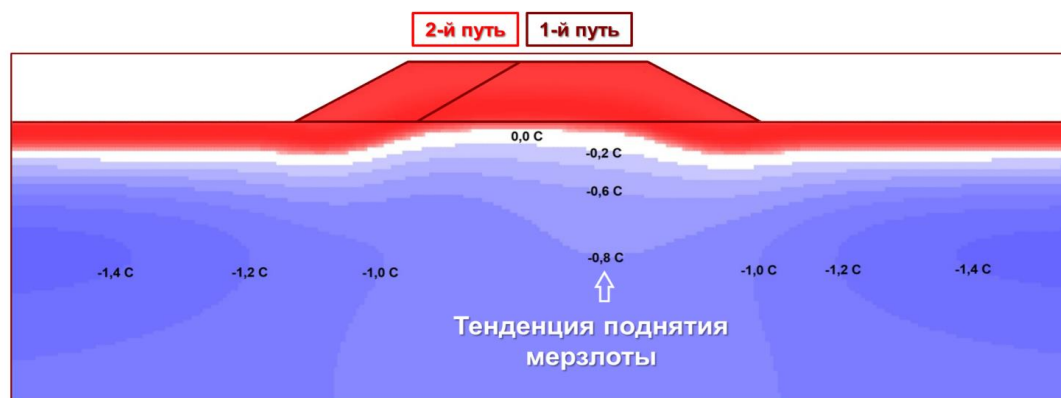


Рис. 11. Температурное поле двухпутной насыпи из дренирующего грунта через восемь лет после укладки гидроизоляционного экрана под первым путем (конец сентября)



Рис. 12. Геомембрана с двусторонним термоскрепленным геотекстилем на БАМе

живания основания земляного полотна под насыпью первого пути.

На рис. 12 приведена иллюстрация геомембраны с двусторонним термоскрепленным геотекстилем. Данный геокомпозит в железнодорожном строительстве применяется в качестве гидроизолирующего слоя в основании насыпи для обеспечения сбора поверхностного стока и отвода его в водоотводные лотки на нулевых местах, в водоохранных зонах.

Таким образом, вышеприведенные расчеты, описывающие характер изменения состояния грунтов основания при сооружении насыпи второго пути из дренирующих грунтов, наглядно показали эффективность предложенной технологии с использованием гидроизоляционных экранов. Однако необходимо отметить, что эффективность данного конструктивного решения может быть обеспечена только в случае наличия водоотводных сооружений, содержащихся в надлежащем состоянии. В случае необеспечения надежного водоотвода от насыпи вода,

фильтрующаяся через откосную часть, будет аккумулироваться у подошвы насыпи и впоследствии дренировать в грунты основания.

Выводы

В статье обоснована гипотеза о возможности моделирования утепляющего воздействия атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна из дренирующих грунтов путем введения понятия инфильтрационной теплопроводности.

Предложена и обоснована расчетным путем технологическая схема сооружения насыпей из дренирующих грунтов под вторые пути, обеспечивающая исключение утепляющего воздействия атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна. Отличительной особенностью схемы является поэтапная укладка гидроизоляции в верхней части как вновь возводимого, так и существующего земляного полотна, способствующая восстановлению мерзлого состояния грунта под эксплуатируемым путем.

Список источников

1. Ашпиз Е. С. Опыт проектирования земляного полотна железных дорог России, расположенных в зоне распространения многолетне-мерзлых грунтов // Материалы Пятой конференции геокриологов России. Москва : Университетская книга, 2016. С. 162–168.
2. Гаврилов И. И. Состояние и причины повышенной деформативности земляного полотна на участках распространения многолетне-мерзлых грунтов Дальнего Востока и Забайкалья // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2013. № 1. С. 129–143.

3. Сазонов В. Н., Ашпиз Е. С. Актуальные проблемы обеспечения надежности земляного полотна на Восточном полигоне // Железнодорожный транспорт. 2015. № 9. С. 28–31.
4. Melnikov A., Gavrilov I., Zhang Z. Permafrost railroads of Eastern Siberia and the Russian far east: types and causes of contemporary deformations // Innovative Infrastructure Solutions. 2024. Vol. 9, No. 5. P. 155.
5. Melnikov A., Zhang Z., Gagarin L. Effects of extreme atmospheric precipitation on the stability of railways in the permafrost zone // Modeling Earth Systems and Environment. 2024. Vol. 10, No. 1. P. 1305–1320.
6. Исаков А. Л., Устьян Н. А. Проблемы деградации вечной мерзлоты в основании земляного полотна железных дорог и пути ее решения на базе теплотехнических расчетов // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Салехард, 2021. С. 177–180.
7. Исаков А. Л., Моисеева И. С., Гудкова И. Н. Обоснование конструктивных особенностей земляного полотна из дренирующих грунтов в криолитозоне с помощью теплотехнических расчетов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 95–103. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_95.
8. Алейников А. С., Петрова А. Г. Численное решение задачи протаивания мерзлого грунта с учетом инфильтрации осадков // Известия Алтайского государственного университета. 2017. № 4 (96). С. 72–77.
9. Гарагуля Л. С. Методика прогнозной оценки антропогенных изменений мерзлотных условий (на примере равнинных территорий). Москва : Издательство МГУ, 1985. 224 с.
10. Wong H. The basic formulas and data on heat transfer for engineers. Москва : Атомиздат, 1979. 185 с.
11. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен. Москва : МЭИ, 2011. 562 с.
12. Côté J., Fillion M. H., Konrad J. M. Estimating hydraulic and thermal conductivities of crushed granite using porosity and equivalent particle size // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2011. Vol. 137, No. 9. P. 834–842.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2021611121. Программа расчета температуры вечномерзлых грунтов земляного полотна «Freeze-Cold» / Машуков В. И., Исаков А. Л. 2021.

References

1. Ashpiz E. S. Experience in designing the subgrade of Russian railways located in the permafrost zone. *Proceedings of the Fifth Conference of Geocryologists of Russia*. Moscow: Universitetskaya kniga; 2016. P. 162–168. (In Russ.).
2. Gavrilov I. I. The state and causes of increased deformability of the earthbed in areas of permafrost distribution in the Far East and Transbaikalia. *Designing the Development of a Regional Railway Network*. 2013;(1):129–143. (In Russ.).
3. Sazonov V. N., Ashpiz E. S. Actual problems of ensuring the reliability of the roadbed on the Eastern polygon. *Railway Transport*. 2015;(9):28–31. (In Russ.).
4. Melnikov A., Gavrilov I., Zhang Z. Permafrost railroads of Eastern Siberia and the Russian far east: types and causes of contemporary deformations. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024;9(5):155.
5. Melnikov A., Zhang Z., Gagarin L. Effects of extreme atmospheric precipitation on the stability of railways in the permafrost zone. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2024;10(1):1305–1320.
6. Isakov A. L., Ustyan N. A. Problems of permafrost degradation in the base of the railway subgrade and ways to solve it based on heat engineering calculations. *Modern Studies of the Transformation of the Cryolithic Zone and Issues of Geotechnical Safety of Structures in the Arctic*. Salekhard; 2021. P. 177–180. (In Russ.).
7. Isakov A. L., Moiseeva I. S., Gudkova I. N. Justification of the subgrade design features from draining soils in the cryolithic zone using heat engineering calculations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):95–103. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_95.
8. Aleynikov A., Petrova A. Numerical Analysis of Frozen Soil Thawing under the Influence of Rainwater Infiltration. *Izvestiya of Altai State University*. 2017;(96):72–77.
9. Garagulya L. S. Methodology for predictive assessment of anthropogenic changes in permafrost conditions (on the example of flat territories). Moscow: Moscow State University Publishing House; 1985. 224 p. (In Russ.).
10. Wong H. The basic formulas and data on heat transfer for engineers. Moscow: Atomizdat; 1979. 185 p.
11. Tsvetkov F. F., Grigoriev B. A. Heat and mass transfer. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2011. 562 p. (In Russ.).
12. Côté J., Fillion M. H., Konrad J. M. Estimating hydraulic and thermal conductivities of crushed granite using porosity and equivalent particle size. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2011;137(9):834–842.
13. Mashukov V. I., Isakov A. L. Certificate of state registration of the computer program: RU2021611121. Program for calculating the temperature of permafrost soils of the subgrade Freeze-Cold. 2021. (In Russ.).

Информация об авторах

А. Л. Исаков – доктор технических наук, профессор кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. С. Моисеева – аспирант кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. L. Isakov – Doctor of Engineering, Professor of the Surveying, Design and Construction of Railways and Motorways Department, Siberian Transport University.

I. S. Moiseeva – Postgraduate of the Surveying, Design and Construction of Railways and Motorways Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 05.05.2026; одобрена после рецензирования 08.05.2026; принята к публикации 15.05.2026.

The article was submitted 05.05.2026; approved after reviewing 08.05.2026; accepted for publication 15.05.2026.