

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2023. Т. 25. № 3. С. 197–207.

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2023; 25 (3): 197–207.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.731.2:624.138.24

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-197-207

EDN: NILPUA

## ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЦ КАПИЛЛЯРНОГО БАРЬЕРА ИЗ ИНЪЕКТИРОВАННОГО РАСТВОРА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Денис Алексеевич Разуваев, Михаил Геннадьевич Чахлов  
*Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Проблема разрушения конструкции дорожной одежды в результате действия сил морозного пучения на эксплуатируемых автомобильных дорогах для многих регионов России остается весьма актуальной.

Одним из эффективных способов регулирования величины морозного пучения земляного полотна автомобильных дорог в неблагоприятных грунтово-климатических условиях является устройство капиллярного барьера. Данный способ с использованием инъекционных методов преобразования грунтов ранее обоснован авторами по результатам полевых и лабораторных исследований.

Тем не менее для практического применения предложенного способа важнейшими нерешенными задачами исследования являются определение расчетной глубины расположения капиллярного барьера в теле земляного полотна и его оптимальной мощности.

**Цель исследования:** расчетное обоснование границ капиллярного барьера из инъектированного раствора для предотвращения морозного пучения земляного полотна.

**Методологическую основу работы** составляют методы теоретического исследования, такие как абстрагирование, анализ и синтез.

**Результаты исследования:** сформулировано условие перевода «открытой» системы промерзания в «закрытую» и предложены критерии при создании капиллярного барьера; получено решение для определения максимальной толщины капиллярного барьера, которое зависит от свойств его материала и коэффициента влагопроводности; представлено решение задачи о расположении капиллярного барьера в теле эксплуатируемого земляного полотна, которое основано на привязке зоны интенсивного влагопереноса к изолиниям температур в промерзающем массиве.

**Ключевые слова:** капиллярный барьер, эксплуатируемое земляное полотно, инъекция в грунты, силикатизированный грунт, сезонное промерзание, морозное пучение

**Для цитирования:** Разуваев Д.А., Чахлов М.Г. Обоснование границ капиллярного барьера из инъектированного раствора для предотвращения морозного пучения земляного полотна // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 197–207. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-197-207. EDN: NILPUA

## ORIGINAL ARTICLE

**ARRANGEMENT OF CAPILLARY BARRIER MADE OF INJECTED SOLUTION TO PREVENT SUBGRADE FROST HEAVING****Denis A. Razuvaev, Mikhail G. Chakhlov***Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** The problem of road pavement deterioration due to the forces of frost heave on operating roads remains highly relevant for many regions of Russia.

One of the effective methods for regulating the magnitude of frost heave in the roadbed of highways under unfavorable soil-climatic conditions is the installation of a capillary barrier. This method, using injection methods for soil transformation, has been previously justified by the authors based on field and laboratory research.

However, for practical implementation of the proposed method, the key unresolved research tasks are the determination of the calculated depth of the capillary barrier within the roadbed and its optimal thickness.

In this regard, the aim of the research is to provide a calculated justification for the boundaries of the capillary barrier made from injected solution to prevent frost heave in the roadbed.

The methodological basis of the study includes theoretical research methods such as abstraction, analysis, and synthesis.

The article formulates the condition for transitioning from an "open" freezing system to a "closed" system and proposes criteria for creating a capillary barrier. A solution is obtained to determine the maximum thickness of the capillary barrier, which depends on the properties of its material and the coefficient of moisture conductivity. The solution to the problem of locating the capillary barrier within the structure of the operating roadbed is presented, based on correlating the zone of intensive moisture transfer with the isotherms of temperatures in the freezing massif.

**Keywords:** capillary barrier, subgrade, soil injection, silicified soil, seasonal freezing, frost heaving

**For citation:** Razuvaev D.A., Chakhlov M.G. Arrangement of capillary barrier made of injected solution to prevent subgrade frost heaving. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 197–207. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-197-207. EDN: NILPUA

**Введение**

Одним из эффективных способов регулирования водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог, и в частности величины морозного пучения, в условиях высокого залегания грунтовых вод и широкого распространения пучинистых грунтов является устройство капиллярного барьера.

Способ создания капиллярного барьера в земляном полотне (рис. 1) для эксплуатируемых автомобильных дорог с использованием инъекционных методов преобразования грунтов обоснован результатами полевых и лабораторных исследований и детально описан авторами в работах [1, 2].

Разработанная конструкция основана на технологии инъектирования (например, силиката натрия) и представляет собой совокупность объединенных преобразованных элементов грунта. Разработанный способ позволяет перевести открытую схему промерзания грунта в закрытую за счет прерывания

влажнопереноса в грунтах земляного полотна, что существенно снижает величину морозного пучения грунтов рабочего слоя земляного полотна. Кроме того, применение в нижней части зоны сезонного промерзания в качестве капиллярного барьера непучинистого материала с коэффициентом морозного пучения менее 1 % [3, 4] позволяет добиться дополнительного эффекта.

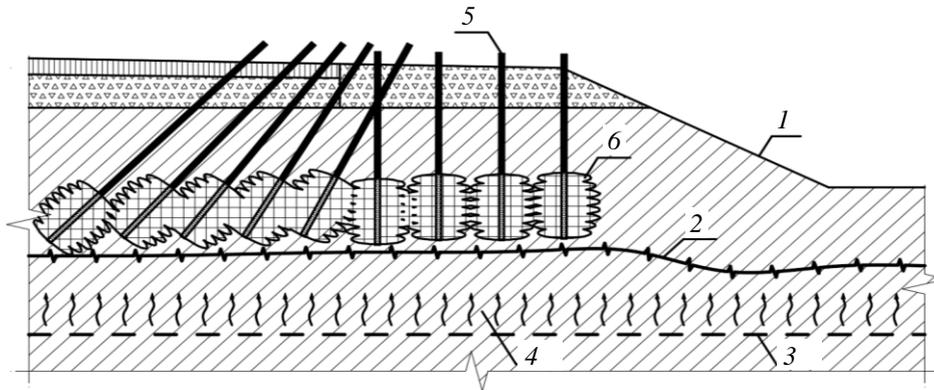


Рис. 1. Обобщенная конструкция земляного полотна с капиллярным барьером:  
1 – земляное полотно; 2 – условная граница зоны сезонного промерзания; 3 – уровень грунтовых вод; 4 – зона капиллярной миграции воды; 5 – инъекторы; 6 – элементы капиллярного барьера из гидроизолирующего раствора, инъектированного в грунт

Fig. 1. Generalized design of subgrade with capillary barrier:  
1 – subgrade; 2 – conventional boundary of seasonal freezing; 3 – ground water level; 4 – capillary water migration; 5 – injectors; 6 – elements of the capillary barrier made of waterproofing solution injected into the soil

Тем не менее для практического применения предложенного способа важнейшей задачей исследования является определение расчетной глубины расположения капиллярного барьера в теле земляного полотна и его оптимальной мощности.

Решение данной задачи позволит сделать дальнейший шаг к разработке методики проектирования капиллярного барьера, реализация которой существенно снизит величину морозного пучения рабочего слоя земляного полотна, и выполнить расчет деформации морозного пучения при проектировании как для закрытой системы по одному из известных решений [3, 5, 6].

#### Условие перехода к закрытой системе промерзания

Для решения поставленной задачи в первую очередь необходимо определить, что считается закрытой и открытой системой промерзания, а также каково условие перехода открытой в закрытую систему при создании капиллярного барьера.

В научной литературе отсутствуют четкие, общепризнанные определения закрытой и открытой системы промерзания. Тем не менее, в общем случае, под закрытой системой можно понимать такие условия, при которых основная миграция влаги при сезонном промерзании грунтов происходит только

за счет перераспределения собственных запасов воды в зоне сезонного промерзания [5, 7, 8]. При открытой системе, напротив, формируются условия, способствующие миграции (подтягиванию) значительного количества влаги в зону сезонного промерзания из нижележащих грунтов земляного полотна, что, как правило, сопровождается существенным льдообразованием с формированием различной криогенной текстуры [5, 7, 8]. На основании этого предлагаем считать условием перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера снижение объема криогенной миграции влаги  $\Delta W_{\text{мг}}$  в зону сезонного промерзания из нижележащих грунтов земляного полотна до значения  $\Delta W_{\text{мг}}^{\text{б}}$  и ниже, не оказывающего существенно влияния на величину морозного пучения дорожной одежды.

Величины объема криогенной миграции влаги соответственно в грунте и капиллярном барьере  $\Delta W_{\text{мг}}$  и  $\Delta W_{\text{мг}}^{\text{б}}$  определяются по известным решениям [3, 9] и в первую очередь зависят от коэффициентов влагопроводности грунта и материала капиллярного барьера соответственно.

Исходя из решения, полученного А.Л. Исаковым [5] для коэффициента пучения при закрытой системе  $K_{\text{пуч}}^3$ , максимальное значение указанного параметра в закрытой системе наблюдается в случае равенства предзимней влажности  $W_0$  и влажности  $W_{\text{sat}}$  полностью водонасыщенного грунта. Следовательно, при обеспечении условия (1) при создании капиллярного барьера (подборе толщины барьера и его коэффициента влагопроводности для исходных значений градиентов температур и влажности) открытую систему с капиллярным барьером можно считать закрытой:

$$\Delta W_{\text{мг}}^{\text{б}} \leq W_{\text{sat}} - W_0. \quad (1)$$

### Расположение капиллярного барьера в теле земляного полотна

Для решения поставленной задачи, исходя из сформулированного условия перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера, рассмотрены существующие теории тепло- и массообмена [6, 7, 8].

В современном представлении на механизм криогенной миграции в различной степени влияют влагопроводные свойства грунтов в талой и мерзлой зонах, а также градиенты влажности и температуры (в некоторых источниках скорость промерзания). В общем случае, удельный поток влаги  $i_{\text{в}}$  достаточно полно описывается дифференциальным уравнением следующего вида [10]:

$$i_{\text{в}} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_1 \frac{\partial w}{\partial x} + K_1 \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right], \quad (2)$$

где  $K_1$  – коэффициент влагопроводности,  $\text{м}^2/\text{ч}$ ;  $\delta$  – термоградиентный коэффициент;  $\frac{\partial w}{\partial x}$  и  $\frac{\partial t}{\partial x}$  соответственно градиенты влажности и температуры.

Подход отечественных ученых к решению задачи прогноза влагонакопления в промерзающих грунтах достаточно различен и основан на некоторых

допущениях и эмпирических решениях. Тем не менее большинство авторов [3, 11, 12] сходятся во мнении, что при промерзании грунтов практически в любой момент времени существует зона интенсивного влагопереноса, близкая по глубине к зоне фазовых переходов, но не точно совпадающая с ней. Ниже зоны фазовых переходов снижаются градиенты температур и влажности, выше – существенно снижается коэффициент влагопроводности, т. е. изменяются параметры, входящие в формулу (2). В силу различных механизмов эффект миграции влаги имеет место быть вне зоны интенсивного влагопереноса. Однако для решаемой задачи размещения капиллярного барьера (в пределах точности решения подобных задач) предлагаем ограничиться рассмотрением именно зоны интенсивного влагопереноса.

В общем виде зона интенсивного влагопереноса (по времени  $T$ ) имеет вид, представленный на рис. 2 (заштрихована в границах, обозначенных сплошными линиями). В момент времени  $T_{fm}$ , соответствующий максимальной глубине сезонного промерзания, можно выделить нижнюю границу зоны интенсивного влагопереноса, соответствующую глубине относительно поверхности земляного полотна  $z_{ms}$ , и верхнюю границу, соответствующую глубине  $z_{me}$ . На глубинах  $z_{ms}$  и  $z_{me}$  соответственно начинается и заканчивается интенсивный влагоперенос в момент времени  $T_{fm}$ .

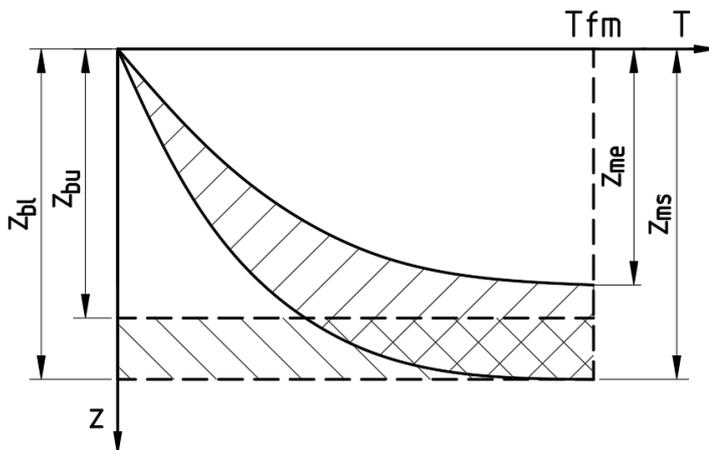


Рис. 2. Расположение капиллярного барьера относительно зоны интенсивного влагопереноса  
Fig. 2. Capillary barrier arrangement relative to intensive moisture transfer

Принимая во внимание сформулированное условие перевода открытой системы промерзания в закрытую при создании капиллярного барьера, а также необходимость расположения капиллярного барьера из непучинистого материала именно в зоне промерзания, можно записать условия для расположения капиллярного барьера следующим образом:

$$z_{bl} = z_{ms}, \quad (3)$$

$$z_{ms} > z_{bu} \geq z_{me}, \quad (4)$$

где  $z_{bl}$  – глубина нижней границы капиллярного барьера (рис. 2);  $z_{bu}$  – глубина верхней границы капиллярного барьера (рис. 2).

Расположение капиллярного барьера ниже зоны интенсивного влагопереноса приведет к перерасходу материалов выше нижней границы такой зоны: в лучшем случае к образованию области переувлажнения под капиллярным барьером, в худшем – к льдообразованию и пучению. Расположение капиллярного барьера выше верхней границы зоны интенсивного влагопереноса также будет приводить к перерасходу материалов, поскольку закрытая система промерзания уже будет обеспечена. Поэтому верхняя граница капиллярного барьера должна совпадать или находиться ниже верхней границы зоны интенсивного влагопереноса, а толщина капиллярного барьера  $h_6$  будет зависеть от свойств его материала и, главным образом, от коэффициента влагопроводности  $h_1^6$ .

Исходя из условий (3) и (4), максимальная толщина капиллярного барьера составляет

$$h_6^{\max} = z_{ms} - z_{me}. \quad (5)$$

Для определения границы зоны интенсивного влагопереноса, а соответственно, и границ расположения капиллярного барьера возможно использовать одно решение, предлагаемое рядом исследователей [7, 9, 13].

#### Расположение зоны интенсивного влагопереноса при промерзании

Это решение основано на привязке зоны интенсивного влагопереноса к изолиниям температур в промерзающем массиве. На основании наблюдений за лабораторными и полевыми опытами [7, 9, 13, 14] установлено, что интенсивный влагоперенос наблюдается в интервале изотерм от 0 до  $-3-5$  °С практически независимо от типа глинистого грунта. Еще в середине прошлого века были осуществлены эксперименты по миграции влаги в замерзающих глинистых грунтах под влиянием градиента температур с образованием прослоек льда. Обобщая результаты экспериментов, авторы в работе [13] показали, что большая часть потока влаги из талой зоны переносится внутри промерзающей зоны в пределах отрицательных температур от 0 до  $-4$  °С. Более детально данный вопрос исследован в работе [7] на специально разработанных экспериментальных установках. С учетом S-образного характера кривой зависимости  $W_n(t)$  содержания незамерзшей воды от температуры в работе [7] выделены три качественно различные температурные зоны для пылевато-глинистых грунтов. Среди этих зон наибольший интерес представляет зона интенсивных фазовых переходов, приуроченная к интервалу температур от  $-0,6$  до  $-3$  °С (рис. 3). Эта зона характеризуется диффузионно-пленочным механизмом влагопереноса и является зоной интенсивного влагопереноса. При температуре грунта ниже температуры начала замерзания  $t_{нз}$ , но не ниже  $-0,6$  °С замерзание влаги не вызывает ее дефицита и, соответственно, движущей силы криогенной миграции. Температура от  $-3$  °С и ниже соответствует наличию лишь осмотической, адсорбированной и химически связанной категорий воды, которая, согласно опытным данным [7],

практически не принимает участия в миграции. Конечно, миграция влаги возможна и при более низких температурах [15], но ее интенсивность крайне мала, и при рассмотрении решаемой задачи ее можно не учитывать.

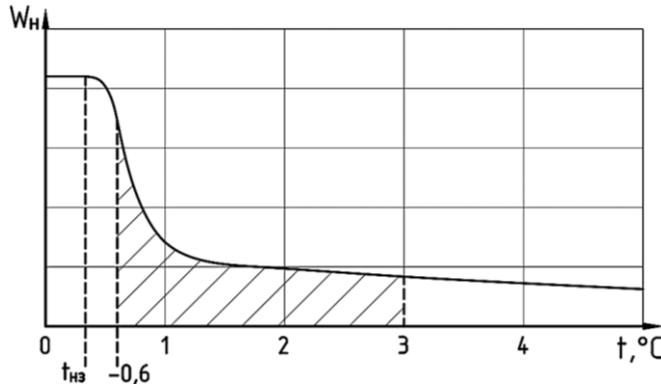


Рис. 3. Зона с диффузионно-пленочным механизмом влагопереноса на кривой зависимости содержания незамерзшей воды от температуры [7]

Fig. 3. Diffusion-film moisture transfer on the temperature curve of unfrozen water content

На основании представленных исследований глубины начала и окончания интенсивного влагопереноса возможно привязать к глубинам изотерм  $-0,6$  ( $t_{-0,6}$ ) и  $-3$  °C ( $t_{-3,0}$ ) соответственно, определенным в момент времени  $T_{fm}$ :

$$z_{ms} = z_{-0,6}; \quad z_{me} = z_{-3,0}. \quad (6)$$

Тогда (3) и (4) примут вид:

$$z_{bl} = z_{-0,6}, \quad (7)$$

$$z_{-0,6} > z_{bu} \geq z_{-3,0}. \quad (8)$$

При этом общий алгоритм решения задачи о расположении капиллярного барьера в теле земляного полотна может иметь вид, представленный на рис. 4.

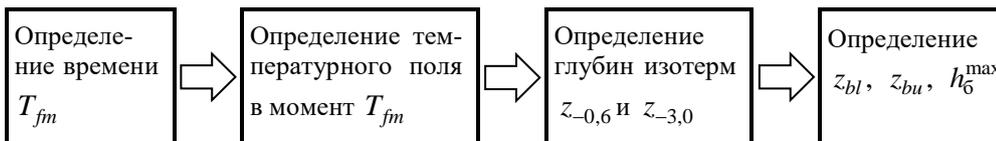


Рис. 4. Общий алгоритм решения задачи о расположении капиллярного барьера в теле земляного полотна

Fig. 4. General algorithm of problem solution of capillary barrier arrangement in subgrade

Параметры, указанные в первых двух блоках алгоритма, определяются решением основного дифференциального уравнения теплопроводности Фурье. Обобщая данные многолетних исследований [3, 8, 12], общее уравнение процесса промерзания-оттаивания для нестационарного теплового режима в трехмерном грунтовом пространстве можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \frac{\lambda_{th,f}}{c_{th,f}\rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + A, \quad (9)$$

в одномерной постановке

$$\frac{\partial t}{\partial T} = \frac{\lambda_{th,f}}{c_{th,f}\rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + A, \quad (10)$$

где  $C_{th,f}$  – удельная теплоемкость талых или мерзлых грунтов;  $\rho$  – плотность грунта;  $\lambda_{th,f}$  – коэффициент теплопроводности талых или мерзлых грунтов;  $t$  – температура грунтов;  $T$  – время;  $A$  – функция, учитывающая различные концепции, механизмы и теории теплопереноса в грунтах, в том числе внутренние источники тепла [3, 8, 12].

Наряду с решением уравнений (9) и (10), определение времени  $T_{fm}$ , соответствующего максимальной глубине сезонного промерзания и температурного поля в конструкции в этот момент, возможно выполнять с использованием доступных и сертифицированных программных комплексов (Frost 3D, Freeze-1, Termoground), что значительно упрощает процесс расчетов и проектирования при решении прикладных инженерных задач.

Получив эпюру температурного поля в конструкции в момент времени  $T_{fm}$  (рис. 5), можно определить глубину изотерм  $-0,6$  ( $z_{-0,6}$ ) и  $-3^\circ\text{C}$  ( $z_{-3,0}$ ), а также глубину нижней  $z_{bl}$  и верхней  $z_{bu}$  границ капиллярного барьера и максимальную толщину капиллярного барьера  $h_6^{\max}$  по (7), (8) и (5) соответственно.

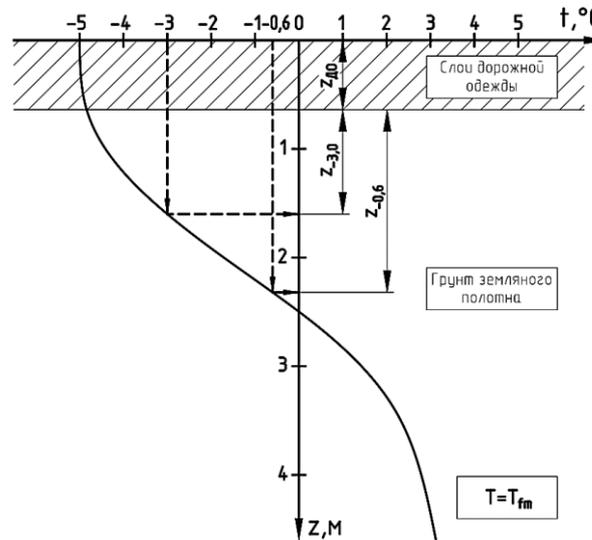


Рис. 5. Эпюра температурного поля (в одномерной постановке) в конструкции в момент максимального промерзания

Fig. 5. One-dimensional temperature curve at maximum freezing

### Заключение

По результатам исследования сформулировано условие перевода открытой системы промерзания в закрытую и предложены критерии создания капиллярного барьера, формула (1).

Получено решение для определения максимальной толщины капиллярного барьера, формула (5). Для дальнейшего развития расчетной базы по определению деформаций морозного пучения при создании капиллярного барьера в земляном полотне путем инъектирования необходимо решить задачу обоснования расчетной толщины капиллярного барьера  $h_c$ , которая, согласно формуле (2), будет зависеть от коэффициента влагопроводности  $K_1^6$  материала самого барьера. В дальнейших исследованиях необходимо установить зависимость данного параметра от числа пластичности глинистого грунта. При этом определение влагопроводности необходимо выполнить в условиях, приближенных к реальным, т. е. в процессе промерзания.

Задача о расположении (границах) капиллярного барьера в теле земляного полотна может быть решена по предлагаемым формулам (7), (8). Предложенные решения основаны на привязке зоны интенсивного криогенного влагопереноса к изолиниям температур в промерзающем массиве грунта и, в свою очередь, методологически упрощают существующие подходы.

Для верификации полученных решений в будущих исследованиях необходимо:

- разработать методику лабораторного эксперимента с использованием прибора ГТ 1.1.12 для определения температуры (в том числе градиента температур) начала интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах;
- по разработанной методике провести серию экспериментов на образцах из супесей и суглинков с числом пластичности от 0,05 до 0,13;
- на основании экспериментальных данных уточнить изотермы начала интенсивного криогенного влагопереноса при выбранных параметрах эксперимента.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Razuvaev D.A., Lanis A., Chakhlov M.* Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds // *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021. V. 13. № 5. P. 366–371. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21029
2. *Razuvaev D.A., Chakhlov M.G., Soloviova V.Y., Karpachevsky G.V.* Injection compositions for creating impervious screen for roadbed foundation // *Transportation Research Procedia*. 2022. V. 61. P. 621–626. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.100>
3. *Золотарь И.А., Пузаков Н.А., Сиденко В.М.* Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. Москва : Транспорт, 1971. 416 с.
4. *Крицкий М.Я., Ланис А.Л.* Усиление земляного полотна автомобильных дорог. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2013. 182 с.
5. *Исаков А.Л., Бухов С.И.* К оценке коэффициента морозного пучения глинистых грунтов земляного полотна при закрытой системе промерзания // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 1 (56). С. 92–98.
6. *Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д.* Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Ленинград : Стройиздат, 1977. 184 с.

7. Чеверев В.Г. Физико-химическая теория формирования массообменных и тепловых свойств криогенных грунтов : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Москва, 1999. 305 с.
8. Кудрявцев В.А., Полтев Н.Ф., Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Меламед В.Г., Гаргуля Л.С. Мерзлотоведение / под ред. В.А. Кудрявцева. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1981. 240 с.
9. Пузаков Н.А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. Москва, 1960. 169 с.
10. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Москва : Стройиздат, 1963. 535 с.
11. Ланис А.Л., Разуваев Д.А., Усов Д.А. Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (58). С. 104–111. DOI 10.52170/1815-9265\_2021\_58\_104
12. Кудрявцев С.А., Сахаров И.И., Парамонов В.Н. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечно-элементные расчеты). Санкт-Петербург, 2014. 262 с.
13. Кудрявцев В.А., Достовалов Б.Н., Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. Общее мерзлотоведение (геокриология) / под ред. В.А. Кудрявцева. Москва : Изд-во МГУ, 1978. 464 с.
14. Ананян А.А. Исследование процессов перемещения влаги и образование сегрегационного льда в замерзающих и мерзлых горных породах // Труды Гидропроекта. Сб. 3. Москва, 1960.
15. Чистотинов Л.В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. Москва : Наука, 1973. 142 с.

## REFERENCES

1. Razuvaev D.A., Lanis A.L., Chakhlov M.G. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021; 13: 366–371.
2. Razuvaev D.A., Chakhlov M.G., Soloviova V.Y., Karpachevsky G.V. Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation. *Transportation Research Procedia*. 2022; 61: 621–626.
3. Zolotar' I.A., Puzakov N.A., Sidenko V.M. Water thermal conditions of subgrade and pavement. Moscow: Transport, 1971. 416 p. (In Russian)
4. Kritskiy Ya.M., Lanis A.L. Subgrade strengthening. Novosibirsk, 2013. 182 p. (In Russian)
5. Isakov A.L., Bukhov S.I. Assessment of frost heaving coefficient of clayey subgrade soils with closed-freezing system. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2021; 1 (56): 92–98. (In Russian)
6. Orlov V.O., Dubnov Yu.D., Merenkov N.D. Freezing soil heaving and its effect on structure foundations. Saint-Petersburg: Stroiizdat, 1977. 184 p. (In Russian)
7. Cheverev V.G. Physicochemical theory of mass transfer and thermal properties of cryogenic soils. Moscow, 1999. 305 p. (In Russian)
8. Poltev N.F., Romanovskiy N.N., Kondrat'yeva K.A., Melamed V.G., Garagulya L.S., Kudryavtsev V.A. (Ed.) Permafrost. Moscow, 1981. 240 p. (In Russian)
9. Puzakov N.A. Water thermal conditions of subgrades. Moscow: Avtotransizdat, 1960. 169 p. (In Russian)
10. Lykov A.V., Mikhaylov Yu.A. Theory of heat and mass transfer. Moscow: Stroiizdat, 1963. 220 p. (In Russian)
11. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Usov D.A. Influence of seasonal thawing of frozen soils on subgrade deformation. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2021; 3 (58): 104–111. (In Russian)
12. Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N. Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element analysis. Saint-Petersburg: Georekonstruktsiya, 2014. 262 p. (In Russian)
13. Dostovalov B.N., Romanovskiy N.N., Kondrat'yeva K.A., Melamed V.G., Kudryavtsev V.A. (Ed.) General permafrost studies (geocryology). Moscow: MGU, 1978. 464 p. (In Russian)

14. *Ananyan A.A.* Moisture transfer and formation of segregated ice in freezing and frozen rocks. Trudy Gidroproekta 3. 1960. 115 p. (In Russian)
15. *Chistotinov L.V.* Moisture transfer in frozen non-saturated soils. Moscow: Nauka, 1973. 142 p. (In Russian)

**Сведения об авторах**

*Разуваев Денис Алексеевич*, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, razdenis@mail.ru

*Чахлов Михаил Геннадьевич*, аспирант, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, mik404@mail.ru

**Authors Details**

*Denis A. Razuvaev*, PhD, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, razdenis@mail.ru

*Mikhail G. Chakhlov*, Research Assistant, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, mik404@mail.ru

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Authors contributions**

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.12.2022  
Одобрена после рецензирования 17.04.2023  
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 02.12.2022  
Approved after review 17.04.2023  
Accepted for publication 16.05.2023