

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

УДК [UDC] 624.139.22

DOI 10.17816/transsyst2023945-17

© А.Л. Исаков, С.И. Бухов

Сибирский государственный университет путей сообщения

(Новосибирск, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОТИВОПУЧИННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА С УЧЕТОМ СИСТЕМЫ ПРОМЕРЗАНИЯ

Обоснование: в Северном полушарии при строительстве и эксплуатации железных дорог одной из актуальных проблем является морозное пучение. Одним из ключевых факторов, оказывающим влияние на величину морозного пучения, является залегание грунтовых вод относительно фронта промерзания грунтов земляного полотна, который не в полной мере учитывается существующими подходами к определению параметров противопучинных конструкций. Данный фактор принято характеризовать режимами промерзания, их два – открытая и закрытая система промерзания. Открытая система характеризуется близким расположением грунтовых вод к фронту промерзания, при котором происходит постоянный приток воды (миграция) к зоне фазовых переходов, что делает процесс морозного пучения непрогнозируемым, а определение коэффициента морозного пучения некорректным. Закрытая система промерзания предполагает отсутствие или глубокое расположение грунтовых вод (разница уровня фронта промерзания и грунтовых вод превышает высоту капиллярного поднятия воды).

Цель: повышение эффективности расчета параметров противопучинных конструкций в зависимости от режима промерзания земляного полотна железных дорог.

Материалы и методы: сравнительный анализ методов расчета параметров противопучинных конструкций, экспериментальные исследования процесса морозного пучения при открытой системе промерзания глинистых грунтов.

Результаты: на основании экспериментальных исследований режимов промерзания предложен дифференцированный подход к оценке характеристики морозного пучения с учетом особенностей протекания процесса морозного пучения.

Заключение: предлагаемый метод с дифференцированным подходом выгодно отличается от существующих, позволяя снизить расход строительного материала при проектировании противопучинных мероприятий.

Ключевые слова: морозное пучение, коэффициент пучения, системы промерзания, земляное полотно, показатель пучения, температурный критерий..

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© **Alexander L. Isakov, Stepan I. Bukhov**

Siberian Transport University

(Novosibirsk, Russia)

DETERMINATION OF PARAMETERS OF ANTI-HEAVE STRUCTURES OF THE SUBGRADE TAKING INTO ACCOUNT THE FREEZING SYSTEM

Background: in the Northern Hemisphere, during the construction and operation of railways, one of the pressing problems is frost heaving. One of the key factors influencing the amount of frost heaving is the occurrence of groundwater relative to the freezing front of the subgrade soils, which is not fully taken into account by existing approaches to determining the parameters of anti-heaving structures. This factor is usually characterized by freezing regimes, there are two of them - open and closed freezing systems. An open system is characterized by the proximity of groundwater to the freezing front, at which there is a constant influx of water (migration) to the zone of phase transitions, which makes the process of frost heaving unpredictable, and the determination of the frost heave ratio incorrect. A closed freezing system assumes the absence or deep location of groundwater (the difference in the level of the freezing front and groundwater exceeds the height of the capillary rise of water).

Aim: development of a method for calculating the parameters of anti-heaving structures depending on the freezing regime of railway subgrades.

Materials and Methods: comparative analysis of methods for calculating the parameters of anti-heaving structures, experimental studies of the process of frost heaving in an open system of freezing of clay soils.

Results: based on experimental studies of freezing regimes, a differentiated approach to assessing the characteristics of frost heaving is proposed, taking into account the peculiarities of the frost heaving process.

Conclusion: the proposed method with a differentiated approach compares favorably with existing ones, allowing to reduce the consumption of building materials when designing anti-heaving measures.

Key words: frost heaving, frost heave ratio, freezing systems, subgrade, heaving index, temperature criterion.

ВВЕДЕНИЕ

Морозное пучение – это актуальная проблема при строительстве наземных и подземных сооружений в зонах с сезонным промерзанием грунтов. Данное явление представляет собой внутриобъемное деформирование грунтов, приводящее к увеличению их объема вследствие кристаллизации поровой и мигрирующей воды с образованием кристаллов и линз льда [1].

Основным критерием оценки степени пучинистости грунта является коэффициент пучения (относительная деформация морозного пучения ε_{fh}

[2]), который определяется экспериментальным методом, описанным в ГОСТ 28622-2012 [1]. Грунт считается пучинистым, если коэффициент пучения $K_{\text{пуч}} \geq 0,01$ [2].

На дорогах пучение проявляется в виде пучинных горбов, впадин, перепадов, а также перекошенных и односторонних пучин [3]. При проектировании нового или реконструкции существующего земляного полотна в нормативной документации морозное пучение принято оценивать высотой морозного пучения $h_{\text{пуч}}$, которая не должна превышать допустимых значений $[h_{\text{пуч}}]$, т.е. условием допустимости величины морозного пучения земляного полотна является критерий

$$h_{\text{пуч}} \leq [h_{\text{пуч}}], \quad (1)$$

$h_{\text{пуч}}$ – высота морозного пучения;

$[h_{\text{пуч}}]$ – допустимое значение высоты морозного пучения, для железных (табл. 1) [4] и автомобильных (табл. 2) дорог [5].

Таблица 1. Допустимая высота равномерного морозного пучения на железных дорогах

Категория дороги	Скоростная, пассажирская	Особогрузо-напряженная	I и II	III	IV
Высота пучения	10 мм	15 мм	20 мм	25 мм	35 мм

Таблица 2. Допустимая высота равномерного морозного пучения на автомобильных дорогах

Тип дорожных одежд	Вид покрытия	Допустимая величина морозного пучения
Капитальные	Асфальтобетонное	40 мм
Облегченные	Асфальтобетонное	60 мм
Переходные	Переходное	100 мм

Высота морозного пучения определяется зависимостью

$$h_{\text{пуч}} = K_{\text{пуч}} \cdot H_f, \quad (2)$$

$h_{\text{пуч}}$ – высота морозного пучения;

$K_{\text{пуч}}$ – коэффициент морозного пучения (относительная деформация морозного пучения ε_{fh} [2]);

H_f – глубина промерзания грунта.

Следует отметить, что земляное полотно представляет собой неоднородный по глубине массив грунтов, поэтому при расчете высоты морозного пучения необходимо учитывать деформацию каждого залегаемого слоя грунта, расположенного под основной площадкой земляного полотна. Исходя из этого, формула (2) будет иметь вид

$$h_{\text{пуч}} = \sum_{i=1}^{N-1} K_{\text{пуч}}^i \cdot H_i + K_{\text{пуч}}^N \cdot H_N, \quad (3)$$

N – количество слоев грунта;

$K_{\text{пуч}}^i$ – коэффициент пучения грунта в i -м слое;

H_i – толщина i -м слоя;

$K_{\text{пуч}}^N$ – коэффициент пучения грунта в N -м слое;

H_N – толщина промерзшей части (нижнего) N -го слоя.

Среди многочисленных факторов, влияющих на процесс морозного пучения, одним из ключевых является режим промерзания грунтов. Главным образом, он характеризуется глубиной залегания грунтовых вод. Принято различать две схемы промерзания – закрытая система и открытая.

В данной работе предлагается усовершенствованный дифференцированный подход к оценке параметров морозного пучения с учетом системы промерзания грунтов земляного полотна.

ЗАКРЫТАЯ СИСТЕМА ПРОМЕРЗАНИЯ

Закрытая система встречается, как правило, в насыпях высотой более двух метров, где залегание грунтовых вод находится ниже подошвы насыпи на высоту капиллярного поднятия воды. При этом внешний приток воды в зону промерзания отсутствует, а процесс морозного пучения происходит за счет влаги, содержащейся в порах грунта внутри этой зоны. Миграция воды при промерзании грунта здесь происходит внутри этой зоны и аккумулируется в ее верхней части. В [6] предложен метод определения коэффициента морозного пучения при закрытой системе промерзания с учетом идеализации перераспределения влаги внутри зоны промерзания грунта, представленной на Рис. 1.

Коэффициент пучения в этом случае определяется формулой [6]

$$K_{\text{пуч}}^3 = 0,09 \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot (W_{\text{sat}} - W_{\text{нз}}) \cdot S_{\text{cr}}, \quad (4)$$

ρ_d – плотность сухого грунта;

ρ_w – плотность воды;

W_{sat} – влажность полностью водонасыщенного грунта;

$W_{\text{нз}}$ – доля незамерзшей воды (5);

S_{cr} – показатель пучения (параметр, введенный в [6]) (6).

Доля незамерзшей воды определяется выражением

$$W_{\text{нз}} = k_w \cdot W_p, \quad (5)$$

k_w – коэффициент, зависящий от числа пластичности грунта и температуры мерзлого грунта [2];

W_p – влажность на границе пластичности (раскатывания).

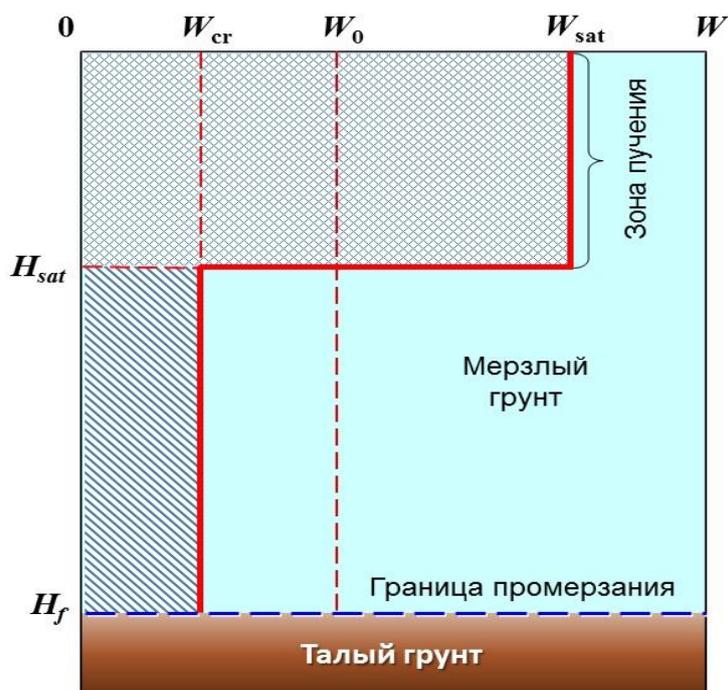
Показатель пучения S_{cr} характеризует степень пучения грунта относительно максимальных значений, реализуемого при полном влагонасыщении [6] и определяется формулой

$$S_{cr} = \frac{W_0 - W_{cr}}{W_{sat} - W_{cr}}, \quad (6)$$

W_0 – предзимняя влажность грунта;

W_{cr} – эмпирический параметр критическая влажность грунта, при которой в нем прекращается перераспределение влаги, вызывающее морозное пучение [7];

W_{sat} – влажность полностью водонасыщенного грунта.



W_{cr} – критическая влажность; W_0 – предзимняя влажность грунта;

W_{sat} – влажность полностью водонасыщенного грунта; H_{sat} – глубина зоны аккумуляции воды до полного водонасыщения; H_f – глубина промерзания грунта.

Рис. 1. Схема перераспределения влаги в зоне промерзания

Полученные значения параметров коэффициента пучения $K_{пуч}$ и глубины промерзания грунта H_f подставляются в выражение (2). В случае невыполнения критерия (1) принимается решение о проектировании противопучинных мероприятий, выбор которых зависит от причин образования деформаций [1], либо требований к категории вновь строящегося земляного полотна и технико-экономического обоснования.

Как следует из Рис. 1, вышеприведенная оценка коэффициента пучения (4,6) имеет смысла при условии $W_0 > W_{cr}$, когда показатель пучения S_{cr} изменяется строго в пределах от 0 до 1. Если $W_0 \leq W_{cr}$, то, согласно определению понятия критической влажности, перераспределение влаги не происходит, и все вышеприведенные рассуждения теряют смысл.

Поэтому рассмотрим отдельно этот редко встречаемый на практике случай, когда предзимняя влажность W_0 не превосходит критическую W_{cr} .

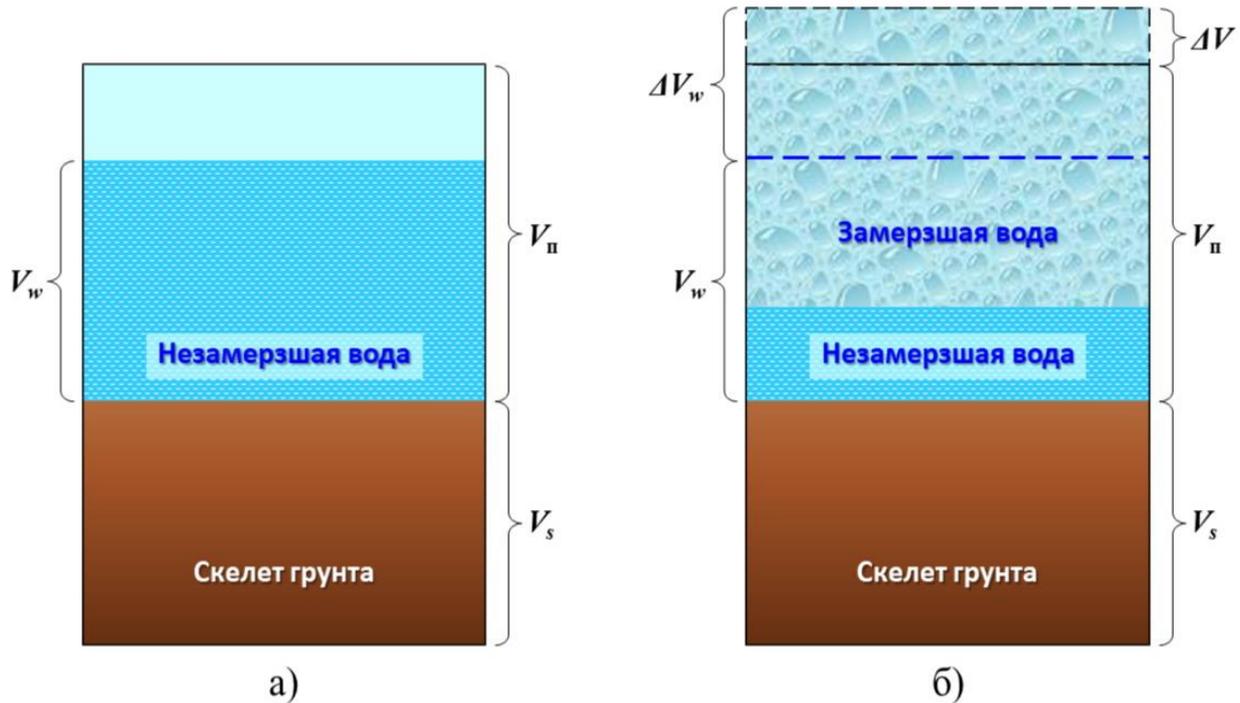
При отсутствии миграции воды, находящейся в порах грунта, и в предположении одномерности деформации грунта (Рис. 2), коэффициент пучения можно представить следующим выражением

$$K_{\text{пуч}}^3 = \frac{\Delta V}{V_s + V_n}, \quad (7)$$

ΔV – приращение объема грунта при пучении;

V_s – объем твердых частиц грунта;

V_n – объем пор грунта.



а) – до начала пучения; б) – после завершения пучения

Рис. 2. Схема приращения объема воды в порах при замерзании в отсутствие криогенной миграции влаги в зоне промерзания

В соответствии с Рис. 2, приращение объема грунта при пучении имеет вид

$$\Delta V = V_w + \Delta V_w - V_n, \quad (8)$$

V_m – объем воды в грунте;

ΔV_m – приращение объема замерзшей воды (9).

$$\Delta V_w = 0,09 \cdot (V_w - V_{\text{нз}}), \quad (9)$$

$V_{\text{нз}}$ – доля незамерзшей воды.

Подставляя (8) и (9) в (7) получим

$$K_{\text{пуч}}^3 = \frac{V_w + 0,09 \cdot (V_w - V_{\text{нз}}) - V_n}{V_s + V_n}, \quad (10)$$

Поделив числитель и знаменатель в (10) на V_n и сделав необходимые преобразования, окончательно получим

$$K_{\text{пуч}}^3 = \frac{e}{1+e} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \frac{1,09 \cdot W_0 - 0,09 \cdot W_{\text{нз}}}{e} - 1 \right). \quad (11)$$

Выражение (11) определяет коэффициент пучения при закрытой системе промерзания грунта, если его предзимняя влажность W_0 не превосходит критическую W_{cr} . Разумеется, если результат вычислений по формуле (11) окажется отрицательным, то это означает, что пучение грунта в этом случае отсутствует.

ОТКРЫТАЯ СИСТЕМА ПРОМЕРЗАНИЯ

Открытая система предполагает близкое расположение грунтовых вод к фронту промерзания, а расстояние между ними не превышает высоты капиллярного поднятия. В этом случае, согласно закону о миграции (подтягиванию) воды к фронту промерзания, происходит постоянный приток воды в зону фазовых переходов, приводящий к появлению ледяных включений в виде линз и других образований. Как следствие, объем замерзшей воды может в разы превышать исходный объем пор, а морозное пучение развивается непрогнозируемо. Из чего следует, что априорная оценка коэффициента морозного пучения по условию (1) не корректна.

В данном случае более естественным выглядит критерий, приводящий к полному выведению зоны интенсивного морозного пучения из глинистых грунтов земляного полотна и его основания. В качестве такого критерия можно принять следующее условие

$$T < T_{\text{пуч}}, \quad (12)$$

T – температура грунта земляного полотна;

$T_{\text{пуч}}$ – температура начала интенсивного морозного пучения.

Температурой начала интенсивного пучения считается такая температура, при которой в грунте развиваются усилия, достаточные для поднятия верхнего строения пути с защитным слоем из дренирующего грунта.

Применение критерия (12) предполагает экспериментальное определение температуры начала интенсивного морозного пучения $T_{\text{пуч}}$ в зависимости от характеристики, отражающую способность грунта удерживать воду – числа пластичности I_p .

В рамках данной работы определение величины $T_{\text{пуч}}$ было проведено лабораторным путем [8] с использованием установки ГТ 1.1.8 (Рис. 3), позволяющей варьировать температуру промерзания образца грунта.

Лабораторные испытания проводились следующим образом.

Глинистый грунт, с приложенной к нему вертикальной нагрузкой 20 кПа, выдерживался в холодильной камере до стабилизации в нем температуры, равной $+1^{\circ}\text{C}$. Затем производилось поэтапное промораживание образца грунта, которое предполагало понижение температуры промерзания с шагом $0,10^{\circ}\text{C}$ до появления вертикальных деформаций пучения в образце грунта.



Рис. 3. Прибор ГТ 1.1.8 для определения степени морозного пучения

На Рис. 4 приведены результаты экспериментов по определению параметра $T_{\text{пуч}}$ для глинистых грунтов:

- ✓ число пластичности I_p , изменяется в интервале от 0,04 до 0,23;
- ✓ коэффициент пористости e , варьируется в пределах от 0,6 до 1,0.

Результаты экспериментов показывают, что температура интенсивного морозного пучения $T_{\text{пуч}}$ и число пластичности грунта I_p имеют устойчивую линейную корреляцию, достаточную для проведения априорного расчета параметров противопучинных конструкций. Для более точных расчетов рекомендуется в каждом конкретном случае уточнение параметра $T_{\text{пуч}}$ лабораторным путем.

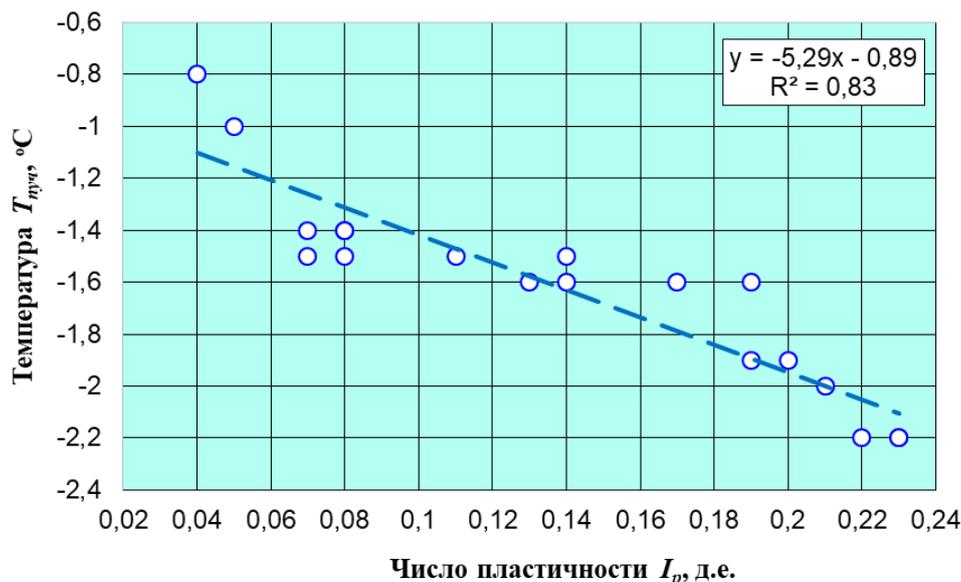


Рис. 4. Зависимость экспериментальных значений температуры начала интенсивного морозного пучения от числа пластичности глинистого грунта

Резюмируя вышесказанное, предлагаемый метод определения параметров противопучинных конструкций на земляном полотне железных, рекомендуется выполнять по следующему алгоритму:

✓ сначала определяется система промерзания грунтов земляного полотна;

✓ при закрытой системе оценка величины пучения для обоснования необходимости использования противопучинных мероприятий и, при необходимости, для дальнейшего определения их параметров производится с использованием коэффициента пучения, определяемого по формулам (4) или (11);

✓ при открытой системе промерзания обоснование параметров противопучинных конструкций выполняется по условию полного выведения зоны интенсивного морозного пучения из грунтов основной площадки земляного полотна в соответствии с критерием (12).

Для оценки эффективности предлагаемого метода, ниже приводятся результаты сопоставительных расчетов (Табл. 3, 4) определения толщины теплоизолирующего покрытия из пенополистирола, укладываемого на основную площадку земляного полотна, с использованием вышеизложенного дифференцированного подхода и существующих утвержденных методик [3, 9]. Расчеты с дифференцированием систем промерзания проводились для климатических условий Юга Западной Сибири с помощью программы Freeze-1 [10], в которой полностью реализован предложенный алгоритм.

Из приведенных таблиц хорошо видна разница в оценках необходимой толщины пенополистирола, сделанных с помощью

нормативных документов [3, 9] и по предлагаемой методике. В первом случае (Табл. 3) расчетная толщина пенополистирола по существующим методикам варьирует в пределах от 10 до 13 см, в то время как предлагаемая методика дает значения от 4 до 7 см. Во втором случае, при толщине защитного слоя 0,6 м (Табл. 4), аналогичные значения варьируют от 6 до 8 см при нормативных расчетах и от 2 до 4 по предлагаемой методике.

Таким образом, предложенная методика к определению параметров противоположных конструкций, по сравнению с принятыми методиками, позволяет значительно (в 2–2,5 раза) снизить расход пенополистирола при проектировании противоположных мероприятий.

Таблица 3. Расчетные значения толщины пенополистирола (с учетом смятия) в сантиметрах при толщине защитного слоя 0,05 м, полном водонасыщении грунтов и различных значениях коэффициента пористости

Методика	e	Толщина пенополистирола, см				
		$I_p=0,06$	$I_p=0,10$	$I_p=0,13$	$I_p=0,16$	$I_p=0,20$
ЦПИ-24	–	14				
Инструкция [9]	0,60	13	11	10	-	-
	0,70	-	13	12	12	11
	0,85	-	-	-	13	13
Закрывающая система (Freeze-1)	0,60	5	5	4	4	4
	0,70	5	5	4	4	4
	0,85	5	5	4	4	4
Открытая система (Freeze-1)	0,60	6	7	4	4	4
	0,70	6	7	7	7	6
	0,85	6	6	6	6	5

Таблица 4. Расчетные значения толщины пенополистирола (с учетом смятия) в сантиметрах при толщине защитного слоя 0,60 м, полном водонасыщении грунтов и различных значениях коэффициента пористости

Методика	e	Толщина пенополистирола, см				
		$I_p=0,06$	$I_p=0,10$	$I_p=0,13$	$I_p=0,16$	$I_p=0,20$
ЦПИ-24	–	7				
Инструкция [9]	0,60	8	7	6	-	-
	0,70	-	8	7	7	6
	0,85	-	-	-	8	8
Закрывающая система (Freeze-1)	0,60	2	2	2	2	2
	0,70	2	2	2	2	2
	0,85	3	2	2	2	2
Открытая система (Freeze-1)	0,60	3	4	3	2	2
	0,70	3	3	4	4	3
	0,85	3	3	3	3	3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлен метод расчета параметров противоположных конструкций земляного полотна, в основе которого лежит дифференцированный подход с учетом особенностей протекания процесса морозного пучения при различных режимах промерзания грунта.

2. Критерии оценки характеристик морозного пучения (1) и (7) основываются на результатах экспериментальных исследований, обосновывающих их достоверность и применимость при проектировании противоположных конструкций.

3. Предложенный метод показал более высокую точность расчетов параметров противоположных конструкций по сравнению с принятыми методиками, снижая расход материалов и объем трудозатрат на противоположные мероприятия при строительстве и эксплуатации земляного полотна.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. – М.: Стандартинформ, 2012. – 11 с. [GOST 28622-2012 Soils. Laboratory method for determining the degree of heaving. Moscow: Standartinform, 2012. 11 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data/564/56436.pdf> Ссылка доступна на: 28.11.23.
2. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2020. – 38 с. [GOST 25100-2020. Soils. Classification. Moscow: Standardinform, 2020. 38 p. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 28.11.23. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719820.pdf>
3. Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути. – М.: Транспорт, 1997. – 59 с. [TsPI-24. Technical instructions for eliminating heaves and subsidence of the railway track. Moscow: Transport, 1997. 59 p. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 28.11.23. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293754/4293754467.htm#i358776>
4. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. – М., 2015. – 71 с. [SP 238.1326000.2015. Railway track. Moscow, 2015. 71 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293756/4293756865.pdf> Ссылка доступна на: 28.11.23.
5. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. – М., 2001. – 148 с. [ODN 218.046-01. Design of flexible pavements. Moscow, 2001. 148 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294847/4294847959.htm>. Ссылка доступна на: 28.11.23.
6. Исаков А.Л., Бухов С.И. К оценке коэффициента морозного пучения глинистых грунтов земляного полотна при закрытой системе промерзания

- области // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(56). – С. 92–98. [Isakov AL, Bukhov SI. To assess the frost heave ratio of clayey soils of the roadbed in a closed freezing system of the region. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport*. 2021;1(56):92-98. (In Russ.)]. doi: 10.52170/1815-9262_2021_56_92
7. Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. – Л.: Стройиздат. 1977. – 185 с. [Orlov VO, Dubnov YuD, Merenkov ND. *Puchenie promerzayushchih gruntov i ego vliyanie na fundamenty sooruzhenij*. Leningrad: Stroyizdat, 1977. 185 p. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 28.11.23. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007688543?ysclid=lq7qw0gvfd248743306>
 8. Бухов С.И., Исаков А.Л. Определение температуры начала интенсивного морозного пучения в глинистых грунтах при открытой системе промерзания // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. – 2022. – № 4 (7). – С. 80. [Bukhov SI, Isakov AL. Determination of the temperature of the onset of intense frost heaving in clayey soils with an open freezing system. *Fundamental and applied issues of transport*. 2022;4(7):8. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 28.11.23. Доступно по: <https://fpvt.ru/public/>
 9. Инструкции по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути. – М., 2012. – 53 с. [Instructions for the installation of sub-ballast protective layers during the reconstruction (modernization) of a railway track. Moscow, 2012. 53 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://jd-doc.ru/2012/dekabr-2012/3877-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-12-12-2012-n-2544r> Ссылка доступна на: 28.11.23.
 10. Методика назначения противопучинных мероприятий и выбора их параметров на железных и автомобильных дорогах на базе программного комплекса Freeze-1. [Methodology for prescribing anti-heavy measures and selecting their parameters on railways and roads based on the *Freeze-1* software package. (In Russ.)]. Доступно по: <http://freeze-1.stu.ru/index.htm> Ссылка доступна на: 28.11.23.

Сведения об авторах:

Исаков Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 4190-0631; ORCID: 0000-0001-8093-6826;
E-mail: mylab.alex@yandex.ru

Бухов Степан Игоревич, аспирант;
ORCID: 0000-0002-9900-0021;
E-mail: bsybuhov@mail.ru

Information about the authors:

Alexander L. Isakov; Doctor of Technical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 4190-0631; ORCID: 0000-0001-8093-6826;
E-mail: mylab.alex@yandex.ru

Stepan I. Bukhov; postgraduate;
ORCID: 0000-0002-9900-0021;
E-mail: bsybuhov@mail.ru

Цитировать:

Исаков А.Л., Бухов С.И. Определение параметров противопучинных конструкций земляного полотна с учетом системы промерзания // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 5–17. doi: 10.17816/transsyst2023945-17

To cite this article:

Isakov AL, Bukhov SI. Determination of parameters of anti-heave structures of the subgrade taking into account the freezing system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):5-17. doi: 10.17816/transsyst2023945-17