

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 625.123

DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_35

*Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО КРИТЕРИЯ НАЧАЛА ИНТЕНСИВНОГО КРИОГЕННОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ**

Аннотация. Для предотвращения образования пучин на железнодорожном пути при сезонном промерзании возможно применение способа, предусматривающего создание в теле или основании земляного полотна капиллярного барьера путем инъекции гидроизолирующих составов, что исключает криогенный влагоперенос в активную зону.

Для более точных прогнозов и назначения глубины капиллярного барьера при проектировании авторами поставлена задача по установлению двухпараметрического критерия (от значения температуры и градиента температуры) начала интенсивного криогенного влагопереноса для глинистых грунтов и его зависимости от числа пластичности. В работе описаны постановка и проведение, а также обобщены и приведены результаты лабораторных экспериментов, направленных на решение поставленной актуальной задачи.

По результатам эксперимента для различных видов глинистых грунтов (в интервале числа пластичности от 0,05 до 0,13) определены и аппроксимированы экспоненциальной функцией двухпараметрические температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером. Полученные экспериментальные данные дополнительно аппроксимированы по числу пластичности глинистого грунта.

Ключевые слова: железная дорога, капиллярный барьер, земляное полотно, сезонное промерзание, температура грунтов, градиент температуры грунтов, влагоперенос.

Для цитирования: Разуваев, Д. А. Экспериментальное определение двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в различных видах глинистых грунтов / Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 35–44. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_35.

Введение

В районах с преобладанием неблагоприятных грунтово-гидрологических условий и глубокого сезонного промерзания грунтов деформирование земляного полотна в результате действия сил морозного пучения остается актуальной проблемой [1–3].

Для уже существующих и эксплуатируемых в таких условиях дорог авторами предложен и обоснован способ устройства капиллярного барьера в основании или теле земляного полотна путем инъектирования гидроизолирующих составов [3, 4]. Капиллярный барьер (рис. 1), например, из силикатизированного грунта, преграждает доступ грунтовых вод в зону сезонного промерзания, а также формирует цементационные связи в грунтах нижней части этой зоны, что в совокупности позволяет снизить деформации пучения железнодорожного пути до предельно допустимых значений.

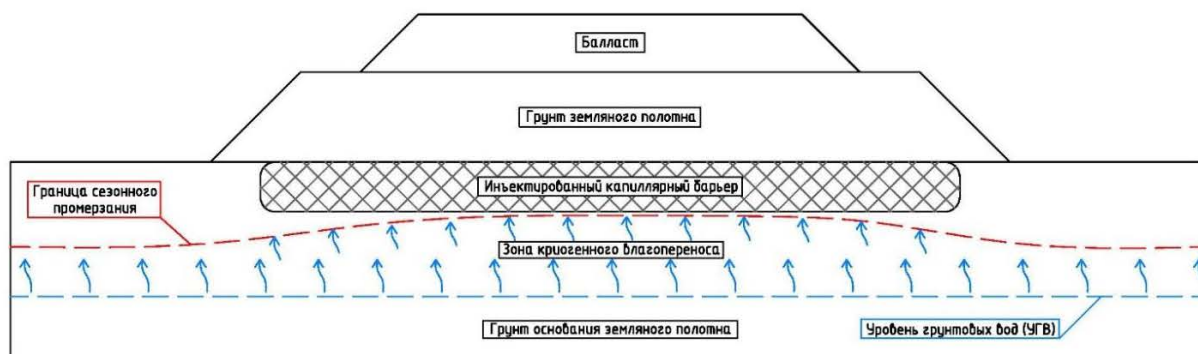


Рис. 1. Пример размещения инъектированного в основание насыпи капиллярного барьера

Предложенный способ позволяет исключить интенсивный криогенный влагоперенос в грунтах земляного полотна при промерзании (создать закрытую систему промерзания), что существенно снижает величину морозного пучения грунтов деятельного слоя [3–5]. Дополнительный положительный эффект достигается расположением капиллярного барьера из непучинистого материала (например, из силикатизированного грунта) в нижней части зоны сезонного промерзания, то есть частичным преобразованием изначально пучинистых грунтов в непучинистые [3–5].

При проектировании, авторами рекомендуется размещать капиллярный барьер в нижней части зоны сезонного промерзания, но как можно ближе к поверхности земляного полотна, в этом случае снижается трудоемкость устройства барьера за счет меньшей глубины инъектирования, а также уменьшается мощность потенциально пучинистых грунтов над барьером. При этом *обязательно должно соблюдаться условие недопущения интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах земляного полотна под капиллярным барьером*. В противном случае под капиллярным барьером будет формироваться слой водонасыщенных слабых грунтов.

Ряд отечественных ученых [1, 2, 6–9] сходятся во мнении, что практически в любой момент времени в промерзающем массиве грунта существует зона интенсивного криогенного влагопереноса, близкая, но не совпадающая по глубине с зоной фазовых переходов. Именно промерзание (фазовый переход) формирует одну из основных движущих сил – градиент влажности. Эмпирически установлено, что интенсивный криогенный влагоперенос наблюдается в интервале температур от 0 до $-3-5$ °С [2, 9, 10], в работе [6] этот интервал уточнен до значений от $-0,6$ до -3 °С.

При этом известно [11], что на механизм криогенной миграции влияет не только градиент влажности, формируемый при промерзании в зоне фазовых переходов (ограничен интервалом изотерм от $-0,6$ до -3 °С), но и формируемый градиент температуры. Поэтому для более точных прогнозов и назначения глубины капиллярного барьера при проектировании, авторами поставлена задача по установлению двухпараметрического критерия (от значения температуры и градиента температуры) начала интенсивного криогенного влагопереноса для глинистых грунтов, и его зависимости от числа пластичности.

Далее в работе будут описаны постановка, проведение и результаты лабораторных экспериментов, направленных на решение поставленной актуальной задачи. Обработка экспериментальных данных осуществлена совместно с ранее выполненными авторами исследованиями [15, 16] по отдельным видам глинистых грунтов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ОАО «РЖД» (грант на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта).

Постановка лабораторного эксперимента

По результатам анализа существующих методик, применяемых ранее для исследования механизмов и закономерностей криогенного влагопереноса в грунтах при промерзании [8–10], в лабораторных условиях поставлен эксперимент, позволяющий на грунтовых моделях определять температуру и градиент температур начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером в зависимости от числа пластичности глинистого грунта.

Ввиду отсутствия поставщиков специализированного оборудования под решаемую задачу, в качестве основной лабораторной установки при реализации эксперимента использовался прибор ГТ 1.1.12, обеспечивающий контролируемое формирование водно-теплового состояния грунтовых образцов. Несмотря на прямое назначение установки – определение степени морозного пучения грунтов, именно она, в комплексе с программным обеспечением, позволяет моделировать в образце грунта зону промерзания с контролируемыми параметрами (температура и градиент температур в образце, параметры водонасыщения и влагопереноса), а также наличие капиллярного барьера. Принципиальная схема экспериментальной установки с грунтовой моделью представлена на рис. 2.

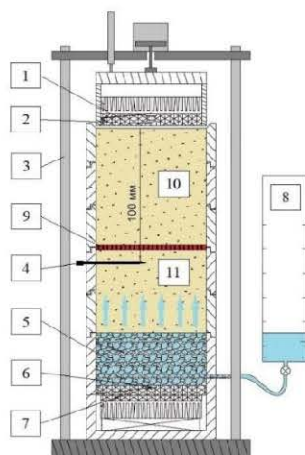


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки с грунтовой моделью:

- 1 – верхний охлаждающий термоэлектрический модуль; 2 – датчик температуры № 1; 3 – кольцевая обойма с теплоизоляцией; 4 – датчик температуры № 2; 5 – фильтрующий материал (песчаник); 6 – датчик температуры № 3; 7 – нижний греющий термоэлектрический модуль; 8 – мерная колба; 9 – мембрана (имитация капиллярного барьера); 10 – верхняя часть грунтовой модели; 11 – нижняя часть грунтовой модели

Для создания и поддержания отрицательной (t_i^B) и положительной (t_i^H) температуры на торцах промораживаемой модели грунта применены два одинаковых термоэлектрических модуля (элементы Пельтье), под управлением ЭВМ через аппаратуру установки.

Для моделирования криогенного влагопереноса в грунтах нижней части образца (под мембраной) обеспечена возможность подтока воды из мерного сосуда через фильтрующий камень (песчаник), расположенный в поддоне прибора. По изменению уровня воды в мерном сосуде фиксировалось начало интенсивного криогенного влагопереноса в модели, а по температурному полю – достижение температурных критериев начала криогенной миграции влаги (пар значений температуры t^{KM} и градиента температур ∇t^{KM}).

Модели в рамках лабораторного эксперимента изготавливались из грунтов нарушенной структуры с уплотнением до коэффициента 0,95. Начальная степень водонасыщения образцов превышала $S_r > 0,9$. Для исключения изменения теплофизических свойств грунта по глубине образца и морозного пучения (факторы, ограничивающие возможности эксперимента), его верхняя часть (над мембраной) водонасыщалась соевым раствором, что предотвращало возможность фазовых переходов.

Грунтовая модель представляла собой цилиндр диаметром 100 мм, высотой 150 мм внутри кольцевой теплоизолированной обоймы прибора. В процессе формирования и уплотнения грунта в кольцах, внутри образца на глубине 90 мм устанавливалась водонепроницаемая мембрана из полиэтилена, моделирующая капиллярный барьер. Мембрана располагалась над температурным датчиком № 2 (рис. 2).

В рамках эксперимента и дальнейших исследований приняты исходные глинистые грунты в диапазоне числа пластичности от 0,05 до 0,13, представленные в табл. 1. Физические характеристики грунтов определены по ГОСТ 5180-2015 и ГОСТ 12536-2014.

Таблица 1

Физические характеристики исследуемых грунтов

№	Число пластичности	Содержание песчаных частиц	Вид грунта
1	0,05	<50 %	Супесь пылеватая
2	0,07	<40 %	Суглинок легкий пылеватый
3	0,09		Суглинок легкий пылеватый
4	0,11		Суглинок легкий пылеватый
5	0,13	<40 %	Суглинок тяжелый пылеватый

Запуск прибора осуществлялся после термостатирования моделей в холодильной камере при температуре +2 °С в течение суток. После запуска с помощью лабораторной установки создавалось одномерное стационарное температурное поле в модели.

Формирование температурного поля, термостатирование и контроль температурных параметров (температура и градиент температур) в образце выполнялись по схеме, представленной на рис. 3.

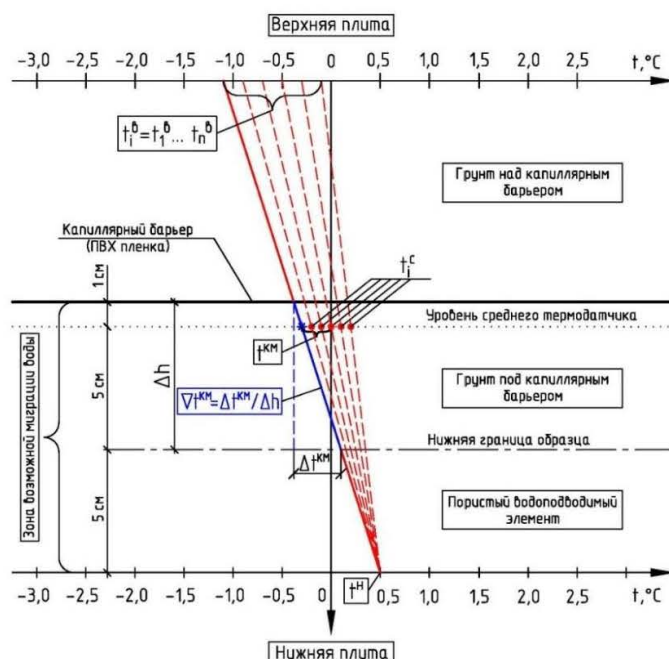


Рис. 3. Схема формирования и изменения температурного поля в модели в процессе проведения эксперимента

В соответствии со схемой (рис. 3), на нижнем (греющем) термоэлектрическом модуле (плите) выставилось фиксированное для каждого опыта значение температуры t^H (контроль по датчику температуры № 3). Затем, с шагом $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ поэтапно ($1 \dots n$ этапов), с термостатированием температурного поля в модели, понижалась температура на верхнем (охлаждающем) термоэлектрическом модуле (плите) t_i^B (контроль по датчику температуры № 1). Контрольными маркерами завершения термостатирования модели являлись стабилизация температуры t_i^C (контроль по датчику температуры № 2) и формирование температурного поля в модели по линейному закону (или близкому к линейному, ввиду практически одинаковых теплофизических свойств верхней и нижней части модели). На каждом из этапов выполнялся контроль уровня воды в мерном сосуде (8, рис. 2).

В момент, когда в нижней части грунтовой модели (под капиллярным барьером) начиналась криогенная миграция влаги (по уровню в мерном сосуде), фиксировались температура t^{KM} и градиент температуры ∇t^{KM} под капиллярным барьером на данном этапе опыта. Далее выполнялось термостатирование модели до температуры $+2\text{ }^\circ\text{C}$, и запускался следующий опыт (на той же модели) при ином значении температуры на нижнем (греющем) термоэлектрическом модуле (плите) прибора t^H (контроль по датчику температуры № 3). При следующем опыте, как видно из схемы (рис. 3), формировалось температурное поле с иными градиентами температур.

Проведение лабораторного эксперимента

Общий вид подготовленной для проведения эксперимента модели представлен на рис. 4, а. Поскольку собранная на основе прибора ГТ 1.1.12 установка позволяет проводить до трех параллельных испытаний, испытания для каждого опыта проводились в трех повторностях, рис. 4, б. Каждый эксперимент состоял из шести последовательных опытов с различным значением температуры t^H .

Последовательность и основные условия проведения лабораторного эксперимента по определению температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса для одного вида грунта представлены блок-схемой на рис. 5.



Рис. 4. Проведение лабораторного эксперимента:
 а – общий вид модели с капиллярным барьером;
 б – смонтированные блоки установки в момент проведения эксперимента

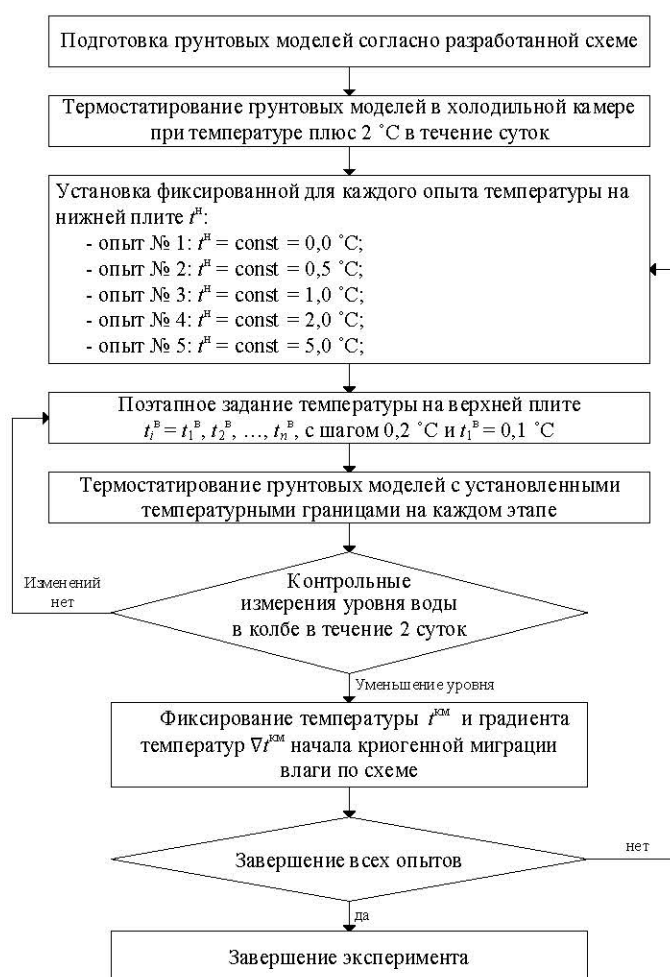


Рис. 5. Последовательность лабораторного эксперимента по определению температурных критериев начала интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах

В ходе эксперимента программный комплекс прибора позволял производить непрерывный контроль температур верха, низа и середины грунтовой модели в режиме реального времени.

Результаты исследования

Проведенный эксперимент позволил определить температурные критерии (температуру t^{KM} и градиент температур ∇t^{KM} под капиллярным барьером), соответствующие началу интенсивного криогенного влагопереноса. Экспериментальные данные (средние значения параметров температурного поля в моделях в момент начала криогенного влагопереноса по результатам не менее трех испытаний для каждого опыта) представлены в табл. 2. В табл. 2 и далее выполнена совместная обработка данных с ранее выполненными авторами исследования [15, 16] по отдельным видам глинистых грунтов.

Таблица 2

Экспериментальные данные для исследуемых грунтов

№ Опыта	Средние значения параметров температурного поля под капиллярным барьером в экспериментальных моделях в момент начала криогенного влагопереноса	
	Температура (t_{cp}^{KM}), °С	Градиент температур (∇t_{cp}^{KM}), °С/см
1	2	3
Исследуемый грунт: супесь пылевая с $I_p = 0,05$		
1	-0,30	0,03
3	-0,07	0,06
4	0,13	0,09
5	0,67	0,13
5	1,00	0,20
6	1,37	0,26
Исследуемый грунт: супесь пылевая с $I_p = 0,07$		
1	-0,57	0,06
2	-0,13	0,06
3	-0,03	0,10
4	0,63	0,14
5	0,83	0,22
6	1,17	0,28
Исследуемый грунт: суглинок легкий пылеватый с $I_p = 0,09$		
1	-0,80	0,08
2	-0,50	0,10
3	-0,17	0,12
4	0,30	0,17
5	0,87	0,21
6	1,10	0,29
Исследуемый грунт: суглинок легкий пылеватый с $I_p = 0,11$		
1	-0,83	0,08
2	-0,57	0,11
3	-0,40	0,14
4	0,27	0,17
5	0,47	0,25
6	0,93	0,31
Исследуемый грунт: суглинок легкий пылеватый с $I_p = 0,13$		
1	-1,00	0,10
2	-0,60	0,11
3	-0,33	0,13
4	0,00	0,20
5	0,37	0,26
6	0,77	0,32

Далее выполнена аппроксимация полученных экспериментальных данных экспоненциальными функциями. На рис. 6 представлены аппроксимирующие кривые с нанесенными экспериментальными точками для исследуемых глинистых грунтов. Физически каждая аппроксимирующая функция – это граница температурной области начала криогенного влагопереноса под капиллярным барьером для конкретного вида глинистого грунта (рис. 6).

Следует отметить, что именно «криогенный» влагоперенос, в классическом понимании, происходит в левой относительно оси ординат части графика. При относительно высоких градиентах температур именно они становятся основной движущей составляющей влагопереноса, и миграция влаги начинается и при положительных температурах грунта. Этот факт не препятствует получению и даже расширяет возможности решения поставленной задачи – определения оптимальной глубины расположения капиллярного барьера.

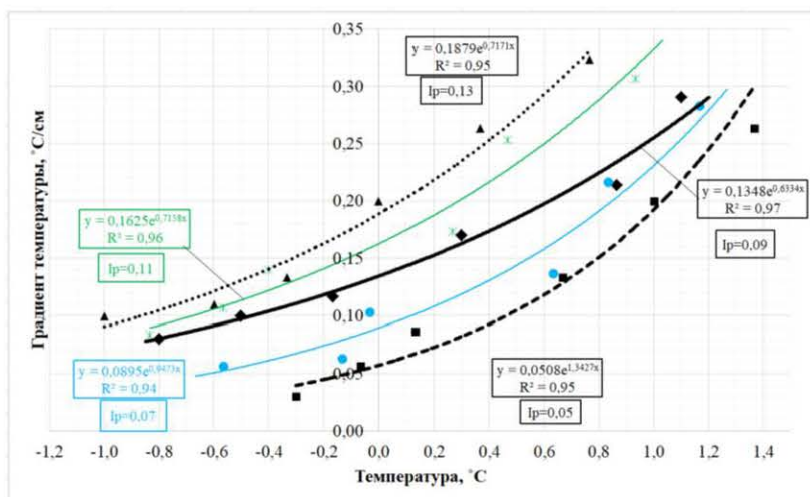


Рис. 6. Экспериментальные данные, аппроксимированные экспоненциальными функциями

Аппроксимация показала (рис. 6), что полученные экспериментальные данные наиболее точно описываются экспоненциальными функциями. Достоверность аппроксимации (R^2) для каждого графика составила более 0,90, что демонстрирует адекватность математической модели и высокую степень близости аппроксимации экспериментальных данных выбранной функции.

Уравнения аппроксимирующих функций и двухпараметрические температурные критерии для исследуемых глинистых грунтов представлены в табл. 3, где ∇t – градиент температуры в зоне промерзания, $^{\circ}\text{C}/\text{см}$; t – температура в зоне промерзания.

Полученные экспериментальные данные дополнительно аппроксимированы по числу пластичности глинистого грунта I_p с определением поверхности влияния, представленной на рис. 7. Наибольшая степень достоверности аппроксимации в этом случае получена с применением полинома.

Таблица 3

Двухпараметрические температурные критерии для исследуемых глинистых грунтов

№	Вид глинистого грунта	I_p	Аппроксимирующая функция по результатам эксперимента	Двухпараметрический температурный критерий начала интенсивной миграции влаги
1	Супесь пылеватая [по 15]	0,05	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,0508e^{1,3427t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,0508e^{1,3427t} > 0$
2	Суглинок легкий пылеватый	0,07	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,0895e^{0,9473t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,0895e^{0,9473t} > 0$
3	Суглинок легкий пылеватый [по 15]	0,09	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,1348e^{0,6334t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,1348e^{0,6334t} > 0$
4	Суглинок легкий пылеватый	0,11	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,1625e^{0,7158t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,1625e^{0,7158t} > 0$
5	Суглинок тяжелый пылеватый [по 15, 16]	0,13	$\nabla t^{\text{KM}} - 0,1879e^{0,7171t^{\text{KM}}} = 0$	$\nabla t - 0,1879e^{0,7171t} > 0$

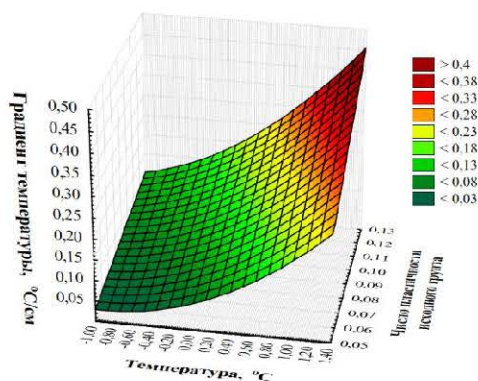


Рис. 7. Экспериментальные данные в виде поверхности влияния

Уравнение поверхности (рис. 7) имеет вид

$$\nabla t = 0,0431t^2 - 0,0279I_p^2 + 0,6387tI_p + 0,0475t + 1,5624I_p - 0,0129,$$

а критерий начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером выполняется при

$$\nabla t - 0,0431t^2 + 0,0279I_p^2 - 0,6387tI_p - 0,0475t - 1,5624I_p + 0,0129 > 0.$$

Выводы

По результатам поставленного и проведенного лабораторного эксперимента установлены и аппроксимированы экспоненциальной функцией двухпараметрические температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса под капиллярным барьером (табл. 3). Критерии определены для достаточно широкого диапазона глинистых грунтов (число пластичности от 0,05 до 0,13). Данные грунты, как правило, обладают пучинистыми свойствами, и в то же время, их возможно стабилизировать инъекционными способами.

При проектировании капиллярного барьера, не допускается формирование под ним, в сезонно промерзающих грунтах основания или тела земляного полотна, температурного поля, удовлетворяющего условиям по двухпараметрическому температурному критерию (табл. 3). В противном случае будет существовать возможность начала криогенного влагопереноса под проектируемой конструкцией, с формированием слабых подстилающих грунтов. В этом случае необходимо корректировать (увеличивать) глубину расположения капиллярного барьера в сооружении.

Результаты проведенного исследования, при прогнозировании температурного поля в системе «земляное полотно – основание», позволяют определять оптимальную глубину проектирования капиллярного барьера.

Список литературы

- 1 Золотарь, И. А. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / И. А. Золотарь, Н. А. Пузаков, В. М. Сиденко. – Москва : Транспорт, 1971. – 416 с.
- 2 Пузаков, Н. А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог / Н. А. Пузаков. – Москва, 1960. – 169 с.
- 3 Razuvaev, D. A. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds / D. Razuvaev, A. Lanis, M. Chakhlov // Sciences in Cold and Arid Regions. – Volume 13, Issue 5, October, 2021. – P. 366–371. – ISSN 2310-0044.
- 4 Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov, V. Y. Soloviova, G. V. Karpachevsky // Transportation Research Procedia : 12, Irkutsk-Krasnoyarsk, 06–08 October 2021. – Irkutsk ; Krasnoyarsk, 2022. – P. 621–626. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.100.
- 5 Коэффициенты морозного пучения силикатизированных глинистых грунтов / Д. А. Разуваев, А. Л. Ланис, М. Г. Чахлов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (65). – С. 91–98. – DOI 10.52170/1815-9265_2023_65_91.
- 6 Чеверев, В. Г. Физико-химическая теория формирования массообменных и тепловых свойств криогенных грунтов : специальность 04.00.07 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени

References

- 1 Zolotar, I. A. Water-thermal regime of roadbed and road clothing / I. A. Zolotar, N. A. Puzakov, V. M. Sidenko. – Moscow : Transport, 1971. – 416 p.
- 2 Puzakov, N. A. Water-thermal regime of roadbeds of highways / N. A. Puzakov. – Moscow, 1960. – 169 p.
- 3 Razuvaev, D. A. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds / D. Razuvaev, A. Lanis, M. Chakhlov // Sciences in Cold and Arid Regions. – Volume 13, Issue 5, October, 2021. – P. 366–371. – ISSN 2310-0044.
- 4 Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov, V. Y. Soloviova, G. V. Karpachevsky // Transportation Research Procedia : 12, Irkutsk-Krasnoyarsk, 06–08 October 2021. – Irkutsk ; Krasnoyarsk, 2022. – P. 621–626. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.100.
- 5 Coefficients of frost heaving of silicatised clayey soils / D. A. Razuvaev, A. L. Lanis, M. G. Chakhlov, R. S. Pechenkin // Siberian Transport University Bulletin. – 2023. – No. 2 (65). – P. 91–98. – DOI 10.52170/1815-9265_2023_65_91.
- 6 Cheverev, V. G. Physico-Chemical Theory of Formation of Mass Exchange and Thermal Properties of Cryogenic Soils : specialty 04.00.07 “Engineering geology, permafrost and soil science” : Thesis for the Degree of Doctor of Geological and

доктора геолого-минералогических наук / В. Г. Чеверев ; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. – Москва, 1999. – 305 с.

7 Чистотин, Л. В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах / Л. В. Чистотин. – Москва : Наука, 1973. – 142 с.

8 Ананян, А. А. Исследование процессов перемещения влаги и образование сегрегационного льда в замерзающих и мерзлых горных породах / А. А. Ананян // Труды Гидропроекта. – Сб. 3. – Москва, 1960.

9 Кудрявцев, С. А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечно-элементные расчеты) / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. – Санкт-Петербург, 2014. – 262 с. – ISBN 978-5-9904956-3-0.

10 Общее мерзлотоведение (геокриология) / В. А. Кудрявцев, Б. Н. Достовалов, Н. Н. Романовский [и др.] ; под редакцией В. А. Кудрявцева. – Москва : Издательство МГУ, 1978. – 464 с.

11 Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.

12 Анализ представлений о механизме криогенной миграции воды в промерзающих грунтах / В. Г. Чеверев, А. В. Брушков, С. А. Половков [и др.] // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25, № 5. – С. 3–12. – DOI 10.15372/KZ20210501.

13 Bronfenbrener, L. Modeling frost heave in freezing soils / L. Bronfenbrener, R. Bronfenbrener // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 61. – P. 43–64. – DOI 10.1016/j.coldregions.2009.12.007.

14 Extended porosity rate function for frost heave / B. Abdalla, C. Fan, C. Mckinnon [et al.] // 33rd Intern. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 10 : Polar and Arctic Science and Technology (San Francisco, California, USA, June 8–13, 2014). – New York, Publ. ASME, 2014, V010T07A046.

15 Разуваев, Д. А. Температурные критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах земляного полотна / Д. А. Разуваев, М. Г. Чахлов // TRANSOILCOLD-2023 : Материалы 6-го Международного Симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах, Москва, 02–05 октября 2023 года ; под общей редакцией Т. В. Шепитко. – Москва, 2023. – С. 155–157. – EDN YYSXKO.

16 Razuvaev, D. A. Determination of the two-parameter temperature criterion for the start of the intensive cryogenic moisture transfer process in clay soils of the subgrade / D. Razuvaev, M. Chakhlov // E3S Web of

Mineralogical Sciences / V. G. Cheverev ; Moscow State University named after. M. V. Lomonosov. – Moscow, 1999. – 305 p.

7 Chistotin, L. V. Water Migration in Freezing Unsaturated Soils / L. V. Chistotin. – Moscow : Nauka, 1973. – 142 p.

8 Ananyan, A. A. Study of Water Migration Processes and Formation of Segregational Ice in Freezing and Frozen Mountain Rocks. – Proceedings of Hydroproject. – Vol. 3. – Moscow, 1960.

9 Kudryavtsev, S. A. Freezing and Thawing of Soils (Practical Examples and Finite Element Calculations) / S. A. Kudryavtsev, I. I. Sakharov, V. N. Paramonov. – Saint Petersburg, 2014. – 262 p. – ISBN 978-5-9904956-3-0.

10 General Permafrost Science (Geocryology) / V. A. Kudryavtsev, B. N. Dostovalov, N. N. Romanovsky [et al.] ; Edited by V. A. Kudryavtsev. – Moscow : Moscow State University Press, 1978. – 464 p.

11 Lykov, A. V. Theory of Heat and Mass Transfer / A. V. Lykov, Yu. A. Mikhailov. – Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1963. – 536 p.

12 Analysis of concepts on the mechanism of cryogenic water migration in freezing soils / V. G. Cheverev, A. V. Brushkov, S. A. Polovkov [et al.] // Earth's Cryosphere. – 2021. – Vol. 25, No. 5. – P. 3–12. – DOI 10.15372/KZ20210501.

13 Bronfenbrener, L. Modeling frost heave in freezing soils / L. Bronfenbrener, R. Bronfenbrener // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 61. – P. 43–64. – DOI 10.1016/j.coldregions.2009.12.007.

14 Extended porosity rate function for frost heave / B. Abdalla, C. Fan, C. Mckinnon [et al.] // 33rd Intern. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 10 : Polar and Arctic Science and Technology (San Francisco, California, USA, June 8–13, 2014). – New York, Publ. ASME, 2014, V010T07A046.

15 Razuvaev, D. A. Temperature criterion for the start of the intensive cryogenic moisture transfer process in the soils of the subgrade / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov // TRANSOILCOLD-2023 : Materials of the 6th International Symposium on Geotechnical Engineering of Transportation Infrastructure in Cold Regions, Moscow, October 2–5, 2023 ; Edited by T. V. Shepitko. – Moscow, 2023. – P. 155–157. – EDN YYSXKO.

16 Razuvaev, D. A. Determination of the two-parameter temperature criterion for the start of the intensive cryogenic moisture transfer process in clay soils of the subgrade / D. A. Razuvaev,

Conferences. Volume 402, 12022 (2023). –
DOI 10.1051/e3sconf/202340212022.

M. G. Chakhlov // E3S Web of Conferences. Vol-
ume 402, 12022 (2023). –
DOI 10.1051/e3sconf/202340212022.

D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE TWO-PARAMETER TEMPERATURE CRITERION FOR THE ONSET OF INTENSIVE CRYOGENIC MOISTURE TRANSFER IN VARIOUS TYPES OF CLAYEY SOILS

Abstract. A method for creating a capillary barrier in the subgrade soil of railway pavements by injecting waterproofing compounds has been proposed and justified for use in adverse soil and hydrological conditions and deep seasonal freezing of soils. The implementation of this method allows for the elimination of frost heaving in the active zone of the subgrade during seasonal freezing.

For more accurate predictions and determining the depth of the capillary barrier during design, the authors aimed to establish a two-parameter criterion (based on temperature and temperature gradient) for the onset of intensive cryogenic moisture transfer in clayey soils, and its dependence on the plasticity index. The paper describes the formulation, implementation, and presents the results of laboratory experiments aimed at solving this relevant problem.

Based on the experiment results, exponential functions for the two-parameter temperature criteria for the onset of intensive cryogenic moisture transfer beneath the capillary barrier have been determined and approximated for various types of clayey soils (within the plasticity index range of 0.05 to 0.13). Additionally, the obtained experimental data have been further approximated based on the plasticity index of the clayey soil.

Keywords: railway, capillary barrier, subgrade, seasonal freezing, soil temperature, soil temperature gradient, moisture transfer.

For citation: Razuvaev, D. A. Experimental determination of the two-parameter temperature criterion for the onset of intensive cryogenic moisture transfer in various types of clayey soils / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 35–44. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_35.

Сведения об авторах

Разуваев Денис Алексеевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail : razdenis@mail.ru

Чахлов Михаил Геннадьевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
преподаватель, научный сотрудник,
e-mail : mik404@mail.ru

Information about the authors

Razuvaev Denis Alexeevich

Siberian Transport University (STU),
Chair «Track and Track Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail : razdenis@mail.ru

Chakhlov Mikhail Gennadevich

Siberian Transport University (STU),
Chair «Track and Track Facilities»,
Lecturer, Researcher,
e-mail : mik404@mail.ru