

Конечно-элементные модели термогидромеханического расчета насыпей автомобильных дорог в районах многолетнемерзлых грунтов

Ирина Вадимовна Демьянушко, Валерий Михайлович Стаин,
Илья Анатольевич Карпов, Павел Михайлович Абраменков

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ);
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современная практика строительства в районах с многолетнемерзлыми грунтами (ММГ) показывает, что наиболее рациональным принципом возведения оснований для автомобильных дорог (АД) в зоне перспективного развития территорий арктической зоны является сохранение грунтов в мерзлом состоянии (так называемый I принцип проектирования). Это объясняется, прежде всего, экономическими соображениями, так как оттаивание грунтов затратная технология и ее использование в какой-то степени оправдано только в зоне островного залегания вечномерзлых грунтов.

Материалы и методы. Чтобы обеспечить нормативные требования к прочности и деформациям дорожного покрытия в районах ММГ, необходимо выполнить совместный расчет трех физических полей — термического, гидравлического и механического, т.е. термогидромеханический (ТГМ) расчет. Такие расчеты требуются для проектирования и оценки соответствия нормативным требованиям при строительстве дорог в районах вечной мерзлоты. Сейчас на практике применяются отдельные методики расчета теплового состояния дорог на ММГ, после которого используются обычные приемы расчета механики многослойных дорожных конструкций. Для осуществления совместных ТГМ расчетов использовали широко распространенный для расчетов строительных конструкций конечно-элементный (КЭ) программный пакет Plaxis 2D.

Результаты. На основе проведенных исследований разработаны рекомендуемые КЭ модели для совместного ТГМ расчета насыпей АД в районах ММГ. Данные КЭ модели позволяют также изучать поля деформаций и поля скоростей фильтрации воды в процессе размораживания конструкции насыпь – основание.

Выводы. Продемонстрированы возможности разработки КЭ моделей для совместного ТГМ расчета насыпей АД в районах ММГ с помощью пакета программ Plaxis 2D. На конкретных примерах показано, что эти модели позволяют, в частности, определить оптимальную конструкцию насыпи автодороги в районах вечной мерзлоты при наличии ММГ и использовании для термостабилизации теплоизолирующих плит типа XPS в теле насыпи. Проведенные исследования на разработанных КЭ моделях показали, что эти модели позволяют также изучать поля деформаций и поля скоростей фильтрации воды в процессе размораживания конструкции насыпь – основание, что дает возможность проведения исследований различных дорожных конструкций, проектируемых для работы в арктических зонах на ММГ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: арктические зоны, совместный термогидромеханический расчет, метод конечных элементов, замораживание – оттаивание грунта, многолетнемерзлые грунты, теплоизолирующие плиты, насыпи автомобильных дорог, пакет программ Plaxis 2D

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Демьянушко И.В., Стаин В.М., Карпов И.А., Абраменков П.М. Конечно-элементные модели термогидромеханического расчета насыпей автомобильных дорог в районах многолетнемерзлых грунтов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 512–527. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.512-527

Автор, ответственный за переписку: Валерий Михайлович Стаин, vamis@yandex.ru.

Finite element models for the thermohydromechanical analysis of road embankments in areas with permafrost soils

Irina V. Demiyanshko, Valery M. Stain, Ilya A. Karpov, Pavel M. Abramnikov

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern construction practice in areas with permafrost soils (PS) shows that the most rational principle for the construction of foundations for highways in the area of prospective development of the territories of the Arctic zone is the preservation of soils in a frozen state (the so-called I design principle). This is primarily due to economic considerations, since soil thawing is a costly technology, and its use is justified to some extent only in the area of island occurrence of permafrost soils.

Materials and methods. In order to meet the regulatory requirements for the strength and deformations of the pavement in the PS areas, it is necessary to perform a joint calculation of three physical fields — thermal, hydraulic and mechanical, that is, to perform a thermohydronechanical (THM) calculation. Such calculations, which are absolutely necessary for the design and assessment of conformity during the construction of roads in permafrost areas. At the same time, only separate methods of calculating the thermal condition of roads at PS are currently used in practice, after which the usual methods of calculating the mechanics of multilayer road structures are further applied. In this paper, the authors used the Plaxis 2D finite element (FE) software package, which is widely used for calculations of building structures, to perform joint THM calculations.

Results. The paper presents the results of the conducted research, on the basis of which recommended FE models have been developed for the joint THM calculation of embankments of highways in the PS areas. Concrete examples show that these models make it possible, in particular, to determine the optimal location in the body of the embankment of the XPS thermal insulation board layers used for thermal insulation. The data from the FE model also make it possible to study the fields of deformations and fields of water filtration rates during the defrosting of the embankment – base structure.

Conclusions. This study shows the possibilities of developing FE models for the joint thermohydronechanical calculation of highway embankments in permafrost areas using the Plaxis 2D software package. Concrete examples show that these models make it possible, in particular, to determine the optimal design of a highway embankment in permafrost areas in the presence of PS when used for thermal stabilization of XPS-type insulating plates in the embankment body. The studies carried out on the developed FE models have shown that these models also make it possible to study the fields of deformations and fields of water filtration rates during the thawing of the embankment – base structure, which makes it possible to conduct research on various road structures designed to operate in the Arctic zones at PS.

KEYWORDS: arctic zones, joint thermohydronechanical calculation, finite element method, freezing – thawing of soil, permafrost soils, thermal insulation plates, embankments of highways, Plaxis 2D software package

FOR CITATION: Demiyannushko I.V., Stain V.M., Karpov I.A., Abramnikov P.M. Finite element models for the thermohydronechanical analysis of road embankments in areas with permafrost soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):512-527. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.512-527 (rus.).

Corresponding author: Valery M. Stain, vamis@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В практике проектирования автомобильных дорог (АД) в районах вечной мерзлоты принят так называемый первый принцип проектирования — обеспечение термоизоляции многолетнемерзлых слоев при колебаниях температуры. В настоящее время одним из эффективных методов сохранения мерзлоты в основании дорожной насыпи с температурой не выше $-3,0$ °С на весь период эксплуатации сооружения (рис. 1) является, в частности, устройство теплоизоляционных слоев из экструзивного пенополистирола (XPS) в конструкциях земляного полотна АД на участках распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ)^{1,2,3}.

Чтобы обеспечить нормативные требования к прочности и деформациям дорожного покрытия в районах ММГ на этапе проектирования следует выполнить совместный расчет трех физических полей — термического, гидравлического и механи-

ческого, т.е. совместный комплексный термогидромеханический (ТГМ) расчет.

Расчет промерзания и оттаивания грунтов представляет собой сложную геотехническую задачу, требующую одновременного анализа термических, гидрологических и механических характеристик грунтов. Данный факт делает необходимым использование численных методов для углубленного анализа процессов замораживания – оттаивания грунтов, поскольку полевые исследования и лабораторные испытания недостаточно информативны, в первую очередь, из-за их локальности.

Для выполнения ТГМ был применен широко используемый для строительных расчетов конечно-элементный (КЭ) пакет Plaxis 2D⁴. Программный комплекс Plaxis 2D имеет сертификат Госстандарта России, удостоверяющий соответствие осуществляемых с его помощью геотехнических расчетов требованиям нормативных документов. При рассмотрении замораживания – размораживания грунтов применялась модель поведения мерзлого и незамерзшего грунтов, разработанная в Норвежском университете науки и технологий (NTNU) [1], которая доступна в виде пользовательской модели в общей геотехнической программе КЭ Plaxis 2D. Модель NTNU может воспроизводить многие свойства мерзлых грунтов, включая морозное пучение и осадку при оттаивании.

¹ ОДМ 218.2.094–2018. Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов. М. : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2020. 50 с.

² Теплоизоляция дорожных конструкций на многолетнемерзлых грунтах // ПЕНОПЛЭКС. URL: <https://www.penoplex.ru/systems/sistema-teploizolyatsii-na-mnogoletnemerzlykh-gruntakh-mmgi/>

³ Ланько С.В., Бояринцев А.В. Системы термостабилизации вечномерзлых грунтов. URL: https://vk.com/@geotech_spbgasu-sistema-termostabilizacii-vechnomerzlykh-gruntov

⁴ Bentley Systems, Inc. PLAXIS 2D 2024.2: Scientific Manual. 2024. URL: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0108423

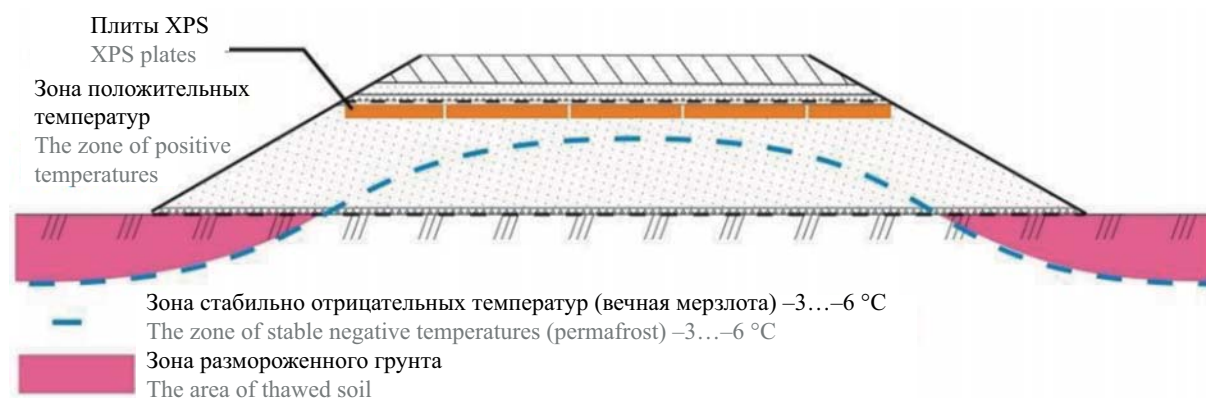


Рис. 1. Положение фронта замороженного грунта в теле насыпи для АД (пунктирная линия) при обеспечении первого принципа проектирования²

Fig. 1. Front position of the frozen ground in the body of the embankment for road (dotted line) under the first design principle²

Подробное описание этой модели, а также методы определения соответствующих ей параметров можно найти в работах⁵ [1–19].

Проблема совместного ТГМ расчета оснований различного вида сооружений в районах ММГ анализировалась также в публикациях [20–39].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

КЭ модели грунтовой насыпи для дорожной насыпи в районах с ММГ. В качестве объекта для КЭ моделирования насыпи использовали типовую расчетную схему, которая приведена в исследованиях по применению термоизолирующих плит XPS⁶ (рис. 2).

⁵ Ghoreishian Amiri S.A., Grimstad G., Aukenhaller M., Panagoulas S., Brinkgreve R.B.J., Haxaire A. The Frozen and Unfrozen Soil Model Manual. Delft : PLAXIS bv (Bentley Systems), 2016. Руководство пользователя UDSM (модель «замороженный/незамороженный грунт») для PLAXIS. URL: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0108737

⁶ Моделирование величины оттаивания насыпи для профиля ПК 365+66 (с применением плит ПЕНОПЛЭКС 50 мм, I принцип проектирования) // ПЕНОПЛЭКС.

Создадим КЭ модели для правой половины этой расчетной схемы (рис. 2). Рассмотрим следующие варианты КЭ модели:

- грунтовая насыпь в соответствии с рис. 2 без теплоизолирующих плит XPS;
- грунтовая насыпь с теплоизолирующими плитами XPS, расположенными в соответствии с рис. 2;
- грунтовая насыпь с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной в середине высоты насыпи;
- грунтовая насыпь с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи.

Согласно правилам проектирования насыпи АД в районах с ММГ по принципу 1, в данной работе рассматривался только процесс размораживания насыпи и ее основания. При этом температура воздуха изменялась в течение четырех месяцев с мая по август в соответствии с графиком, изображенным на рис. 3.

Для моделирования процесса размораживания грунтов насыпи и основания использовалась упомянутая выше модель NTNU [1].

Начальное распределение температуры в конструкции насыпь – основание для всех четырех перечисленных выше КЭ моделей показано на рис. 4.

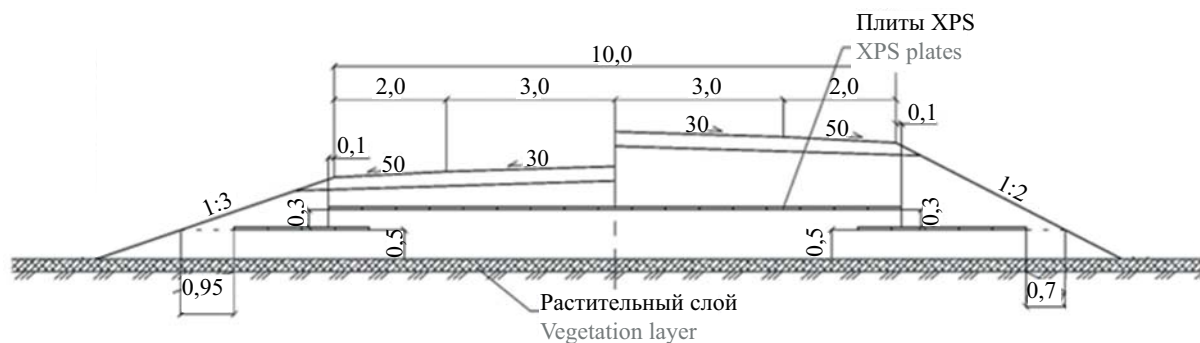


Рис. 2. Расчетная схема насыпи для АД с теплоизолирующими плитами XPS на ММГ⁶

Fig. 2. Calculation diagram of the dam for road with heat-insulating plates XPS on permafrost soil⁶

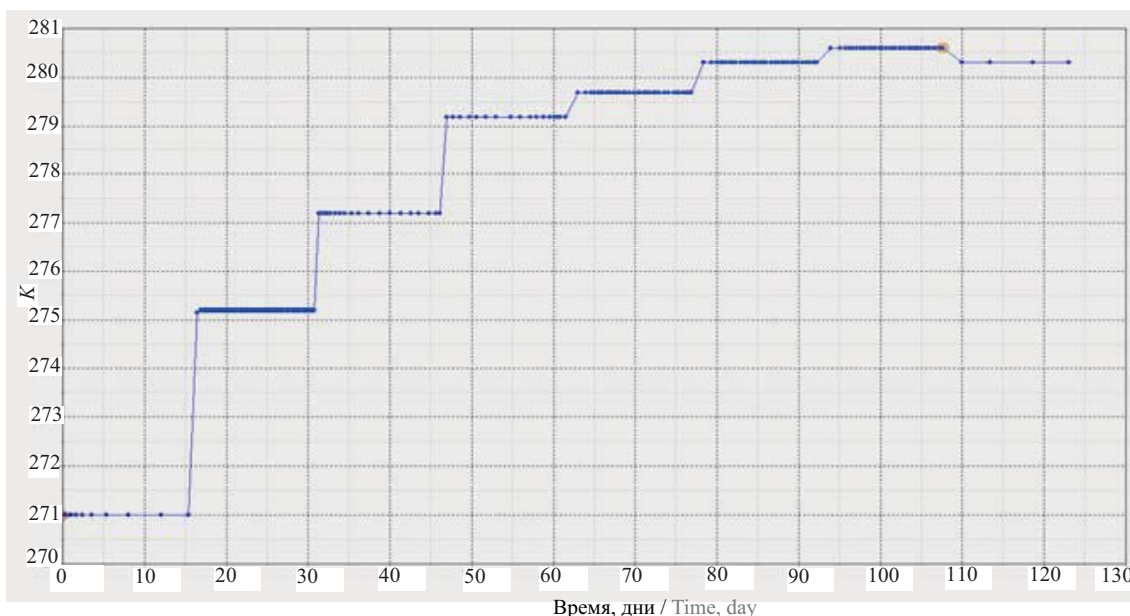


Рис. 3. График изменения температуры воздуха в течение четырех месяцев (май – август)

Fig. 3. Chart of air temperature changes over 4 months (May – August)

Ему соответствует насыщение всех пор грунта полностью замерзшей водой (рис. 5).

КЭ модель грунтовой насыпи по схеме на рис. 2 без теплоизолирующих плит XPS. Размеры модели и ее КЭ сетка показаны на рис. 6.

В результате размораживания конструкции насыпь – основание в течение четырех месяцев в соответствии с графиком изменения температуры воздуха (рис. 3) возникли деформации конструкции, фрагмент которых изображен на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что в насыпи появились преимущественно деформации осадки, максимальная величина которых составляет для данной конструкции 6,774 мм. Фрагменты распределения температуры для этого случая показаны на рис. 8, 9.

Из рис. 8 и 9 видно, что изолиния $F = 270$ K ($-3,0$ °C), ниже которой вода в порах грунта полностью заморожена, проходит внутри насыпи на высоте 0,2 м, а ширина области, расположенной ниже этой кривой, равна 4,2 м.

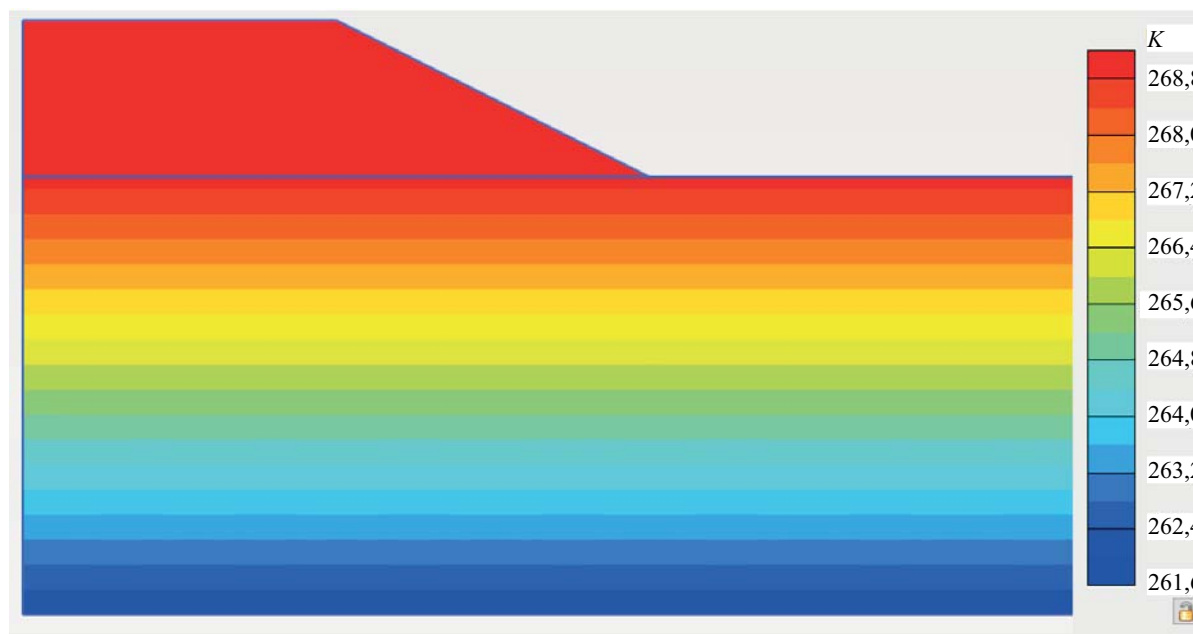


Рис. 4. Распределение температуры в конструкции насыпь – основание в начальный момент времени

Fig. 4. Temperature distribution in the structure of the ground – base at the initial time

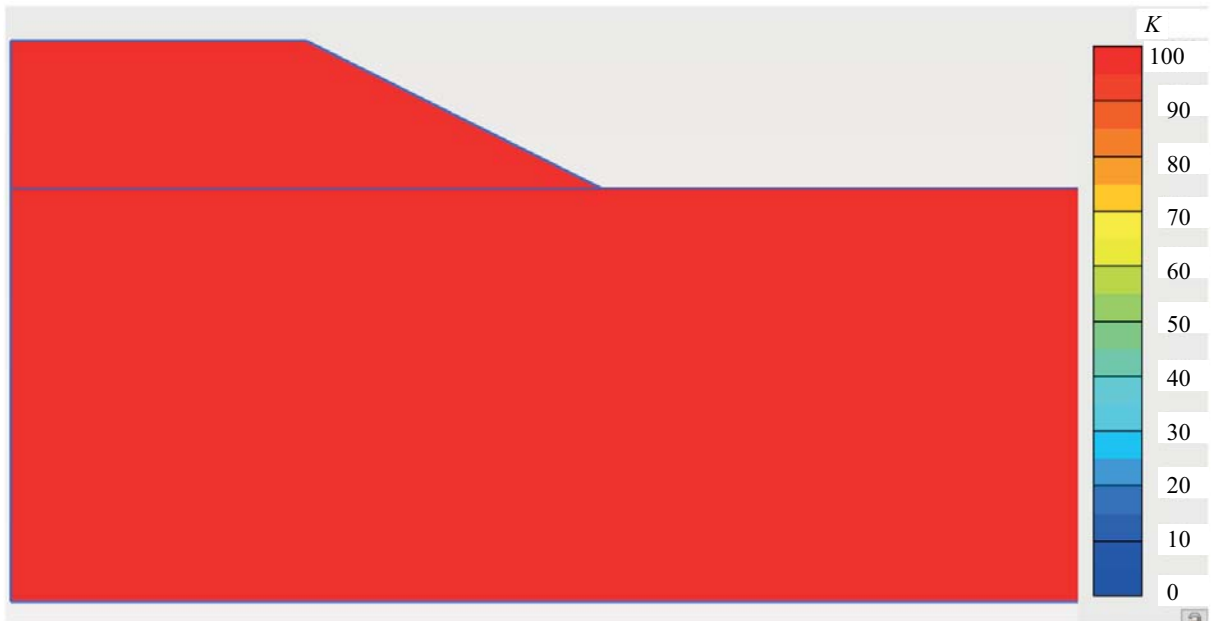


Рис. 5. Распределение насыщения пор грунта полностью замерзшей водой в начальный момент времени

Fig. 5. Distribution of pore saturation of fully frozen water at the initial time

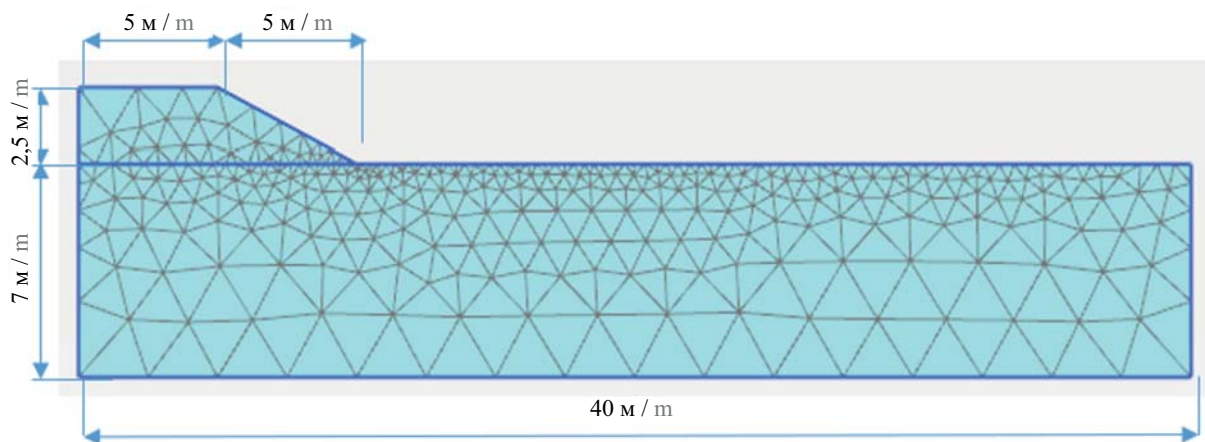


Рис. 6. Размеры и КЭ сетка для насыпи АД без теплоизолирующих плит XPS на ММГ

Fig. 6. Dimensions and FE mesh for road embankment without heat-insulating plates XPS on permafrost soil

С точки зрения желательных размеров зоны стабильно отрицательных температур ($-3 \dots -60 \text{ }^\circ\text{C}$), в соответствии с рис. 1, этих размеров явно недостаточно. Очевидно, таким образом, что рассмотренная конструкция насыпи требует использования в ней теплоизолирующих слоев плит XPS.

Грунтовая насыпь с теплоизолирующими плитами XPS, расположенными в соответствии со схемой (рис. 2). КЭ сетка для насыпи АД с теплоизолирующими плитами XPS, расположенными в соответствии с проектом, изображенным на рис. 2, показана на рис. 10.

Проведенные расчеты показали, что в результате размораживания конструкции насыпь-основание в течение четырех месяцев, в соответствии с графиком изменения температуры воздуха (рис. 3), воз-

никли деформации конструкции, фрагмент которых приведен на рис. 11.

Из рис. 11 следует, что в насыпи возникли преимущественно деформации осадки, максимальная величина которых составила 6,635 мм. Фрагменты распределения температуры для этого случая показаны на рис. 12, 13.

Из рис. 12 и 13 видно, что изолиния $F = 270 \text{ K}$ ($-3,0 \text{ }^\circ\text{C}$), ниже которой вода в порах грунта полностью заморожена, проходит внутри насыпи на высоте 0,83 м, а ширина области, расположенной ниже этой кривой, равна 6,2 м.

С точки зрения желательных размеров зоны стабильно отрицательных температур ($-3 \dots -60 \text{ }^\circ\text{C}$) в соответствии с рис. 1 такие размеры можно считать удовлетворительными. В дальнейшем исследо-

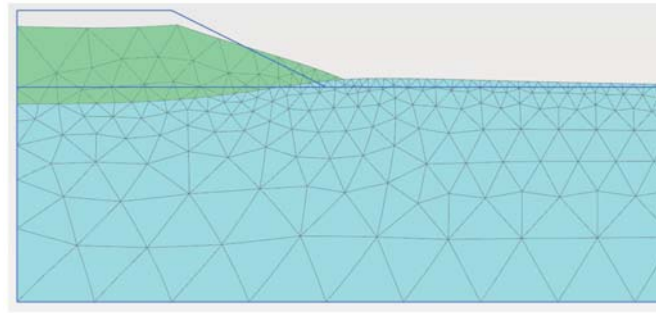


Рис. 7. Фрагмент деформации конструкции насыпь – основание (синие сплошные линии отображают недеформированное состояние конструкции, деформации для наглядности увеличены в 100 раз)

Fig. 7. A deformations fragment of the dam – base construction (blue continuous lines show the unformed state of the structure, the deformations are increased by 100 times for visualization)

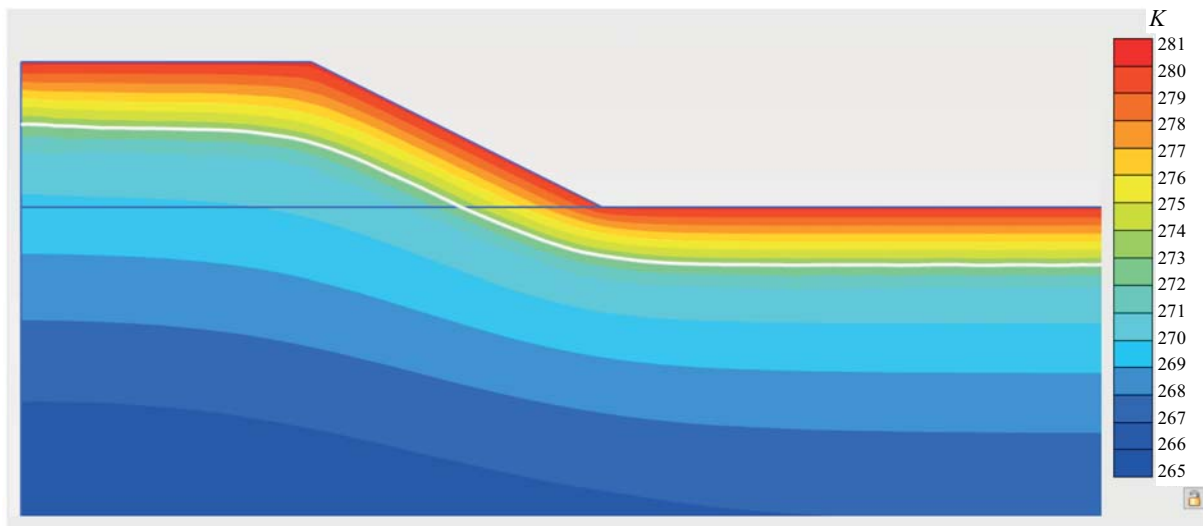


Рис. 8. Фрагмент распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания

Fig. 8. Fragment of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting

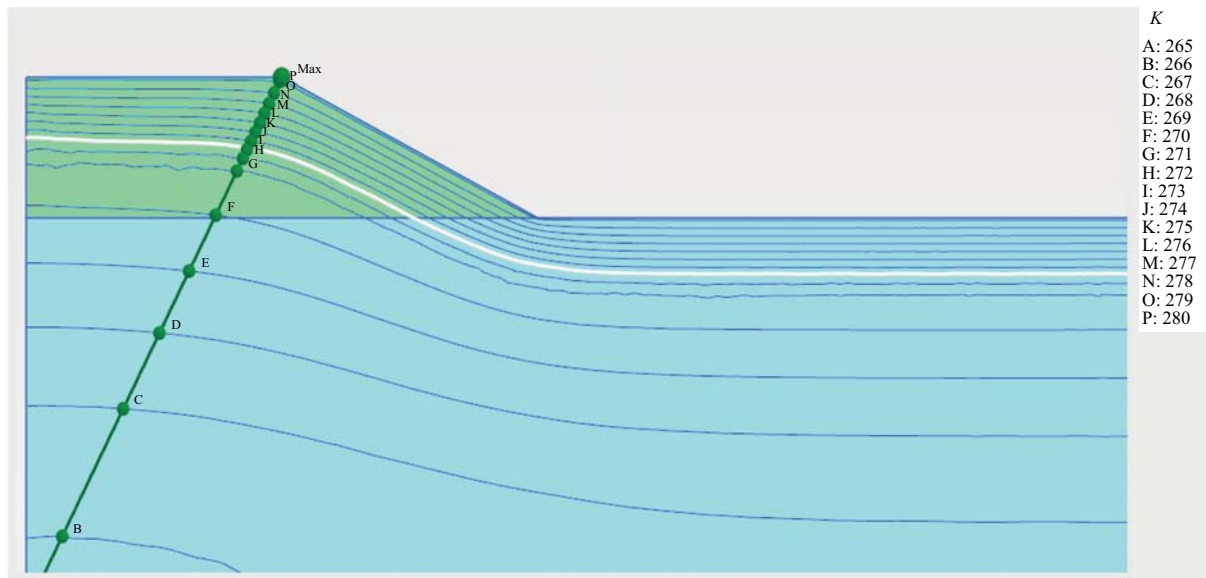


Рис. 9. Изолинии распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания (белая линия соответствует 0 °С или 273 К)

Fig. 9. Insulation of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting (white line corresponds to 0 °C or 273 K)

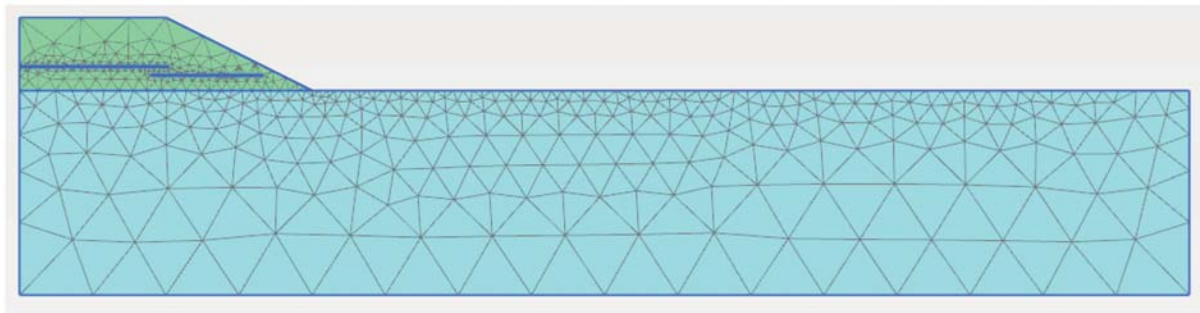


Рис. 10. КЭ сетка для насыпи АД с теплоизолирующими плитами XPS, расположенными в соответствии с проектом, изображенным на рис. 2

Fig. 10. FE road embankment mesh with heat-insulating plates XPS, arranged according to the design shown in Fig. 2

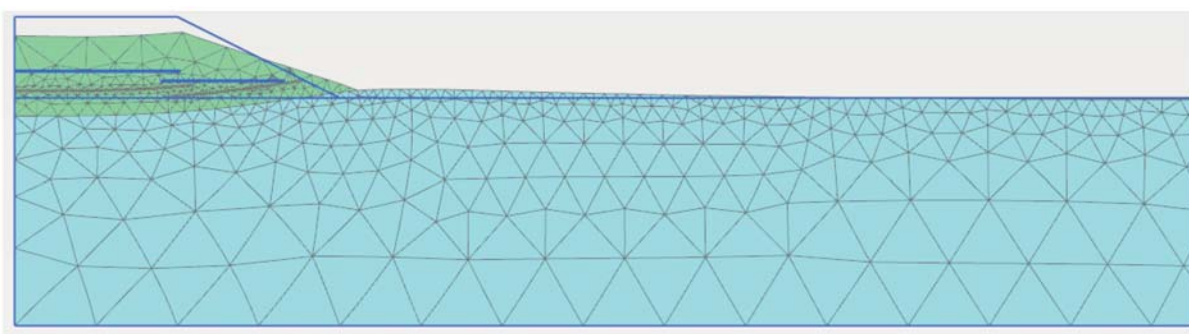


Рис. 11. Фрагмент деформации конструкции насыпь – основание (деформации для наглядности увеличены в 100 раз)

Fig. 11. A section showing the deformation of the dam – base construction (deformations for illustration are increased by 100 times)

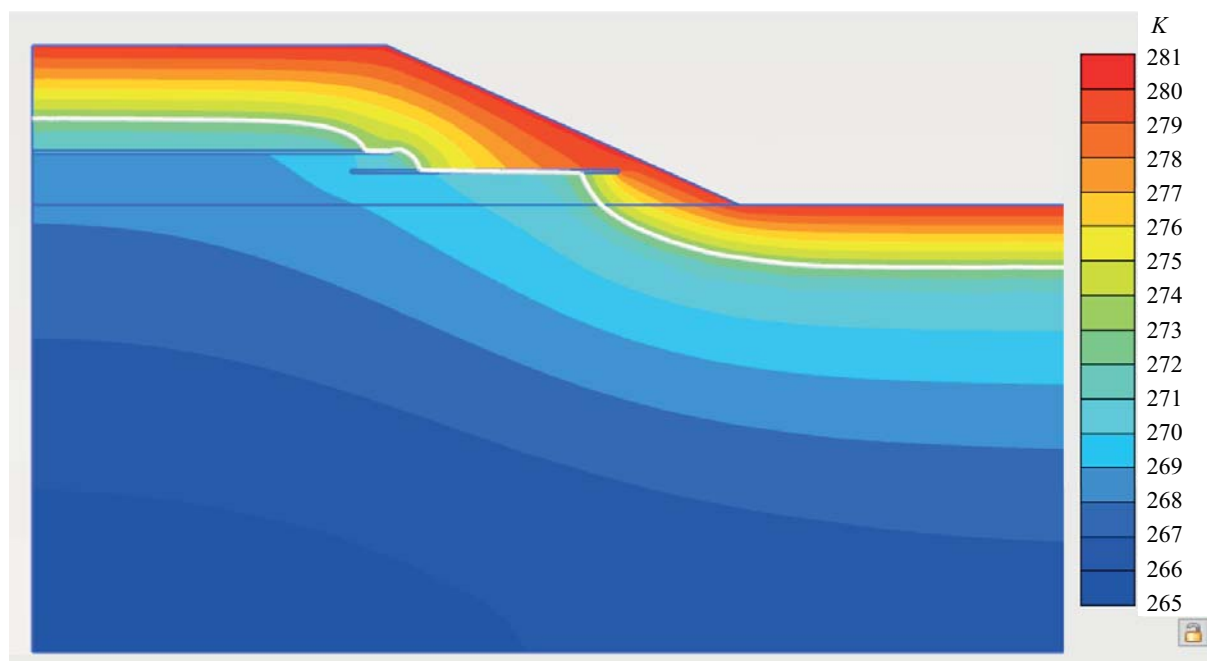


Рис. 12. Фрагмент распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания

Fig. 12. Fragment of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting

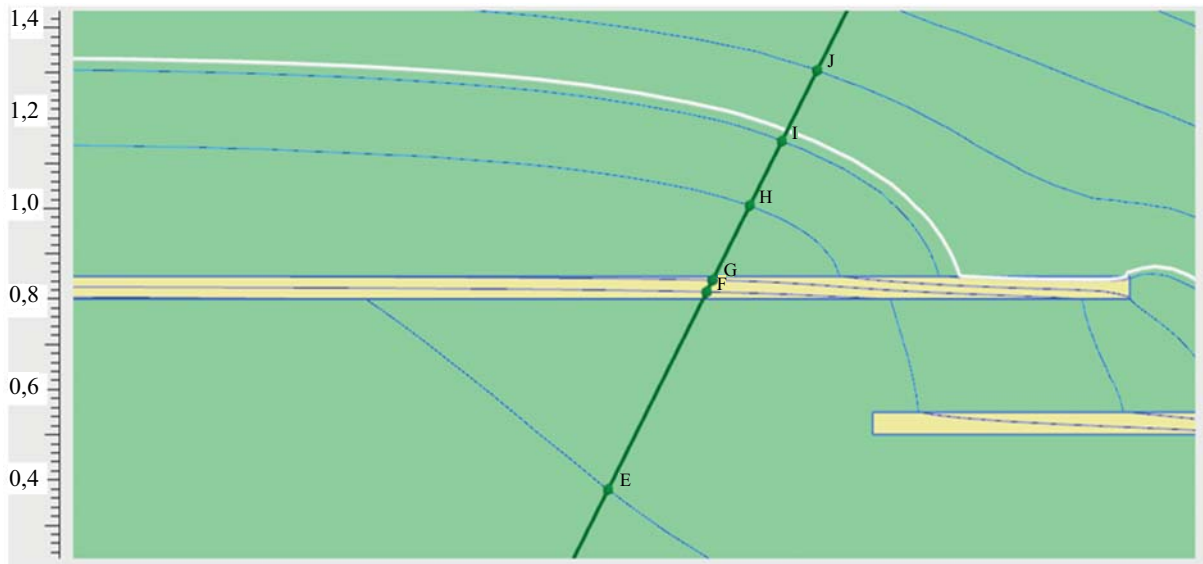


Рис. 13. Изолинии распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания (белая линия соответствует 0 °С или 273 К)

Fig. 13. Insulation of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting (white line corresponds to 0 °С or 273 К)

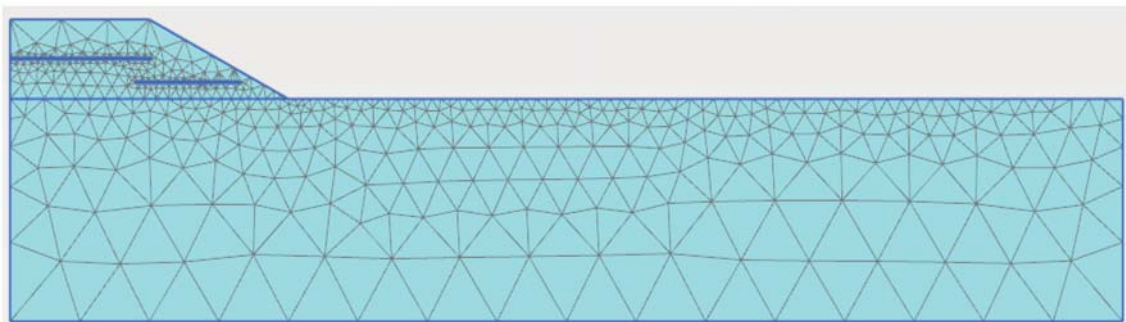


Рис. 14. КЭ сетка для насыпи АД с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной в середине высоты насыпи

Fig. 14. FE embankment mesh of the road with top insulation board XPS, located in the middle of the embankment height

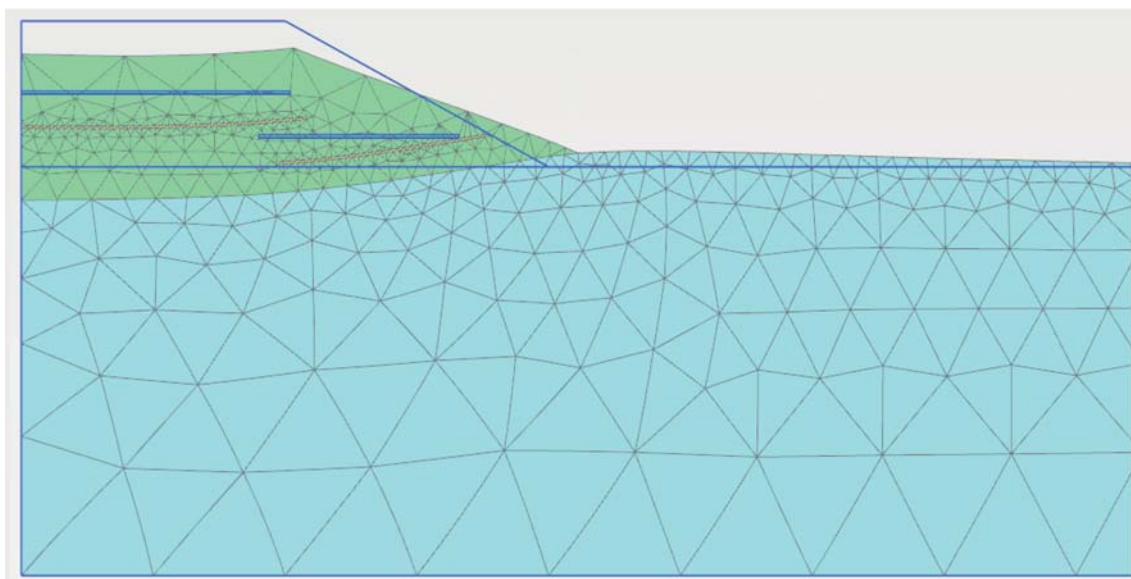


Рис. 15. Фрагмент деформации конструкции насыпь – основание (деформации для наглядности увеличены в 100 раз)

Fig. 15. A section showing the deformation of the dam – base construction (deformations for illustration are increased by 100 times)

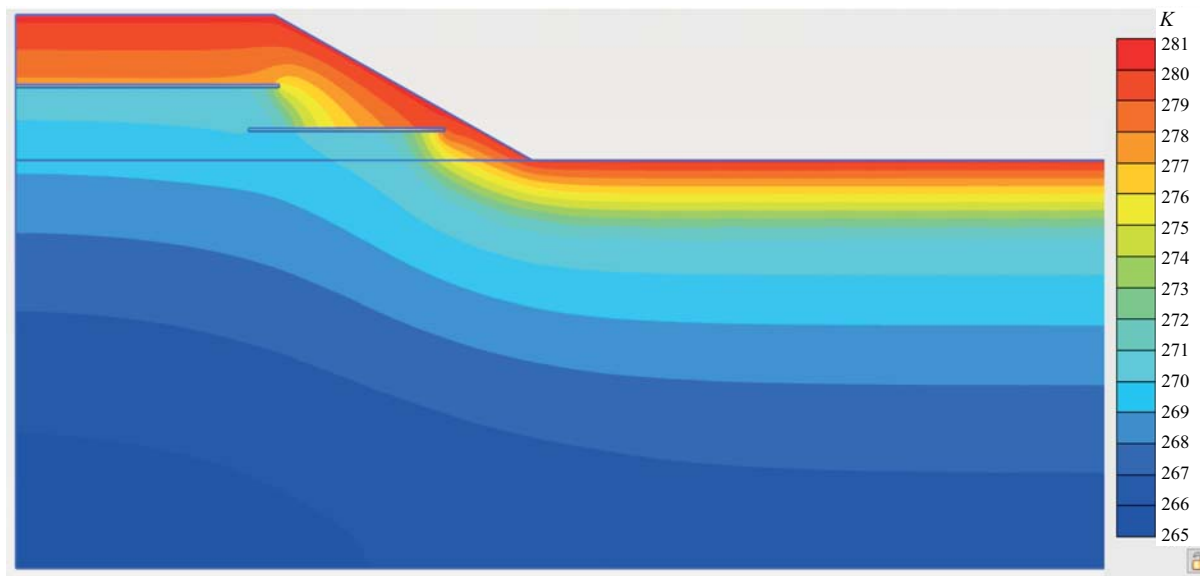


Рис. 16. Фрагмент распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания
 Fig. 16. Fragment of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting

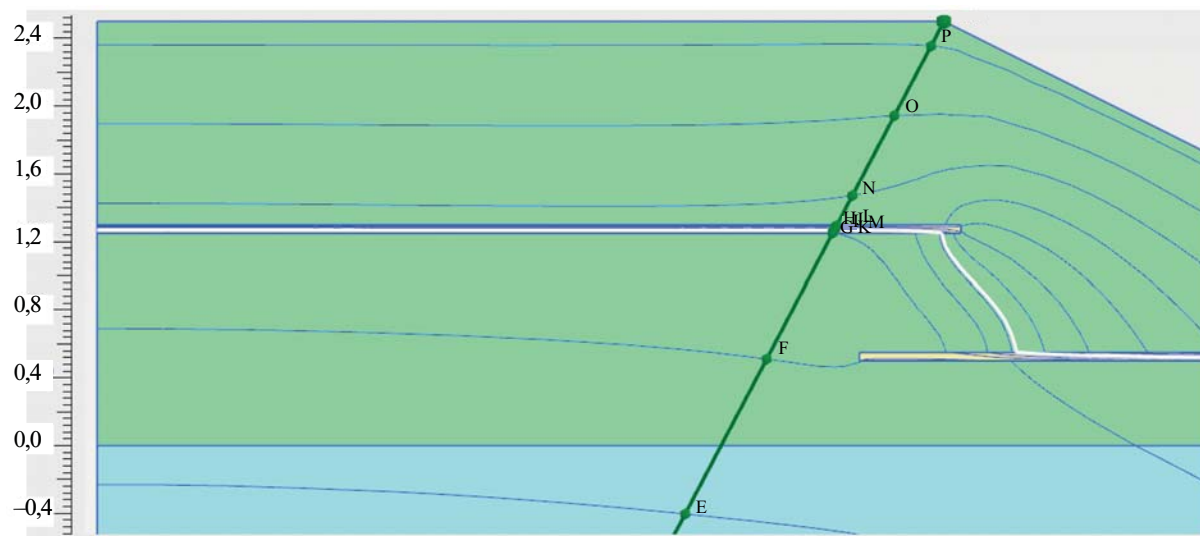


Рис. 17. Изолинии распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания (белая линия соответствует 0 °С или 273 К)

Fig. 17. Isotherms of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting (white line corresponds to 0 °C or 273 K)

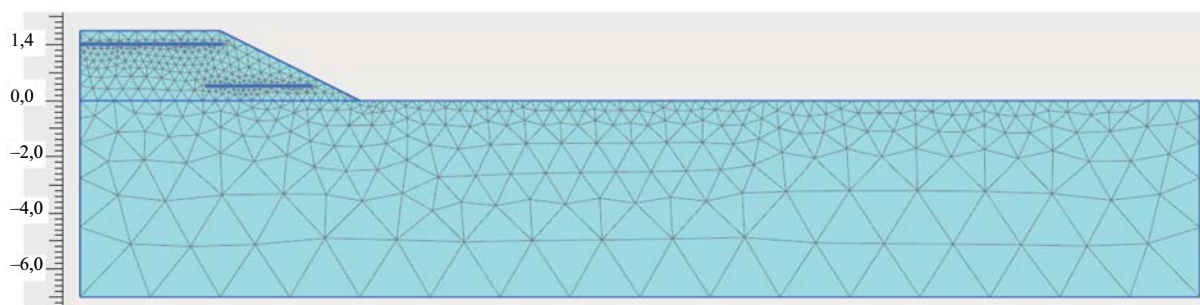


Рис. 18. КЭ сетка для насыпи АД с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи

Fig. 18. FE road embankment Mesh с Top XPS Heat Insulation Board 0.5 m from the top edge of the embankment

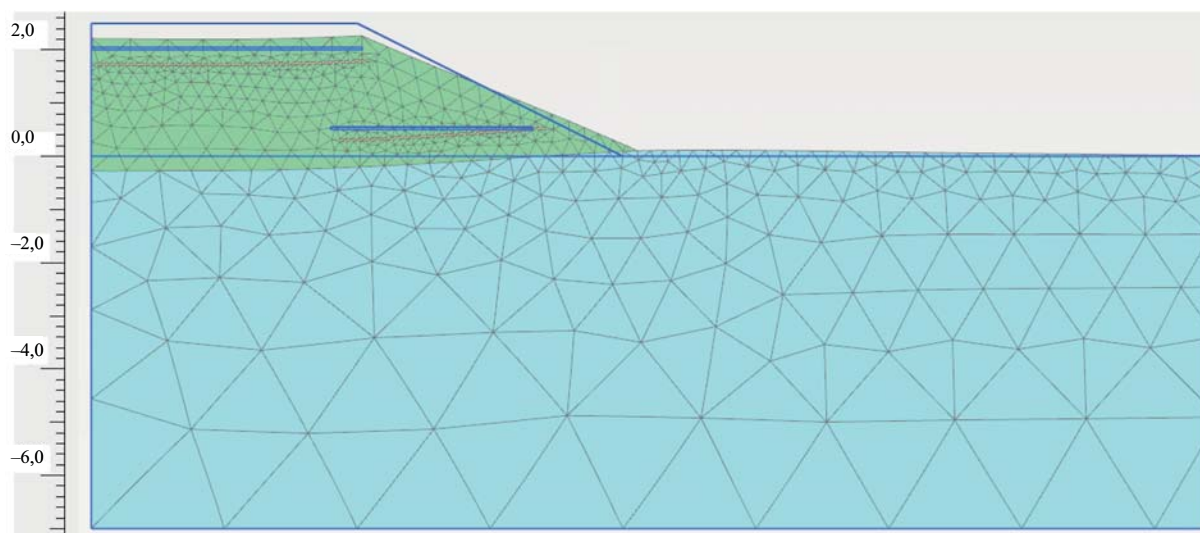


Рис. 19. Фрагмент деформации конструкции насыпь – основание (деформации для наглядности увеличены в 50 раз)

Fig. 19. A section showing deformation of the dam – base construction (deformations for illustration are increased by 50 times)

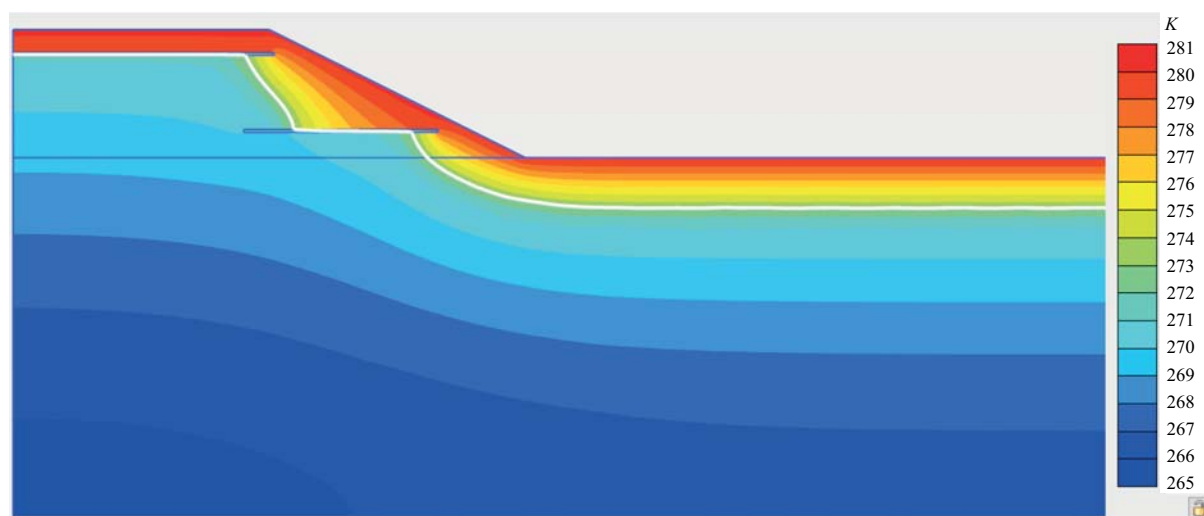


Рис. 20. Фрагмент распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания

Fig. 20. Fragment of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting

вании авторы попытались увеличить эффективность рассмотренной теплоизоляции. С этой целью перенесли верхний слой плит XPS в середину высоты насыпи, т.е. на высоту 1,25 м от ее основания.

Грунтовая насыпь с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной в середине высоты насыпи. КЭ сетка для насыпи АД с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной в середине высоты насыпи, представлена на рис. 14.

В результате размораживания конструкции насыпь – основание в течение четырех месяцев в соответствии с графиком изменения температуры воздуха (рис. 3) появились деформации этой конструкции, фрагмент которых показан на рис. 15.

Из рис. 15 следует, что в насыпи данной конструкции также возникли преимущественно дефор-

мации осадки, максимальная величина которых составляет 6,646 мм.

Фрагменты распределения температуры для этого случая приведены на рис. 16, 17.

Из рис. 16 и 17 видно, что изолиния $F = 270$ К ($-3,0$ °С), ниже которой вода в порах грунта полностью заморожена, проходит внутри насыпи на высоте 0,68 м, а ширина области, расположенной ниже этой кривой, равна 6,2 м.

В этом случае область с полностью замороженным грунтом имеет меньшую высоту при одинаковой ширине, чем в случае расположения верхней плиты XPS в соответствии с проектом (рис. 2). То есть эффективность теплоизоляции при переносе плиты в середину насыпи ухудшилась. Далее авторы попытались увеличить эффективность теплоизоляции,

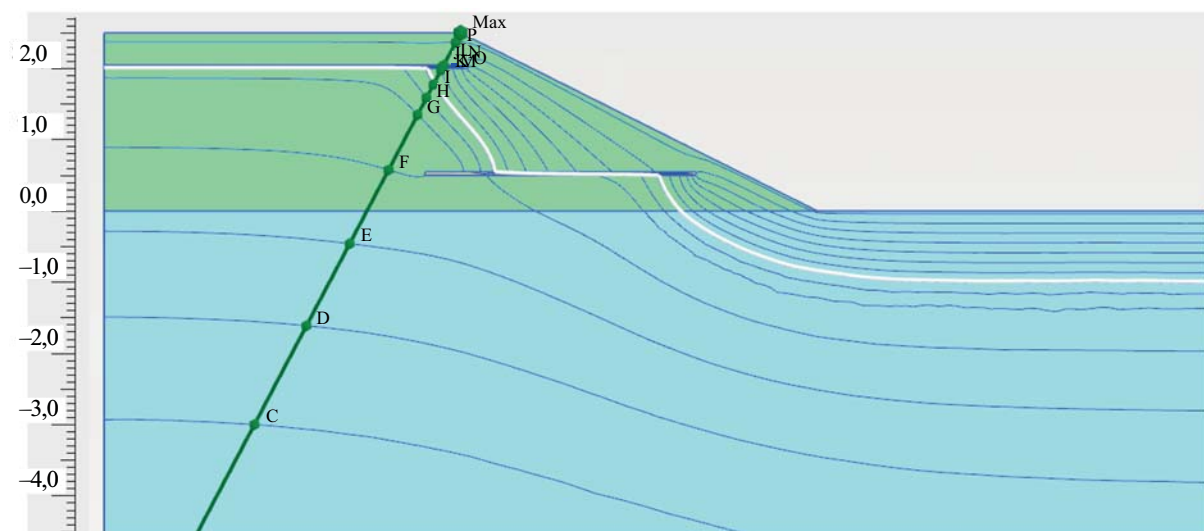


Рис. 21. Изолинии распределения температуры в конструкции насыпь – основание через 123 дня размораживания (белая линия соответствует 0 °C или 273 K)

Fig. 21. Insulation of temperature distribution in the dam – base structure after 123 days of defrosting (white line corresponds to 0 °C or 273 K)

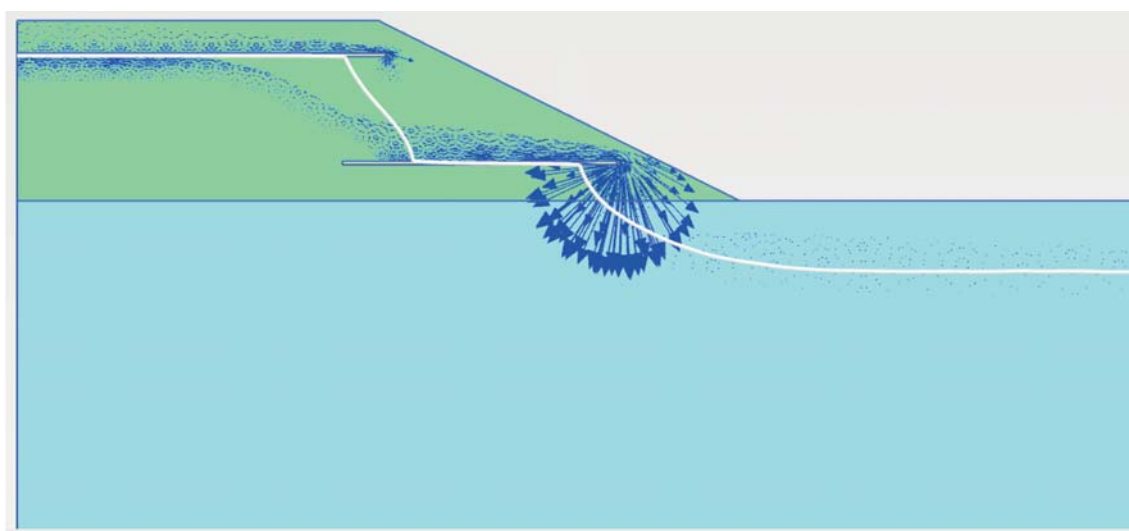


Рис. 22. Поле скоростей фильтрации воды в конце процесса размораживания конструкции насыпь – основание

Fig. 22. The field of water filtration rates at the end of the defrosting process of the embankment – base structure

расположив верхний слой плит XPS на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи.

Грунтовая насыпь с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи. КЭ сетка для насыпи АД с верхней теплоизолирующей плитой XPS, расположенной на расстоянии 0,5 м от верхней грани насыпи, показана на рис. 18.

В результате размораживания конструкции насыпь – основание в течение четырех месяцев в соответствии с графиком изменения температуры воздуха (рис. 3) возникли деформации конструкции, фрагмент которых изображен на рис. 19.

Из рис. 19 следует, что в насыпи появились преимущественно деформации осадки, максимальная величина которых составляет 6,654 мм. Фрагменты

распределения температуры для этого случая показаны на рис. 20 и 21.

Из рис. 20 и 21 следует, что изолиния $F = 270 \text{ K}$ ($-3 \text{ }^\circ\text{C}$), ниже которой вода в порах грунта полностью заморожена, проходит внутри насыпи на высоте 0,9 м, что на 0,07 м больше, чем в проектном решении (рис. 2), а ширина области, расположенной ниже этой кривой, равнялась 6,2 м, что совпадало с проектным решением.

Последний вариант расположения верхней плиты XPS оказался наиболее эффективным с точки зрения сохранения грунта в теле насыпи в замороженном состоянии.

Для демонстрации возможностей разработанных КЭ моделей покажем также (для последнего варианта расположения плит XPS в теле насыпи)

поле скоростей фильтрации воды в конце процесса размораживания конструкции насыпь – основание (рис. 22).

Отметим, что в соответствии с рис. 22 максимальные скорости фильтрации воды возникают на правом конце нижней плиты XPS и составляют 0,282 м/сут.

Определение полей скоростей фильтрации представляет интерес для оценки устойчивости откосов и прогнозирования риска внутренней эрозии грунта (суффозии). Локальные потоки способны вызывать вымывание мелких частиц грунта, что приводит к ослаблению его структуры и может стать причиной неравномерных осадков и снижения общей стабильности сооружения. Таким образом, рассмотренная возможность КЭ моделирования является важным инструментом для проектирования защитных и дренажных мероприятий в конструкции земляного полотна в сложных условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представлены результаты проведенных исследований, на основе которых разработаны рекомендуемые КЭ модели для совместного ТГМ расчета насыпей автомобильных дорог в районах ММГ. На конкретных примерах показано, что эти модели позволяют, в частности, определить оптимальное рас-

положение в теле насыпи используемых для термоизоляции слоев ММГ теплоизолирующих плит XPS. Данные КЭ модели дают возможность также изучать поля деформаций и поля скоростей фильтрации воды в процессе размораживания конструкции насыпь – основание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показаны возможности разработки КЭ моделей для совместного термогидромеханического расчета насыпей АД в районах многолетнемерзлых грунтов с использованием пакета программ Plaxis 2D.

На конкретных примерах продемонстрировано, что эти модели позволяют, в частности, определить оптимальную конструкцию насыпи автодороги в районах вечной мерзлоты при наличии ММГ и использовании для термостабилизации теплоизолирующих плит типа XPS в теле насыпи.

Проведенные исследования на разработанных КЭ моделях показали, что эти модели позволяют также изучать поля деформаций и поля скоростей фильтрации воды в процессе размораживания конструкции насыпь – основание, что дает возможность выполнения исследований различных дорожных конструкций, проектируемых для работы в арктических зонах на ММГ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Aukenthaler M.* The Frozen & Unfrozen Barcelona Basic Model: A Verification and Validation of a New Constitutive Model : MSc thesis. Delft : Delft University of Technology, 2016.
2. *Ghoreishian Amiri S.A., Grimstad G., Kadiravar M., Nordal S.* Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils // Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 53. Issue 10. Pp. 1646–1657. DOI: 10.1139/cgj-2015-0467
3. *Aukenthaler M., Brinkgreve R.B.J., Haxaire A.* A practical approach to obtain the soil freezing characteristic curve and the freezing/melting point of a soil-water system // Proceedings of the GeoVancouver 2016: the 69th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, Canada. 2016. Pp. 397–404.
4. *Tuohino M., Solowski W., Abed A., Koivisto K., Lei X.* Application of the Frozen and Unfrozen Soil model to modelling effects of freeze-thaw on low-volume roads // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 710. P. 012067. DOI: 10.1088/1755-1315/710/1/012067
5. *Aukenthaler M., Brinkgreve R.B.J.* Application of a Thermo-hydro-mechanical Model for Freezing and Thawing // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. Pp. 74–81. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.156
6. *Rostami H.* Finite element analysis of coupled thermo-hydro-mechanical processes in fully saturated, partially frozen soils. 2017. 103 p.
7. *Lyu C., Nishimura S., Ghoreishian Amiri S.A., Zhu F., Eiksund G.R., Grimstad G.* Pore-water pressure development in a frozen saline clay under isotropic loading and undrained shearing // Acta Geotechnica. 2021. Vol. 16. Issue 12. Pp. 3831–3847. DOI: 10.1007/s11440-021-01338-y. EDN JDTCNY.
8. *Li K.-Q., Yin Z.-Y.* State of the Art of Coupled Thermo–hydro–Mechanical–Chemical Modelling for Frozen Soils // Archives of Computational Methods in Engineering. 2025. Vol. 32. Issue 2. Pp. 1039–1096. DOI: 10.1007/s11831-024-10164-w. EDN XCWVXH.
9. *Nishimura S.* A model for freeze-thaw-induced plastic volume changes in saturated clays // Soils and Foundations. 2021. Vol. 61. Issue 4. Pp. 1054–1070. DOI: 10.1016/j.sandf.2021.05.008. EDN XCWVXH.
10. *Lu Y., Liu S., Alonso E., Wang L., Xu L., Li Z.* Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles // Cold Regions Science and Technology. 2019. Vol. 157. Pp. 206–214. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.10.008
11. *Nishimura S., Okajima S., Joshi B.R., Higo Y., Tokoro T.* Volumetric behaviour of clays under freeze–thaw cycles in a mesoscopically uniform element //

Géotechnique. 2021. Vol. 71. Issue 12. Pp. 1150–1164. DOI: 10.1680/jgeot.20.p.047. EDN MZOSD.

12. Zheng H., Kanie S., Akagawa S. A method for obtaining radial stress in the freezing direction in frozen soil samples // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 169. P. 102899. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102899. EDN KJCYAL

13. Cui W., Potts D.M., Zdravkovic L., Gawecka K.A., Taborda D.M.G. An alternative coupled thermo-hydro-mechanical finite element formulation for fully saturated soils // Computers and Geotechnics. 2018. Vol. 94. Pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.08.011

14. Nishimura S., Liang M., Lyu C. Analysis of freezing and thawing processes in clay with freeze-induced compression (FIC) model // Soils and Foundations. 2025. Vol. 65. Issue 1. P. 101559. DOI: 10.1016/j.sandf.2024.101559. EDN RYADWR.

15. Yamazoe N., Tanaka H., Hayashi H., Nishimura S. A rational design approach to peat ground improvement by vertical drains // Soils and Foundations. 2020. Vol. 60. Issue 6. Pp. 1387–1404. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.08.009. EDN IXMETU.

16. Nishimura S., Wang J. A simple framework for describing strength of saturated frozen soils as multi-phase coupled system // Géotechnique. 2019. Vol. 69. Issue 8. Pp. 659–671. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.104

17. Dalla Santa G., Cola S., Secco M., Tateo F., Sassi R., Galgaro A. Multiscale analysis of freeze–thaw effects induced by ground heat exchangers on permeability of silty clays // Géotechnique. 2019. Vol. 69. Issue 2. Pp. 95–105. DOI: 10.1680/jgeot.16.p.313

18. Shastri A., Sánchez M., Gai X., Lee M.Y., Dewers T. Mechanical behavior of frozen soils: Experimental investigation and numerical modeling // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 138. P. 104361. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104361. EDN OTDJFK.

19. Li Q., Zhang D., Li P., Cui K., Jing X. The small-strain stiffness of frozen clay soils at different temperatures and initial water contents: Experimental study and predicted model // Cold Regions Science and Technology. 2023. Vol. 215. P. 103986. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103986. EDN WSFZPO.

20. Желнин М.С., Костина А.А., Прохоров А.Е., Плехов О.А., Семин М.А., Агутин К.А. Верификация термогидромеханической модели промерзания влагонасыщенного грунта на основе лабораторных экспериментов // Вычислительная механика сплошных сред. 2021. Т. 14. № 2. С. 144–158. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.2.12. EDN TJUNGV.

21. Ретина П.И., Сахаров И.И., Фадеев А.Б. Численное моделирование процессов промерзания и пучения в системе «фундамент основание» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1994. № 5. С. 6–9.

22. Шашкин К.Г. Использование структуры универсального конечного элемента при разработ-

ке моделей в рамках программы «FEM models» // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2000. № 2. С. 26–32.

23. Сахаров И.И., Парамонов М.В. Численная оценка влияния морозного пучения на НДС укрепленных стен котлованов // Численные методы расчетов в практике геотехники : сб. тр. науч.-техн. конф. 2012. С. 159–164.

24. Максимов И.А., Максимова А.Г. Прогноз искусственного оттаивания вечномерзлых грунтов в основаниях гидротехнических сооружений // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л. : Энергоатомиздат, 1988. С. 111–118.

25. Kudriavtsev S.A. Numerical investigations of the thermophysical processes in seasonally freezing soils // Kriosfera Zemli. 2003. Vol. 7. Issue 4. Pp. 76–81. EDN MPPZAH.

26. Карлов В.Д. Принципы проектирования фундаментов при использовании в основаниях сооружений сезоннопромерзающих грунтов // Геотехника. Наука и практика : сб. науч. тр. 2000. С. 15–24.

27. Ашпиз Е.С., Вавринюк Т.С. Усиление деформирующихся длительно эксплуатируемых насыпей на многолетнемерзлом основании // Политранспортные системы : мат. IX Междунар. науч.-техн. конф. 2017. С. 86–90. EDN ZWVQJL.

28. Чжан А.А., Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н., Шестернев Д.М. Новый способ защиты мерзлых грунтов основания насыпи от оттаивания // Журнал «Путь и путевое хозяйство». 2018. № 1. С. 6–9.

29. Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н. Предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей для условий строительства линии Салехард – Надым // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. Чтения, посвящ. памяти профессора Г.М. Шахунянца. 2019. С. 49–54.

30. Ашпиз Е.С., Вавринюк Т.С. Защитные слои земляного полотна для условий северного широтного хода // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. Чтения, посвящ. памяти профессора Г.М. Шахунянца. 2019. С. 96–99.

31. Ашпиз Е.С. Земляное полотно в условиях многолетнемерзлых грунтов Северного широтного хода // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 3. С. 22–25. EDN PVTRAW.

32. Пассек В.В., Величко В.П., Герасимов В.А. Тепловое и напряженно-деформированное состояние насыпи в зоне водопропускной трубы на вечной мерзлоте // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 11. С. 8–13. EDN VBCKYL.

33. Пассек В.В., Пасков М.В., Андреев В.С. Возведение насыпей в сложных мерзлотно-грунтовых условиях при наличии погребенных льдов и льдогрунтов заполярной и приполярной тундры // Нефть и газ

Западной Сибири : мат. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения Косухина Анатолия Николаевича. 2015. С. 270–275. EDN UNJFCP.

34. Кудрявцев С.А., Кажарский А.В. Численное моделирование процесса морозного пучения и оттаивания в зависимости от скорости промерзания грунтов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 105–110. EDN PCGRPJ.

35. 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. EDN FKKNWQ.

36. Прохоров А.Е., Желнин М.С., Костина А.А., Плехов О.А. Исследование особенностей неравновесного фазового перехода во флюидонасыщенном грунте // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. Т. 4 (42). С. 31–37. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-4-31-37. EDN VQRDBQ.

37. Желнин М.С., Прохоров А.Е., Костина А.А., Плехов О.А. Экспериментальное и теоретическое исследование механических деформаций в промерзающем влагонасыщенном грунте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 4. С. 19–28. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.02. EDN UOASYG.

38. Белозеров А.Г., Семенов Е.В., Бабакин Б.С. Математическое моделирование процесса промерзания грунта на основе данных опытных наблюдений // Вестник Международной академии холода. 2021. № 1. С. 102–107. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-102-107. EDN XXTTQU.

39. Трапезников А.Г., Беккер А.Т., Исаева Е.С., Цимбельман Н.Я., Чернова Т.И. Численное моделирование температурного режима грунтовой плотины мерзлого типа Анадырского гидроузла // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 1 (50). С. 81–93. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-1/81-93. EDN UFIKXG.

Поступила в редакцию 31 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 11 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Вадимовна Демьянушко** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

Валерий Михайлович Стаин — кандидат технических наук, профессор кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; SPIN-код: 1052-7044, РИНЦ ID: 968131; vamis@yandex.ru;

Илья Анатольевич Карпов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com;

Павел Михайлович Абраменков — аспирант кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 1213802, ResearcherID: OOK-2184-2025, ORCID: 0009-0005-2596-661; Tehb82@bk.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aukenthaler M. *The Frozen & Unfrozen Barcelona Basic Model: A Verification and Validation of a New Constitutive Model* : MSc thesis. Delft, Delft University of Technology, 2016.

2. Ghoreishian Amiri S.A., Grimstad G., Kadirvar M., Nordal S. Constitutive model for rate-independent behavior of saturated frozen soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 2016; 53(10):1646-1657. DOI: 10.1139/cgj-2015-0467

3. Aukenthaler M., Brinkgreve R.B. J., Haxaire A. *A practical approach to obtain the soil freezing characteristic curve and the freezing/melting point of a soil-*

water system. Proceedings of the GeoVancouver 2016: the 69th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, Canada. 2016; 397-404.

4. Tuohino M., Solowski W., Abed A., Koivisto K., Lei X. Application of the Frozen and Unfrozen Soil model to modelling effects of freeze-thaw on low-volume roads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 710:012067. DOI: 10.1088/1755-1315/710/1/012067

5. Aukenthaler M., Brinkgreve R.B.J. Application of a Thermo-hydro-mechanical Model for Freezing and Thawing. *Procedia Engineering*. 2017; 191:74-81. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.156

6. Rostami H. *Finite element analysis of coupled thermo-hydro-mechanical processes in fully saturated, partially frozen soils*. 2017; 103.
7. Lyu C., Nishimura S., Ghoreishian Amiri S.A., Zhu F., Eiksund G.R., Grimstad G. Pore-water pressure development in a frozen saline clay under isotropic loading and undrained shearing. *Acta Geotechnica*. 2021; 16(12):3831-3847. DOI: 10.1007/s11440-021-01338-y. EDN JDTCNY.
8. Li K.-Q., Yin Z.-Y. State of the Art of Coupled Thermo–hydro–Mechanical–Chemical Modelling for Frozen Soils. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2025; 32(2):1039-1096. DOI: 10.1007/s11831-024-10164-w. EDN XCWVXH.
9. Nishimura S. A model for freeze-thaw-induced plastic volume changes in saturated clays. *Soils and Foundations*. 2021; 61(4):1054-1070. DOI: 10.1016/j.sandf.2021.05.008. EDN XCWVXH.
10. Lu Y., Liu S., Alonso E., Wang L., Xu L., Li Z. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. 2019; 157:206-214. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.10.008
11. Nishimura S., Okajima S., Joshi B.R., Higo Y., Tokoro T. Volumetric behaviour of clays under freeze-thaw cycles in a mesoscopically uniform element. *Géotechnique*. 2021; 71(12):1150-1164. DOI: 10.1680/jgeot.20.p.047. EDN MZOSD.
12. Zheng H., Kanie S., Akagawa S. A method for obtaining radial stress in the freezing direction in frozen soil samples. *Cold Regions Science and Technology*. 2020; 169:102899. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102899. EDN KJCYAL.
13. Cui W., Potts D.M., Zdravkovic L., Gawicka K.A., Taborda D.M.G. An alternative coupled thermo-hydro-mechanical finite element formulation for fully saturated soils. *Computers and Geotechnics*. 2018; 94:22-30. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.08.011
14. Nishimura S., Liang M., Lyu C. Analysis of freezing and thawing processes in clay with freeze-induced compression (FIC) model. *Soils and Foundations*. 2025; 65(1):101559. DOI: 10.1016/j.sandf.2024.101559. EDN RYADWR.
15. Yamazoe N., Tanaka H., Hayashi H., Nishimura S. A rational design approach to peat ground improvement by vertical drains. *Soils and Foundations*. 2020; 60(6):1387-1404. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.08.009. EDN IXMETU.
16. Nishimura S., Wang J. A simple framework for describing strength of saturated frozen soils as multi-phase coupled system. *Géotechnique*. 2019; 69(8):659-671. DOI: 10.1680/jgeot.17.p.104
17. Dalla Santa G., Cola S., Secco M., Tateo F., Sassi R., Galgaro A. Multiscale analysis of freeze–thaw effects induced by ground heat exchangers on permeability of silty clays. *Géotechnique*. 2019; 69(2):95-105. DOI: 10.1680/jgeot.16.p.313
18. Shastri A., Sánchez M., Gai X., Lee M.Y., Dewers T. Mechanical behavior of frozen soils: Experimental investigation and numerical modeling. *Computers and Geotechnics*. 2021; 138:104361. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104361. EDN OTDJFK.
19. Li Q., Zhang D., Li P., Cui K., Jing X. The small-strain stiffness of frozen clay soils at different temperatures and initial water contents: Experimental study and predicted model. *Cold Regions Science and Technology*. 2023; 215:103986. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103986. EDN WSFZPO.
20. Zhelnin M.S., Kostina A.A., Prokhorov A.E., Plekhov O.A., Semin M.A., Agutin K.A. Validation of a thermo-hydro-mechanical model of freezing of water-saturated soil based on laboratory tests results. *Computational Continuum Mechanics*. 2021; 14(2):144-158. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.2.12. EDN TJUHG. (rus.).
21. Repina P.I., Sakharov I.I., Fadeev A.B. Numerical modeling of freezing and heaving processes in the foundation-base system. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1994; 5:6-9. (rus.).
22. Shashkin K.G. Using the structure of a universal finite element in the development of models within the framework of the FEM models program. *Urban Reconstruction and Geotechnical Construction*. 2000; 2:26-32. (rus.).
23. Sakharov I.I., Paramonov M.V. Numerical assessment of the effect of frost heaving on the VAT of reinforced walls of excavation pits. *Numerical calculation methods in the practice of geotechnics : proceedings of a scientific and technical conference*. 2012; 159-164. (rus.).
24. Maksimov I.A., Maksimova A.G. Forecast of artificial thawing of permafrost soils in the foundations of hydraulic structures. *Materials of conferences and meetings on hydraulic engineering*. Leningrad, Energoatomizdat, 1988; 111-118. (rus.).
25. Kudriavtsev S.A. Numerical investigations of the thermophysical processes in seasonally freezing soils. *Kriosfera Zemli*. 2003; 7(4):76-81. EDN MPPZAH.
26. Karlov V.D. Principles of foundation design when using seasonally frozen soils in the foundations of structures. *Geotechnics. Science and Practice : Collection of Scientific Papers*. 2000; 15-24. (rus.).
27. Aspiz E.S., Vavrinyuk T.S. Reinforcement of deformable long-term exploited embankments on permafrost. Polytransport systems : proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference. *Siberian State University of Railway Transport*. 2017; 86-90. EDN ZWVQJL. (rus.).
28. Zhang A.A., Aspiz E.S., Khrustalev L.N., Shesternev D.M. A new method of protecting frozen soils at the base of an embankment from thawing. *Path and Track Management Journal*. 2018; 1:6-9. (rus.).
29. Aspiz E.S., Khrustalev L.N. Prevention of degradation of permafrost soils at the base of embankments for the conditions of construction of the Salekhard –

Nadym line. Modern problems of design, construction and operation of the railway track : proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference. *Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyants*. 2019; 49-54. (rus.).

30. Aspiz E.S., Vavrinyuk T.S. Protective layers of the earthbed for the conditions of the northern latitudinal course. Modern problems of railway track design, construction and operation : proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference. *Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyants*. 2019; 96-99.

31. Aspiz E. The subgrade in the conditions of permafrost soils of the northern latitudinal line. *Railway Track and Facilities*. 2021; 3:22-25. EDN PVTRAW. (rus.).

32. Passek V.V., Gerasimov V.A. Heat and stress-strain condition of embankment in culvert zone on permafrost. *Railway Track and Facilities*. 2015; 11:8-13. EDN VBCKYL. (rus.).

33. Passek V.V., Paskov M.V., Andreev V.S. The construction of embankments in difficult permafrost-soil conditions in the presence of buried ice and ice soils of the polar and circumpolar tundra. *Oil and Gas of Western Siberia : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Anatoly Nikolaevich Kosukhin*. 2015; 270-275. EDN UNJFCP. (rus.).

34. Kudryavtsev S.A., Kazharskiy A.V. Numerical modeling of freeze heaving and thawing process de-

pending on velocity of soil freezing. Modern Technologies. System analysis. *Modeling*. 2012; 2(34):105-110. EDN PCGRPJ. (rus.).

35. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Usov D.A. Influence of thawing soils on the deformation top of subgrade. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Communications*. 2021; 3(58):104-111. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_58_104. EDN FKKNWQ. (rus.).

36. Prokhorov A.E., Zhelnin M.S., Kostina A.A., Plekhov O.A. Investigation of non-equilibrium phase transition in freezing porous media. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2018; 4(42):31-37. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-4-31-37. EDN VQRDBQ. (rus.).

37. Zhelnin M.S., Prokhorov A.E., Kostina A.A., Plekhov O.A. Experimental and theoretical study of mechanical deformation of freezing saturated soil. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019; 4:19-28. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.02. EDN UOASYG. (rus.).

38. Belozеров A.G., Semenov E.V., Babakin B.S. Mathematical modelling of soil freezing on the basis of experimental data. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021; 1:102-107. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-102-107. EDN XXTTQU. (rus.).

39. Trapeznikov A.G., Becker A.T., Isaeva E.S., Tsimbelman N.Ya., Chernova T.I. Numerical modeling of the thermal regime of the frozen-type embankment dam of the Anadyr hydrosystem. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022; 1(50):81-93. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-1/81-93. EDN UFIKXG. (rus.).

Received October 31, 2025.

Adopted in revised form on November 11, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

B I O N O T E S : **Irina V. Demiyanyushko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

Valery M. Stain — Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; SPIN-code: 1052-7044, ID RSCI: 968131; vamis@yandex.ru;

Ilya A. Karpov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com;

Pavel M. Abramenzov — postgraduate student of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 1213802, ResearcherID: OOK-2184-2025, ORCID: 0009-0005-2596-661; Tehb82@bk.ru.

Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.