



ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ТОРФЯНОГО ГРУНТА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ЕГО ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

В. В. Шалай¹, А. С. Перин^{1,2}, И. А. Январев¹, А. В. Крупников²

¹Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²ОАО «Сибнефтетранспроект», Россия, 644042, г. Омск, ул. Иртышская набережная, 11, корп. 1

Рассмотрены различные варианты систем температурной стабилизации грунта и соответствующие конструкции дорожного полотна, состоящего из ряда унифицированных модулей, используемых для замораживания влажного торфа при строительстве временных проездов вдоль трассы магистрального трубопровода. Проведена предварительная оценка времени замораживания влажного торфяного грунта до необходимой глубины при различных схемно-компоновочных решениях систем температурной стабилизации и конструкций модулей дорожного полотна. Представлены технологические схемы систем термостабилизации, отражены конструктивные особенности модулей формируемого дорожного полотна. Область применения — дорожное полотно, системы замораживания и температурной стабилизации грунта.

Ключевые слова: дорожное полотно, система температурной стабилизации грунта, холодильная машина, тепловая труба, холодопроизводительность, время замораживания грунта.

Для цитирования: Шалай В. В., Перин А. С., Январев И. А., Крупников А. В. Оценка времени замораживания торфяного грунта для различных систем его температурной стабилизации при формировании дорожного полотна // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 4. С. 22–29. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-22-29. EDN: LXJYNW.



Шалай В. В., Перин А. С., Январев И. А., Крупников А. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ESTIMATION OF PEAT SOIL FREEZING TIME FOR VARIOUS SYSTEMS OF ITS TEMPERATURE STABILIZATION DURING ROADBED FORMATION

V. V. Shalay¹, A. S. Perin^{1,2}, I. A. Yanvarev¹, A. V. Krupnikov²

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia, Mira Ave., 11, 644050

²OJSC "Sibneftetransproekt", Russia, Omsk, Irtyshskaya Naberezhnaya St., bld. 11/1, 644042

Various options of soil temperature stabilization systems and corresponding roadbed structures consisting of a number of unified modules used for freezing wet peat during construction of temporary driveways along the trunk pipeline route are considered. The required time for freezing moist peat soil to the required depth is estimated with various layout solutions for temperature stabilization systems and roadbed module structures. Technological schemes of thermal stabilization systems are presented, design features of modules of the formed roadbed are reflected. Field of application — roadbed and systems for freezing and temperature stabilization of peat soil.

Keywords: roadbed, soil temperature stabilization system, refrigeration machine, heat pipe, refrigerating capacity, soil freezing time.

For citation: Shalay V. V., Perin A. S., Yanvarev I. A., Krupnikov A. V. Estimation of peat soil freezing time for various systems of its temperature stabilization during roadbed formation. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 4. P. 22–29. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-22-29. EDN: LXJYNW.



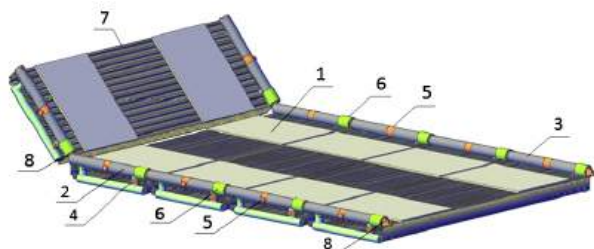


Рис. 1. Дорожное полотно для замораживания и термостабилизации грунта: 1 — модуль дорожного полотна; 2, 3 — напорный и обратный коллекторы; 4 — арматура для регулирования холодопроизводительности модуля; 5 — арматура для поэтапного замораживания модулей; 6 — быстроразъёмные муфты для изгиба коллектора при наклоне двух смежных модулей; 7 — гофрированный стальной лист модуля; 8 — быстроразъёмный замок для сопряжения смежных модулей

Fig. 1. Roadbed for freezing and thermal stabilization of the soil: 1 — roadbed module; 2, 3 — pressure and return headers;

- 4 — fittings for module cooling capacity control; 5 — fittings for phased freezing of modules; 6 — quick-release couplings for bending the manifold when tilting two adjacent modules; 7 — corrugated steel sheet module; 8 — quick-release lock for interfacing of adjacent modules

Актуальность исследования

Строительство и эксплуатация трубопроводных систем газонефтепроводов в районах Крайнего Севера сопряжено с рядом проблем [1, 2].

Решение проблемы формирования надёжного, умеренного по стоимости дорожного полотна (ДП) при строительстве временных проездов вдоль трассы магистрального трубопровода (МТ) в заболоченных районах Крайнего Севера в условиях переходного и летнего периодов является важным и актуальным в настоящее время. В том числе это связано с развитием технологии замораживания влажного торфяного грунта и систем его термостабилизации.

Среди методов замораживания и температурной стабилизации грунтов, а также реализующих их систем, используемых и для линейно-протяженных объектов, например, для автомобильных дорог, можно выделить [3–11]:

— парожидкостные термостабилизаторы (ТС) в виде двухфазных термосифонов, предназначенные для охлаждения талых и пластичномерзлых грунтов с целью повышения их несущей способности;

— глубинные сезонные охлаждающие установки (СОУ) в виде одиночных и групповых термосифонов, предназначенные для автоматической работы при заданных условиях с целью обеспечения эксплуатационной надёжности;

— коллекторные глубинные сезонные охлаждающие установки (КСОУ) в виде групповых термосифонов, соединённых при помощи коллектора с аппаратом воздушного охлаждения (АВО), предназначенные для интенсивного первоначального замораживания и дальнейшего поддержания полученной мерзлой зоны грунта;

— холодильные установки (ХУ) в виде термостабилизаторов, связанных с системой обеспечения циркуляции и охлаждения хладагента, предназначенные для обеспечения требуемых температурных уровней грунта независимо от климатических условий эксплуатации;

— горизонтальные естественно действующие трубчатые (ГЕТ) или вертикальные естественно действующие трубчатые (ВЕТ) системы в виде соответствующего комплекса тепловых трубок, расположенных в толще грунта (на площади или в глубину), замкнутых в общий контур, предназначенные для замораживания грунтов в недоступных местах и эффективного поддержания заданного температурного режима;

— дорожное полотно для замораживания и термостабилизации грунта.

Одной из самых перспективных по капитальным вложениям и эксплуатационным затратам является система замораживания и температурной стабилизации грунта (СЗТСГ) на базе дорожного полотна, предложенная в [11].

Рассмотрим далее эту систему и ее вариации с точки зрения формирования ДП и оценим время, требуемое для замораживания влажного торфяного грунта заданной глубины с целью обеспечения надёжного и безопасного движения по нему автомобильного транспорта.

Цель исследования — определение наиболее эффективного по времени замораживания варианта СЗТСГ, а также соответствующей конструкции дорожного полотна.

Объект исследования

Объектом исследования является конструкция дорожного полотна, состоящего из ряда унифицированных модулей (длина $L_m = 0,8$ или $1,6$ м), а также соответствующая система замораживания и температурной стабилизации влажных торфяных грунтов. На рис. 1 отражен основной 3D-вид дорож-

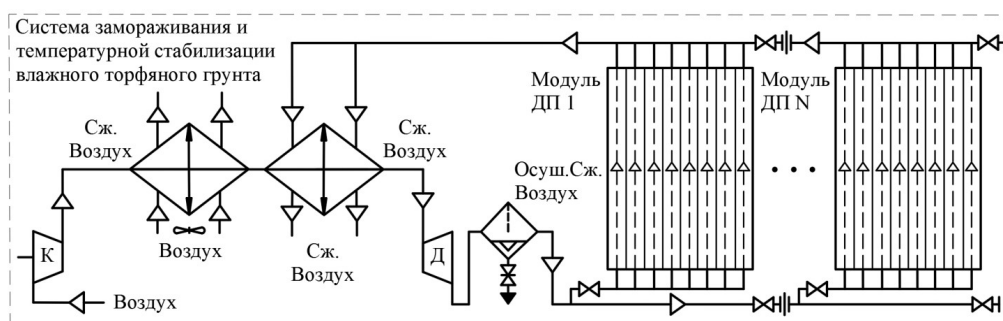


Рис. 2. Одноконтурная система замораживания и температурной стабилизации грунта с подачей в горизонтальный комплекс тепловых трубок (в модули ДП) в качестве хладагента сжатого воздуха

Fig. 2. Single-circuit soil freezing and temperature stabilization system with compressed air supplied to the horizontal complex of heat pipes (to RB modules) as a coolant

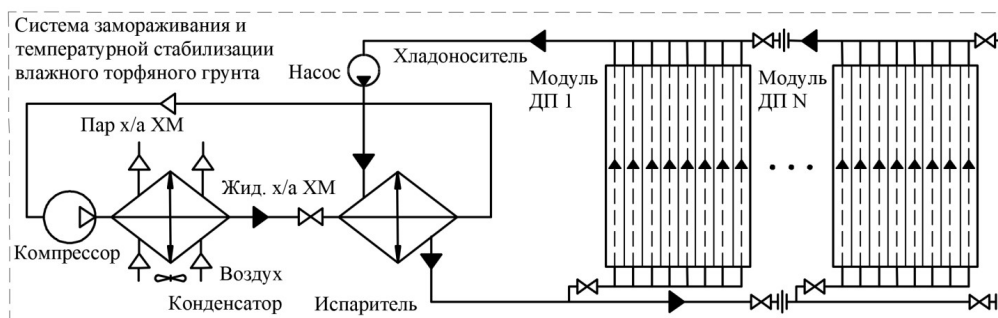


Рис. 3. Двухконтурная система замораживания и температурной стабилизации грунта с подачей в горизонтальный комплекс тепловых труб (в модули ДП) жидкого хладагента из холодильной машины

Fig. 3. Two-circuit soil freezing and temperature stabilization system with liquid coolant supplied to the horizontal complex of heat pipes (to RB modules) from the refrigeration machine

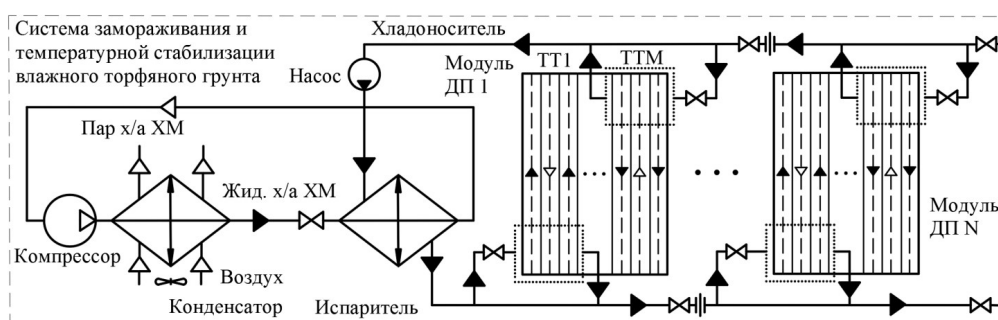


Рис. 4. Трехконтурная система замораживания и температурной стабилизации грунта с использованием в модулях ДП горизонтальных тепловых труб (двухфазных термосифонов) со своим хладагентом

Fig. 4. Three-circuit soil freezing and temperature stabilization system using horizontal heat pipes (two-phase thermosyphons) with its own refrigerant in RB modules

ного полотна для строительства временных проездов вдоль трассы МТ [11].

Определение конкретных особенностей модуля дорожного полотна зависит от выбора метода замораживания и соответствующего варианта СЗТСГ. При этом учет специфики линейно-протяженного ДП предполагает горизонтальное расположение в его модулях систем трубопроводов (рис. 1), что исключает при формировании их конструкции глубинных (вертикальных) сезонных охлаждающих установок в виде одиночных, групповых или коллекторных термосифонов. Глубинные СОУ [12] могут быть использованы дополнительно в комбинации с формируемым дорожным полотном.

На рис. 2–4 представлены рассмотренные далее (с учетом отмеченных ограничений и особенностей) основные варианты технологических схем систем замораживания и термостабилизации грунта при строительстве временных проездов у трассы магистрального трубопровода.

На рис. 2 отражена технологическая схема одноконтурной СЗТСГ с подачей в горизонтальный комплекс тепловых труб (в модули ДП) в качестве хладагента сжатого воздуха, охлажденного в детандер-компрессорном агрегате до температуры -50°C .

На рис. 3 отображена технологическая схема двухконтурной СЗТСГ с подачей в модули ДП жидкого хладагента (например, R-134a, охлажденного до температуры $-26,5^{\circ}\text{C}$, или водного раствора этиленгликоля) из испарителя

На рис. 4 отражена технологическая схема трехконтурной СЗТСГ с подачей к модулям ДП жид-

кого хладагента из холодильной машины (ХМ) (например, R-134a, охлажденного до температуры $-26,5^{\circ}\text{C}$, или водного раствора этиленгликоля), с использованием в модулях ДП горизонтальных тепловых труб (ТТ), представляющих собой двухфазные термосифоны со своим хладагентом (например, R-134a).

Методика и результаты расчётного анализа

При выборе метода замораживания и соответствующей СЗТСГ необходимо учитывать два основных аспекта:

- время замораживания влажного торфяного грунта до необходимой глубины, обеспечивающей надежное и безопасное движение по нему автомобильного транспорта (эффективная скорость процесса замораживания);

- капитальные затраты на оборудование СЗТСГ и эксплуатационные расходы, необходимые для обеспечения соответствующих режимов температурной стабилизации грунта (рациональная стоимость СЗТСГ).

Это предполагает решение задачи общей оптимизации при помощи глобальных экономических (например, стоимость жизненного цикла СЗТСГ $C_{\text{жц}}^{\text{СЗТСГ}}$) или локальных вспомогательных (время заморозки грунта для ДП заданной длины $\tau^{\text{СЗТСГ}}$, энергопотребление оборудования для прокачки рабочих сред $N_{\text{эл}}^{\text{СЗТСГ}}$, габариты и масса оборудования СЗТСГ $F^{\text{СЗТСГ}}$ и др.) критериев.

В частном случае (для оценки только времени замораживания грунта до необходимой глубины)

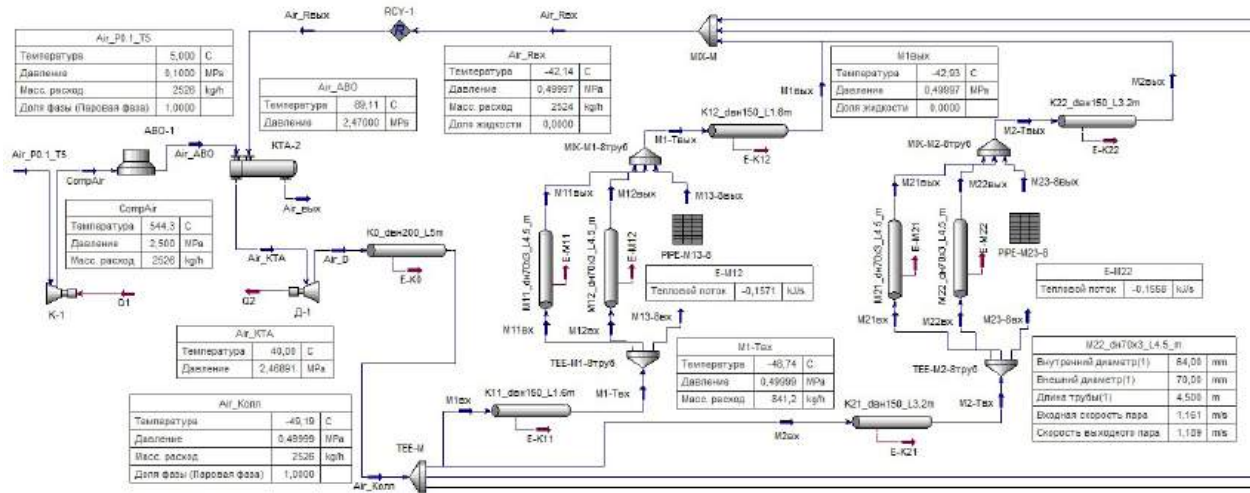


Рис. 5. Модель одноконтурной СЗТСГ с подачей в модули ДП охлажденного сжатого воздуха
 Fig. 5. Single-circuit SFTSS model with supply of cooled compressed air to RB modules

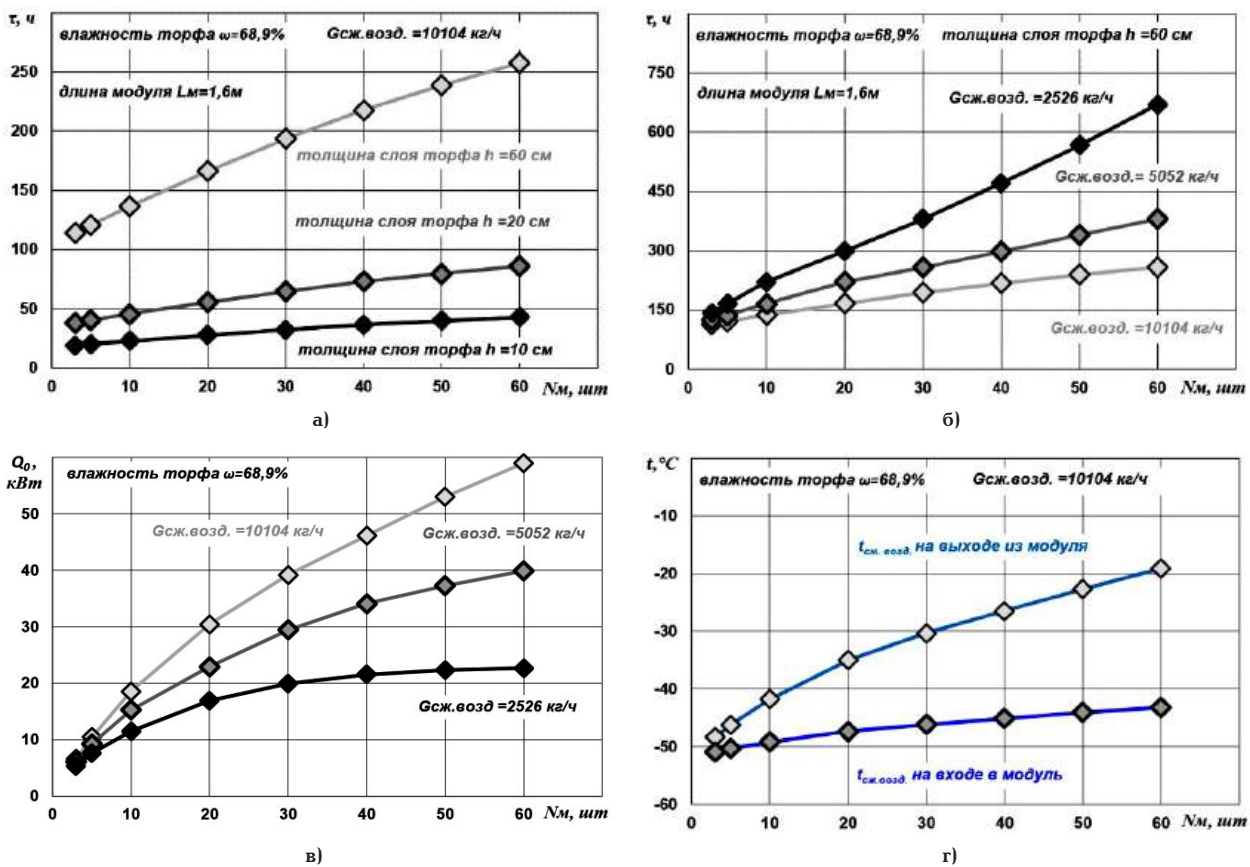


Рис. 6. Время замораживания (а, б), отведенный тепловой поток (в), температуры сжатого воздуха (г) для одноконтурной СЗТСГ
 Fig. 6. Freezing time (a, б), removed heat flow (в), compressed air temperature (г) for single-circuit SFTSS

задача оптимизации может быть сформулирована в следующем виде (1)

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi = \underset{U}{opt} \psi \left(\underset{m_{грунта}}{min} CЗТСГ, Q_{ЗТСГ}, \underset{t_{грунта}}{min} t_{грунта}, \underset{t_a}{min} t_a \right), \\ U = \{ \underset{m_{грунта}}{min} CЗТСГ, Q_{ЗТСГ} \} \end{array} \right. \quad (1)$$

где $Q_{ЗТСГ}$ — структурные, технологические, конструктивные, режимные параметры СЗТСГ; $t_{грунта}$, t_a — температуры грунта и атмосферного воз-

духа; $m_{грунта}$ — масса грунта; $\psi = \{ \tau^{СЗТСГ} \}$ — критерий эффективности.

Минимальное время замораживания $\tau^{СЗТСГ}$ влажного торфяного грунта заданных параметров (длина L , ширина b , толщина h , влажность w) может быть определено при помощи выражения (2):

$$\tau^{СЗТСГ} = \lambda \cdot m_b / Q_o \quad (2)$$

где λ — удельная теплота плавления (кристаллизации) воды; $m_b = m \cdot w$ — масса воды в грунте (в торфе); $m = V \cdot \rho$ — масса торфа; $V = L \cdot b \cdot h$ — объем

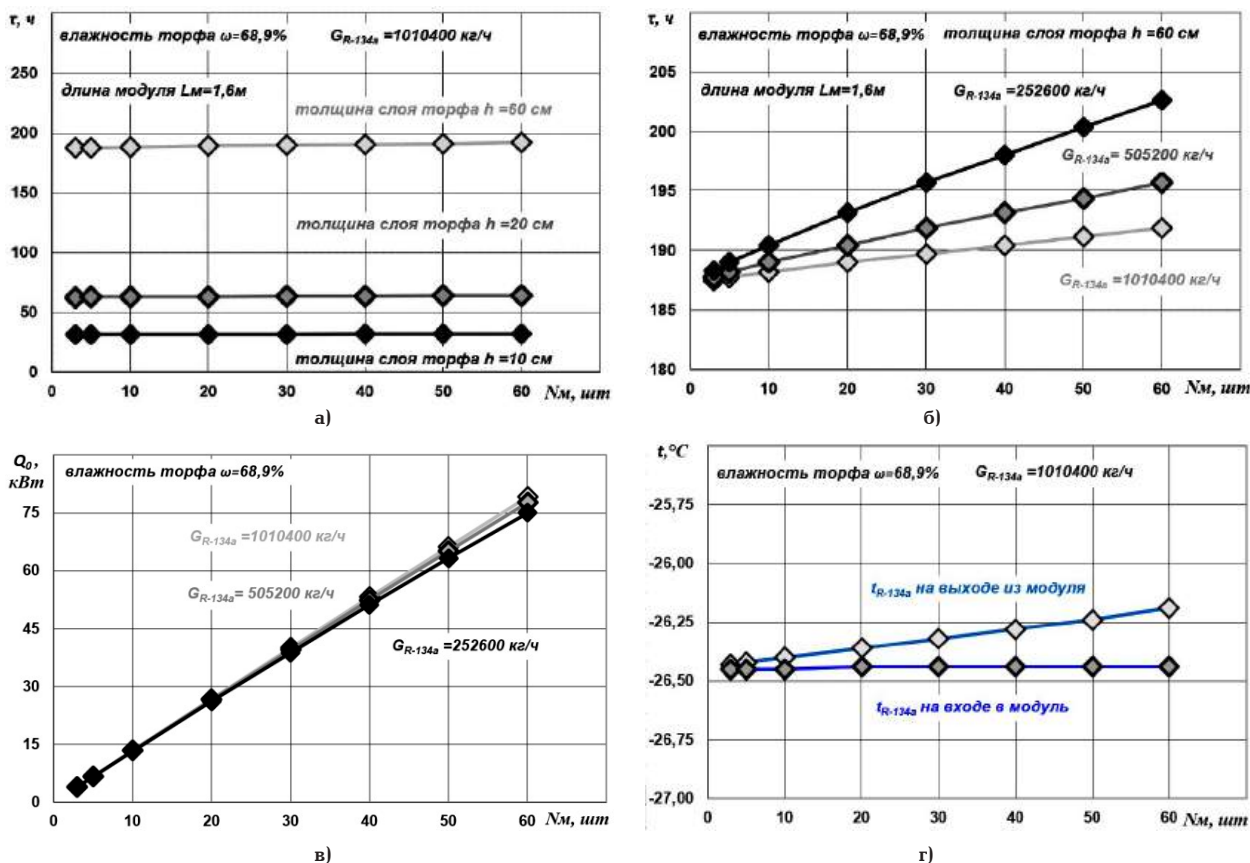


Рис. 7. Время замораживания (а, б), отведенный тепловой поток (в), температуры R-134a (г) для двухконтурной СЗТСГ
Fig. 7. Freezing time (а, б), removed heat flow (в), R-134a temperature (г) for two-circuit SFTSS

влажного торфа под модулями ДП; ρ — плотность торфа; w — влажность торфа; Q_0 — тепловой поток, отведенный от влажного торфа (холодопроизводительность СЗТСГ).

Предложенный подход содержит допущение, что тепловой поток, отведенный от влажного торфа (даже без полного учета всех факторов), в первом приближении определяет холодопроизводительность Q_0 и может быть использован для предварительной оценки эффективности различных вариантов схем СЗТСГ.

Для проведения численных исследований с определением Q_0 (без учета теплообмена между грунтом и воздухом, снежного покрова или постепенного замораживания грунта) для различных вариантов СЗТСГ были разработаны соответствующие цифровые модели при помощи программы HYSYS.

На рис. 5 отображен пример сформированной в HYSYS модели одноконтурной СЗТСГ с подачей в модули ДП (число модулей $N_m = 3$) охлажденного сжатого воздуха.

Результаты моделирования для различных вариантов СЗТСГ ($t_n = 5^\circ\text{C}$ — температура внешней (наружной) среды; $\lambda_m = 0,54 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ — теплопроводность влажного торфа; $h_z = 0,3 \text{ м}$ — глубина закладки трубки модуля) представлены на рис. 6–8. Расходы варьировались с учетом производительности компрессора (насоса) и рекомендаций по скоростям сред в трубах. При этом $w = 68,9\%$ — влажность торфа; $L_m = 1,6 \text{ м}$ — длина модуля; в модуле 8 трубок ($d_n = 70 \times 3 \text{ мм}$, $L_{mp} = 4,5 \text{ м}$).

При необходимости в зависимости от задаваемого расхода хладагента в схемах СЗТСГ (рис. 2–4) может быть использовано несколько детандер-компрессорных агрегатов или ХМ. Требуемое снижение потерь давления в напорном и об-

ратном коллекторах обеспечивается подбором их диаметров.

На рис. 6 отражены результаты моделирования для технологической схемы одноконтурной СЗТСГ с подачей в горизонтальный комплекс тепловых трубок ДП охлажденного до температуры -50°C сжатого воздуха с расходами $G_{\text{сж.возд.}}$ (2526; 5052; 10104 кг/ч), давлением $P_{\text{сж.возд.}} = 0,5 \text{ МПа}$ при различных числах модулей N_m (3–60 шт.) и толщине слоя торфа h (10; 20; 60 см).

На рис. 7 отражены результаты моделирования технологической схемы двухконтурной СЗТСГ с подачей из испарителя ХМ в горизонтальный комплекс тепловых трубок ДП жидкого хладагента R-134a, охлажденного до температуры $-26,5^\circ\text{C}$ с расходом G_{R-134a} (252600; 505200; 1010400 кг/ч), давлением ($P_{R-134a} = 0,2 \text{ МПа}$ и более) при различных числах модулей N_m (3–60 шт.) и толщине слоя торфа h (10; 20; 60 см).

Увеличение расхода сжатого воздуха $G_{\text{сж.возд.}}$ (2526; 5052; 10104 кг/ч) при моделировании одноконтурной СЗТСГ оказывает существенное влияние на холодопроизводительность системы Q_0 (рис. 6в).

Увеличение расхода жидкого хладагента G_{R-134a} (252600; 505200; 1010400 кг/ч) из испарителя ХМ при моделировании двухконтурной или трехконтурной СЗТСГ не оказывает существенного влияния на холодопроизводительность Q_0 горизонтального комплекса трубок (рис. 7в) или двухфазных термосифонов модулей ДП (рис. 8в) соответственно.

На рис. 8 отражены результаты моделирования технологической схемы трехконтурной СЗТСГ с подачей к модулям ДП жидкого хладагента из ХМ (R-134a), охлажденного до температуры $-26,5^\circ\text{C}$, при использовании в горизонтальных

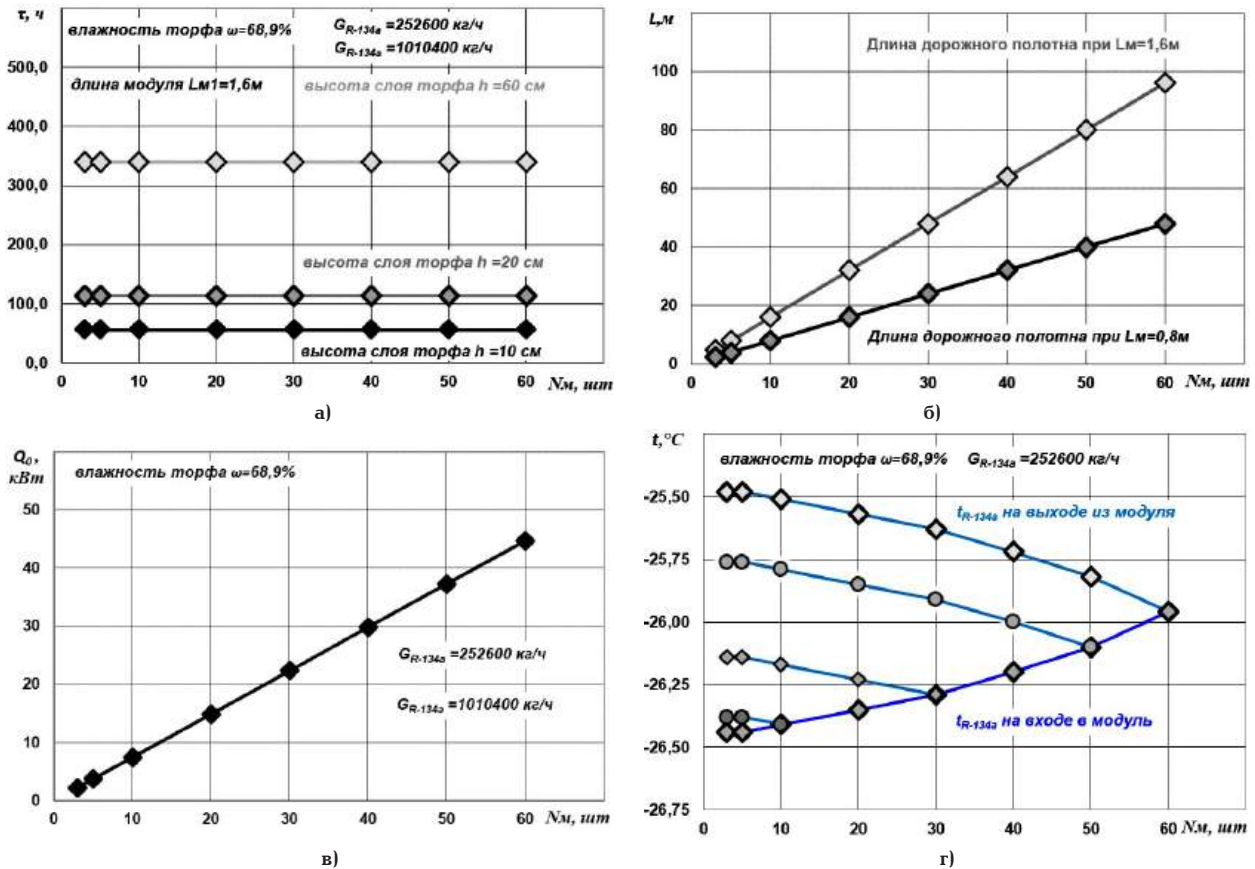


Рис. 8. Время замораживания (а), длина ДП (б), отведенный тепловой поток (в), температуры R-134a (г) для трехконтурной СЗТСГ
 Fig. 8. Freezing time (a), RB length (б), removed heat flow (в), R-134a temperatures (г) for three-circuit SFTSS

тепловых трубах модулей ДП своего хладагента (R-134a), для различных чисел модулей N_m (3–60 шт.) и толщине слоя торфа h (10; 20; 60 см).

Сравнительная оценка времени замораживания торфяного грунта для различных СЗТСГ позволяет выделить как более эффективные одноконтурную (для $h = 60$ см, $G_{сж.возд.} = 10104$ кг/ч, $N_m = 3–60$ шт. — $\tau = 114–257$ ч, рис. 6 а,б) и двухконтурную (для $h = 60$ см, $G_{R-134a} = 10104$ кг/ч, $N_m = 3–60$ шт. — $\tau = 187–192$ ч, рис. 7 а,б) системы СЗТСГ.

Трехконтурная СЗТСГ с аналогичными исходными данными (с учетом капиллярных ограничений фитилей ТТ) имеет более продолжительные показатели времени заморозки грунта ($h = 60$ см, $G_{R-134a} = 10104$ кг/ч, $N_m = 3–60$ шт. — $\tau = 340$ ч, рис. 8а).

Аналогичные выводы получены и для модуля $L_m = 0,8$ м. Изменение общей длины ДП для модулей ($L_m = 0,8$ м, $L_m = 1,6$ м) представлено на рис. 8б.

На рис. 6–8г отражены температуры хладагентов, которые с учетом давлений рабочих сред ($P_{сж.возд. i=1} = 0,5$ МПа; $P_{R-134a i=2,3} = 0,2$ МПа, где i — число контуров СЗТСГ) определяют отсутствие фазового перехода (конденсации, испарения) в соответствующих контурах.

Потери давления рабочих сред с учетом задаваемых расходов и подбираемых диаметров напорного и обратного коллекторов, трубок модулей при длине дорожного полотна $L = 96$ м (60 модулей) не превышают допустимых значений. Например, для одноконтурной СЗТСГ при $G_{сж.возд.} = 2526$ кг/ч и диаметре коллекторов $d_{вн к} = 150$ мм потери давления в контуре $\Delta P_{сж.возд. i=1} \approx 0,002$ МПа.

Для двух- или трехконтурной СЗТСГ при $G_{R-134a} = 252600$ кг/ч и $d_{вн к} = 200$ мм потери давления во втором контуре $\Delta P_{R-134a i=2,3} \approx 0,023$ МПа).

Для одно- и двухконтурной СЗТСГ температуры хладагента R-134a на входе в модули и на выходе из них постепенно повышаются с возрастанием номера модуля N_m (рис. 6–7г).

Для трехконтурной СЗТСГ с учетом специфики технологической схемы температуры хладагента на входе в модули повышаются с возрастанием номера модуля, а температуры хладагента на выходе из модулей повышаются с понижением номера модуля (рис. 8г).

Сравнительный анализ времени замораживания торфяного грунта для одно- и двухконтурной СЗТСГ позволяет сделать вывод о предпочтительном использовании одноконтурных СЗТСГ при формировании ДП малой или средней длины (число модулей $N_m = 3–40$ шт.).

Применение двухконтурных СЗТСГ целесообразно при формировании более продолжительного ДП (число модулей $N_m = 40–N_{max}$ шт.) или при эксплуатации ДП для более широкого диапазона температур наружного воздуха ($t_n > 5$ °C).

Холодопроизводительность Q_0 и время замораживания грунта $\tau^{СЗТСГ}$ предполагают достижение температуры фазового перехода 0 °C для всего требуемого объема влажного торфа. Однако и этого может оказаться недостаточно с точки зрения прочностных свойств промерзшего основания, поэтому необходимо учитывать динамику процесса замораживания, для чего необходимы дополнительные исследования.

Кроме того, оценка общей эффективности вариантов конструкции дорожного полотна и СЗТСГ может быть проведена с учетом более широкого списка, в том числе глобальных экономических и термозкономических критериев.

Заключение

Рассмотрены перспективные методы замораживания и температурной стабилизации грунтов, а также реализующие их системы, используемые в том числе и для линейно-протяженных объектов, например, для автомобильных дорог.

Предложена конструкция дорожного полотна с учетом его линейно-протяженной специфики и выделены основные варианты технологических схем СЗТСГ (одно-, двух- и трехконтурная).

Сформулирована задача оптимизации при оценке метода замораживания, модуля ДП и соответствующей СЗТСГ при строительстве временных проездов у трассы магистрального трубопровода.

Предложен подход определения холодопроизводительности СЗТСГ Q_0 и соответствующего времени замораживания $\tau_{\text{СЗТСГ}}$ (без учета теплообмена между грунтом и воздухом, снежного покрова или постепенного замораживания грунта), который был использован для предварительной оценки эффективности различных вариантов СЗТСГ с учетом условий эксплуатации.

Разработаны соответствующие модели технологических схем при помощи программы HYSYS для определения холодопроизводительности СЗТСГ при проведении численных исследований различных вариантов СЗТСГ.

На основе сравнительной оценки результатов моделирования по времени замораживания влажного торфяного грунта для различных СЗТСГ можно выделить как более эффективные одно- и двухконтурные системы.

Анализ времени замораживания торфяного грунта для одно- и двухконтурной СЗТСГ позволяет сделать вывод о предпочтительном использовании с учетом временного критерия одноконтурных СЗТСГ при формировании ДП малой или средней длины (число модулей $N_m = 3 - 40$ шт.).

Двухконтурные СЗТСГ с подачей из испарителя ХМ в горизонтальный комплекс тепловых трубок модулей (второй контур) жидкого хладоносителя (например, R-134a) более целесообразны при формировании продолжительного ДП (число модулей $N_m = 40 - N_{\text{max}}$ шт.). Эксплуатация данных СЗТСГ возможна также для более широкого диапазона температур наружного воздуха ($t_n > 5^\circ\text{C}$).

Для обеспечения требуемых прочностных свойств промерзшего основания ДП требуется учитывать не только холодопроизводительность Q_0 и время замораживания грунта $\tau_{\text{СЗТСГ}}$ при достижении температуры фазового перехода 0°C для всего требуемого объема замораживания торфа. Динамика процесса, послойное замораживание, снежный покров грунта также являются важными факторами, для учета которых необходимы дополнительные исследования, например, при помощи программ Борей 3D, FROST 3D.

Оценка вариантов конструкции дорожного полотна и общей эффективности СЗТСГ может быть проведена также с учетом глобальных экономических или термoeкономических критериев.

Список источников / References

1. Приходько А. В., Жданова С. М. Проблемы строительства трубопроводных систем газонефтепроводов в районах вечной мерзлоты и пути их решения // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. В 2 т. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2023. Т. 1. С. 450–453. ISBN 978-5-262-00948-0. EDN: GUJFUL.

Prihod'ko A. V., Zhdanov S. M. Problemy stroitel'stva truboprovodnykh sistem gazonefteprovodov v rayonakh vechnoy merzloty i puti ikh resheniya [Problems of construction of pipeline systems of gas and oil pipelines in permafrost areas and ways to solve them]. Nauchno-tekhnicheskoye i ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. *Asia-Pacific Scientific, Technical and Economic Cooperation in the 21st Century*. In 2 vols. Khabarovsk, 2023. Vol. 1. P. 450–453. ISBN 978-5-262-00948-0. EDN: GUJFUL. (In Russ.).

2. Ванышов А. Д., Январев И. А. Проблемы согласованности газодинамических характеристик секций центробежного компрессора и выбора антипомпажных регулирующих клапанов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 2. С. 30–37. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-2-30-37. EDN: PAAKVE.

Vanyashov A. D., Yanvarev I. A. Problemy soglasovannosti gazodinamicheskikh kharakteristik sektsiy tsentrobezhnogo kompressora i vybora antipompazhnykh reguliruyushchikh klapanov [Problems of consistency of gas dynamic characteristics of centrifugal compressor sections and selection of anti-surge control valves]. Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 2. P. 30–37. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-2-30-37. EDN: PAAKVE. (In Russ.).

3. Лаврик А. Ю., Буслаев Г. В., Куншин А. А. [и др.]. Системы термостабилизации грунта: опыт и перспективы // Деловой журнал «Neftegaz.RU». 2022. № 12 (132). С. 88–91. EDN: VFUSZM.

Lavrik A. Yu., Buslayev G. V., Kunshin A. A. [et al.]. Sistemy termostabilizatsii grunta: opyt i perspektivy [Soil thermal stabilization systems: experience and prospects]. Delovoy zhurnal Neftegaz.RU. *Business magazine "Neftegaz.RU"*. 2022. No. 12 (132). P. 88–91. EDN: VFUSZM. (In Russ.).

4. Романов А. Ю., Абдуллин Н. В. Применение средств активной термостабилизации грунтов на объектах газотранспортных систем // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. № 2. С. 39–45. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-2-39-45. EDN: BJTVDI.

Romanov A. Yu., Abdullin N. V. Primeneniye sredstv aktivnoy termostabilizatsii gruntov na ob'yektakh gazotransportnykh system [Application of means of active thermal stabilization of soils on objects of gas transmission systems]. Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2023. No. 2. P. 39–45. DOI: 10.24412/0131-4270-2023-2-39-45. EDN: BJTVDI. (In Russ.).

5. Мельников В. П., Ишков А. А., Аникин Г. В. Современные методы активной термостабилизации мерзлых грунтов: российские разработки, исследования и перспективы // Криосфера Земли. 2024. Т. 28, № 5. С. 21–37. DOI: 10.15372/KZ20240503. EDN: PVSPPJ.

Mel'nikov V. P., Ishkov A. A., Anikin G. V. Sovremennyye metody aktivnoy termostabilizatsii merzlykh gruntov: rossiyskiye razrabotki, issledovaniya i perspektivy [Methods of active thermal stabilization of frozen ground: Russian developments, research, and prospects]. Kriosfera Zemli. *Earth's Cryosphere*. 2024. Vol. 28, no. 5. P. 21–37. DOI: 10.15372/KZ20240503. EDN: PVSPPJ. (In Russ.).

6. Пат. 2818341C1 Российская Федерация, МПК Е 02 D 3/115. Способ строительства и устройства свай в зонах вечной мерзлоты с использованием термостабилизационных муфт / И. А. Евсеев, А. В. Крупников, В. В. Шалай. № 2023121475; заявл. 17.08.2023; опубл. 02.05.2024. Бюл. № 13. 25 с.

Patent No. 2818341C1 Russian Federation, IPC E 02 D 3/115. Spособ stroitel'stva i ustroystva svay v zonakh vechnoy merzloty s ispol'zovaniyem termostabilizatsionnykh muft [Method of construction and installation of piles in permafrost zones using heat stabilization couplings] / I. A. Evseev, A. V. Krupnikov, V. V. Shalay. No. 2023121475. 25 p. (In Russ.).

7. Шевчик Ф. А., Комаров И. А., Исаев В. С. [и др.]. Трехконтурная система термостабилизации грунтов для поддержания природно-технических систем Арктики // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2022. № 6. С. 22–25. EDN: DVIWVQ.

Shevchik F. A., Komarov I. A., Isayev V. S. [et al.]. Trekhkonturnaya sistema termostabilizatsii gruntov dlya podderzhaniya prirodno-tekhnicheskikh sistem Arktiki [Three-circuit soil thermal stabilization system to maintain the natural and technical systems of the Arctic]. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov. Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022. No. 6. P. 22–25. EDN: DVIWVQ. (In Russ.).

8. Haynes F. D., Zarling J. P. Thermosyphons and foundation design in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 1988. No. 15. P. 251–259. DOI: 10.1016/0165-232x(88)90072-9.

9. Yannak E. Jr., Long E. L. Recent developments in Thermosyphon technology. *11th International Conference on Cold Regions Engineering*. 2002. P. 656–662. DOI: 10.1016/0165-232x(88)90072-9.

10. Zhang M., Lai Y., Liu Z., Gao Z. Nonlinear analysis for the cooling effect of Qinghai-Tibetan railway embankment with different structures in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2005. Vol. 42, no. 3. P. 237–249.

11. Пат. 2844539С1 Российская Федерация, МПК Е 01 С 9/08. Способ строительства временных проездов вдоль трассы магистрального трубопровода для сложных условий заболоченной местности и захламляющая станция для его осуществления / А. С. Перин, А. В. Крупников, В. В. Шалай. № 2024116342; заявл. 14.06.2024; опубл. 04.08.2025, Бюл. № 22. 21 с.

Patent No. 2844539C1 Russian Federation, IPC E 01 C 9/08. Sposob stroitel'stva vremennykh proyezdov vdol' trassy magistral'nogo truboprovoda dlya slozhnykh usloviy zabolochennoy mestnosti i zakholazhivayushchaya stantsiya dlya ego osushchestvleniya [Method of constructing temporary passages along route of main pipeline for marshlands difficult conditions and cooling station for implementation thereof] / A. S. Perin, A. V. Krupnikov, V. V. Shalay. No. 2024116342. 21 p. (In Russ.).

12. Шепитько Т. В., Артюшенко И. А., Зайцев А. А., Ноздрачев А. С. Анализ эффективности взаимодействия сезонно действующих охлаждающих устройств и теплоизоляционных слоев на многолетнемерзлые грунты основания транспортных сооружений // Транспортные сооружения. 2024. Т. 11, № 3. С. 1–20. DOI: 10.15862/07SATS324. EDN: STZYDC.

Shepitko T. V., Artyushenko I. A., Zaytsev A. A., Nozdachev A. S. Analiz effektivnosti vzaimodeystviya sezonno-deystvuyushchikh okhlazhdayushchikh ustroystv i teploizolyatsionnykh sloev na mnogoletnemmerzlyye grunty osnovaniya transportnykh sooruzheniy [Interaction effectiveness analysis between seasonally acting cooling devices and heat-insulating layers on permafrost soils of the base of transport structures]. *Transportnyye sooruzheniya. Russian Journal of Transport Engineering*. 2024. Vol. 11, no. 3. P. 1–20. DOI: 10.15862/07SATS324. EDN: STZYDC. (In Russ.).

ШАЛАЙ Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2322-6820

AuthorID (РИНЦ): 9913

ORCID: 0000-0003-0635-4849

AuthorID (SCOPUS): 35792469000

AuthorID (SCOPUS): 56755298300

AuthorID (SCOPUS): 57190972363

ResearcherID: P-8233-2015

Адрес для переписки: shalay@omgtu.ru

ПЕРИН Алексей Сергеевич, ведущий инженер ОАО «Сибнефтетранспроект», г. Омск; аспирант кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6288-0580

AuthorID (РИНЦ): 919325

Адрес для переписки: perin_aleksei@list.ru

ЯНВАРЕВ Игорь Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8964-1929

AuthorID (РИНЦ): 489402

AuthorID (SCOPUS): 8384597800

Адрес для переписки: iayanvarev@mail.ru

КРУПНИКОВ Антон Владимирович, главный инженер ОАО «Сибнефтетранспроект», г. Омск.

AuthorID (SCOPUS): 41761857400

Адрес для переписки: anton@sntp.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 08.09.2025; одобрена после рецензирования 01.11.2025; принята к публикации 18.11.2025.

SHALAY Viktor Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Oil and Gas Storage, Standardization and Certification Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2322-6820

AuthorID (RSCI): 9913

ORCID: 0000-0003-0635-4849

AuthorID (SCOPUS): 35792469000

AuthorID (SCOPUS): 56755298300

AuthorID (SCOPUS): 57190972363

ResearcherID: P-8233-2015

Correspondence address: shalay@omgtu.ru

PERIN Aleksey Sergeyevich, Lead Engineer, OJSC "Sibneftetransproekt", Omsk; Postgraduate of the Oil and Gas Storage, Standardization and Certification Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 6288-0580

AuthorID (RSCI): 919325

Correspondence address: perin_aleksei@list.ru

YANVAREV Igor Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 8964-1929

AuthorID (RSCI): 489402

AuthorID (SCOPUS): 8384597800

Correspondence address: iayanvarev@mail.ru

KRUPNIKOV Anton Vladimirovich, Chief Engineer, OJSC "Sibneftetransproekt", Omsk.

AuthorID (SCOPUS): 41761857400

Correspondence address: anton@sntp.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 08.09.2025; approved after reviewing 01.11.2025; accepted for publication 18.11.2025.