

**РАЗДЕЛ 3.**  
**ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ**

**УДК 624.139**

**ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА  
НА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛОЕ ОСНОВАНИЕ**

***Иванов К. С.***

***Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, г. Тюмень, Российская  
Федерация  
E-mail: sillicium@bk.ru***

Снижение техногенного воздействия на многолетнемёрзлые грунты и безаварийная эксплуатация инженерных сооружений являются актуальными проблемами сохранения окружающей среды в криолитозоне. Предложен способ наземной прокладки магистрального трубопровода с применением теплоизоляции из гранулированной пеностеклокерамики, получаемой на базе местных сырьевых ресурсов. Трубопровод укладывается на теплоизоляционную подушку из сыпучего материала в геосинтетической оболочке, что снижает тепловое воздействие на мёрзлый грунт основания и не нарушает растительный покров криолитозоны. Цель исследований состояла в оценке глубины оттаивания мёрзлого основания под температурным воздействием трубопровода на теплоизоляционной подушке. В результате компьютерного моделирования определены инженерные меры, необходимые для обеспечения несущей способности основания за счёт сохранения в мёрзлом состоянии в течение всего срока эксплуатации. Применение нового способа снижает техногенное воздействие на окружающую среду, способствует рациональному недр- и природопользованию, удешевляет строительство трубопроводов в криолитозоне.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, многолетнемёрзлый грунт, теплоизоляционный материал, строительство, трубопровод.

**ВВЕДЕНИЕ**

Вопрос транспортировки углеводородов с положительной температурой особенно актуален в условиях распространения вечной мерзлоты, где наибольшее предпочтение отдаётся наземному способу прокладки трубопроводов. В современной практике строительства в криолитозоне наземный способ считается более надёжным и безопасным в отличие от наземного и подземного способов прокладки [1, 2, 3, 4, 5]. Однако, наземный способ имеет недостатки: 1) высокая материалоемкость из-за необходимости возведения свайных опор; 2) применение тяжелой спецтехники для монтажа свай; 3) применение сезонных охлаждающих устройств (термосвай); 4) строительные работы наносят непоправимый вред окружающей среде; 5) исключён демонтаж конструкций трубопровода из грунта.

Вторым по распространённости является подземный способ прокладки трубопровода. Несмотря на относительную дешевизну, к основным недостаткам способа относят: 1) необходимость разработки многолетнемёрзлых грунтов; 2) нарушение почвенно-растительного покрова; 3) при переходе через обводнённые и болотистые участки требуется балластировка пригрузами для предотвращения всплытия трубопроводов.

В исследованиях последних лет [1-4], наземный (наименее распространённый) способ прокладки отмечается как наиболее прогрессивный, ведущийся по принципу наименьшего вмешательства в грунтовый массив. Несмотря на слабую освещённость в нормативно-технической документации и ограниченный опыт эксплуатации, данный способ минимизирует механическое и тепловое воздействие на криолитозону, т.к. в качестве основания используются мёрзлые грунты в естественном, ненарушенном состоянии. В результате сохраняется высокая несущая способность мёрзлого основания, что существенно снижает риск деформаций трубопровода и возникновения аварий.

Однако, учитывая широкие перспективы наземного способа, тепловое воздействие трубопровода на мёрзлый грунт нельзя исключать полностью. Для теплозащиты в основном применяют насыпи из местных грунтов, реже в насыпях устраивают дополнительный слой теплоизоляции [1]. Таким образом, к недостаткам способа следует отнести: 1) необходимость разработки карьеров для сооружения насыпи; 2) перевозку грунта; 3) транспортировку дорогостоящих теплоизоляционных материалов в отдалённые районы Крайнего Севера.

Одним из возможных решений по снижению теплового воздействия на криолитозону при наземном способе прокладки трубопровода может стать применение теплоизоляционных материалов, получаемых на базе сырьевых и энергетических ресурсов Крайнего Севера и Арктики. Локализации производства строительных материалов вблизи строящихся объектов имеет не только экономическую перспективу, но способствует рациональному природопользованию и сохранению окружающей среды в криолитозоне.

Анализ литературных источников последних лет свидетельствует о тренде роста новых технологий получения теплоизоляционных материалов на основе опал-кristобалитовых и цеолитовых пород [6-9]. Широко известно, что их основные месторождения расположены в арктической зоне нашей страны, наряду с месторождениями углеводородов. Так, например, Ямало-Ненецкий АО обладает крупнейшими в стране запасами опал-кristобалитов (диатомитов, трепелов и опок), ресурсный потенциал которых насчитывает 4,8 млрд. м<sup>3</sup> [10]. В приарктических районах Красноярского края, Якутии и Чукотки открыты одни из крупнейших в стране месторождений цеолитовых пород. Например, прогнозные запасы Кемпендяйского цеолитоносного района западной Якутии насчитывает около 3,5 млрд. т. [11].

За последние 10 лет автором накоплен существенный опыт синтеза и практического применения гранулированной пеностеклокерамики на основе опал-кristобалитов и цеолитов различных месторождений [12-14]. Данный неорганический теплоизоляционный материал выгодно отличается от традиционных высокой прочностью и гидрофобностью. Пеностеклокерамика в виде закрыто-пористых окатанных гранул имеет неоспоримые технологические преимущества благодаря укладке теплоизоляционного слоя в основания сооружений с применением средств механизации. В результате, материал уже нашёл применение в дорожном строительстве в криолитозоне, что отражено в нормативной литературе [14]. Благодаря совокупности теплозащитных и фильтрационных свойств,

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА НА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛОЕ ОСНОВАНИЕ

---

гранулированная пеностеклокерамика незаменима в гидротехнических сооружениях, например, в водоотводных системах транспортных сооружений. Так, применение материала для теплоизоляции водоотводных лотков на Забайкальской железнодорожной дороге предотвращает образование наледей на участках пути в зимний период [13].

В вышеупомянутом наземном способе прокладки трубопроводов, гранулированная пеностеклокерамика может полностью заменить грунтовую насыпь и использоваться в качестве теплоизоляционной подушки, на которой уложен трубопровод. Данная замена позволяет в 4 раза сократить объём земляных работ и перевозок грунта с учётом того, что насыпная плотность гранулированной пеностеклокерамики составляет  $250 \text{ кг/м}^3$ , а соотношение объёмов сырья и готового материала достигает 1:4.

Предлагаемое техническое решение требует прогнозной оценки риска нанесения экологического ущерба за счёт возможной деградации мёрзлого основания путём моделирования теплового воздействия трубопровода на криолитозону. До сих пор применение аналогичных конструкций в арктических регионах исключалось в связи с ограниченной номенклатурой выпускаемых промышленностью теплоизоляционных материалов. Однако, имея широкий практический опыт производства и применения гранулированной пеностеклокерамики в других сферах, а также располагая современными средствами компьютерного моделирования, решить поставленную задачу можно уже сегодня, что и является целью данного исследования.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование проводилось с учётом климатических особенностей территории распространения многолетнемерзлых грунтов в районе населённого пункта Пурпе, Пуровский район, Ямало-Ненецкий автономный округ. География участка моделирования обусловлена: 1) наличием необходимых инженерно-геологических изысканий; 2) крупными месторождениями опал-кристобалитовых пород для производства гранулированной пеностеклокерамики [10]; 3) расположением двух крупных действующих нефтепроводов: Заполярье – Пурпе и Ванкор – Пурпе.

Представленные в табл. 1 климатические характеристики усреднялись за 10 последних лет по данным наблюдений ближайшей метеостанции № 23552 (Тарко-Сале), расположенной в 72 км. Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность приведена по справочным значениям [16]. В расчёте принималось максимальное значение глубины сезонно-талого слоя, которое на исследуемом участке изменяется от 0,8 до 1,4 м. Нижняя граница слоя годовых колебаний температуры достигает 15 м, температура многолетнемерзлого грунта на этой глубине составляет  $-1,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Основание трубопровода представлено следующими грунтами: до глубины 0,5 м песком мелким, слабопучинистым (1), до глубины 5 м торфом слаборазложившимся, слабльдистым (2). На остальной части разреза (до границы слоя годовых колебаний температуры на глубине 15 м) отмечаются тяжелые суглинки (тип 3). Расчётные

характеристики грунтов основания представлены в табл. 2. Расчётные характеристики гранулированной пеностеклокерамики имели следующие значения: фракция 5–20 мм, коэффициент эффективной теплопроводности 0,09 Вт/(м·°С), насыпная плотность 280 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии 1,8 МПа, удельная теплоёмкость 260 кДж/(м·°С) [13].

Конструкция трубопровода на теплоизоляционной подушке схематично изображена на рис. 1. Гранулированная пеностеклокерамика 3 укладывается на водонепроницаемый геосинтетический материал 4 по длине, а его края заворачиваются сверху один под другой, образуя теплоизоляционную подушку непрерывной длины в оболочке. С учётом опыта моделирования отапливаемых зданий, в основании которых укладывалась гранулированная пеностеклокерамика [13], ширина и толщина подушки принимались равными 4 и 0,5 м соответственно. Для стока воды подушка предусматривала горизонтальный уклон 1:8. Тепловая изоляция трубопровода 5, уложенного по центру подушки выполнена также из гранулированной пеностеклокерамики 3 в виде засыпки между трубопроводом и листом 6 из оцинкованной стали толщиной 0,5 мм. Края подушки целесообразно покрыть рулонным биоматом 7 для озеленения, что снизит тепловое воздействие солнечной радиации летом.

Таблица 1.

## Климатические характеристики участка строительства

Наименование	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °С	-23,7	-22,9	-14,4	-8,2	0,0	9,9	15,7	12,0	5,7	-4,2	-15,2	-20,9
Скорость ветра, м/с	2,7	2,7	3,0	3,4	3,7	3,6	3,0	2,4	3,0	3,2	2,9	2,6
Высота снежного покрова, м	0,66	0,75	0,79	0,74	0,44	0,05	-	-	-	0,14	0,25	0,46
Суммарная солнечная радиация, кВт·ч/м <sup>2</sup>	10	37	113	163	230	240	238	178	111	48	16	-

Рабочей гипотезой, предшествующей проведению численного эксперимента, является предположение о переходе верхнего горизонта многолетнемёрзлых грунтов (ВГММГ) из положения 1 в 2 (рис. 1) за счёт снижения воздействия солнечной радиации, температуры воздуха и трубопровода на поверхность грунта под теплоизоляционной подушкой. Теоретически, такое «поднятие» ВГММГ к подошве сооружения существенно увеличивает несущую способность основания за счёт его сохранения в мёрзлом состоянии в течении всего срока эксплуатации.

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА  
НА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛОЕ ОСНОВАНИЕ

Таблица 2.

Расчётные характеристики грунтов

Грунт	Влажность, %	Температура начала замерзания, °С	Теплопроводность, Вт/(м·°С)		Удельная теплоёмкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·°С)		Теплота фазового перехода, МДж/м <sup>3</sup>
			талого	мёрзлого	талого	мёрзлого	
1	23	-0,25	1,83	2,21	2776	2110	102
2	114	-0,36	0,90	1,40	3390	2750	163
3	18	-0,31	1,89	2,30	2640	2010	95

Для верификация гипотезы применялся современный численный метод решения уравнения нестационарной теплопроводности с учётом фазовых переходов и количества незамёрзшей воды в грунте [12], позволяет спрогнозировать экологические последствия для криолитозоны на несколько десятилетий вперёд.

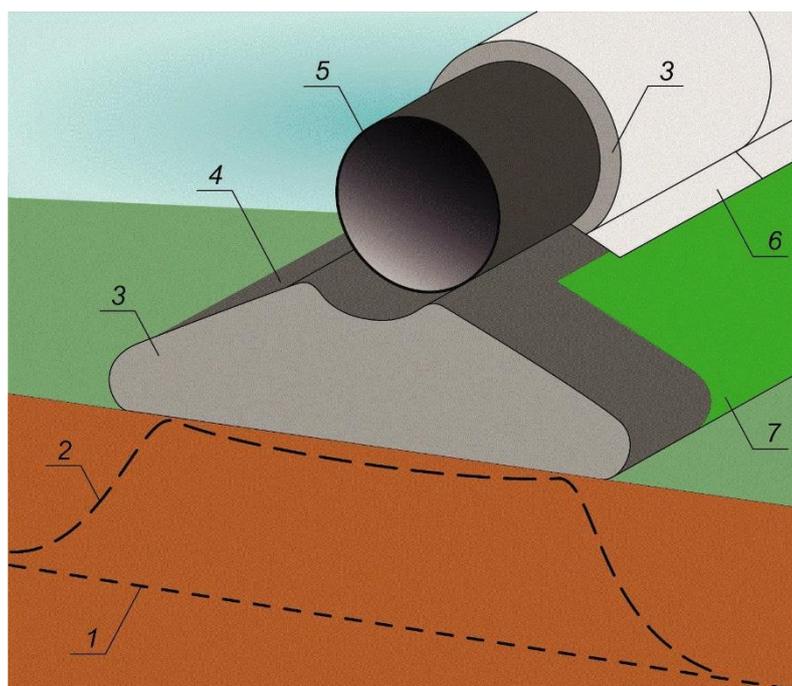


Рис. 1. Схема трубопровода на теплоизоляционной подушке: 1 и 2 — Естественное и теоретическое положение ВГММГ; 3 — Гранулированная пеностеклокерамика; 4 — Оболочка подушки из водонепроницаемого геосинтетического материала; 5 — Трубопровод; 6 — Оболочка из оцинкованной стали; 7 — Биомат.

В предположении плавного изменения свойств геологического профиля вдоль трубопровода его тепловое взаимодействие с теплоизоляционной подушкой и основанием справедливо рассматривать в любой плоскости, перпендикулярной оси. Ввиду осесимметричности поперечного сечения конструкции на рис. 1, задача нахождения температурного поля основания может решаться в любой его полуплоскости, ограниченной вертикальной осью симметрии. Для решения была выбрана правая полуплоскость, ширина расчётной области составляла 20 м с целью учёта бокового температурного воздействия дневной поверхности. Размер расчётной области по вертикали, равный 15 м, соответствовал положению нижней границы слоя годовых колебаний температуры. В этой связи, на нижней границе расчётной области принимались граничные условия первого рода с постоянной температурой  $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , равной среднегодовой температуре грунта. На боковых границах расчётной области было принято условие равенства теплового потока нулю, что соответствует граничным условиям второго рода. Расчётная область разбивалась на блоки размером  $0,05 \times 0,05\text{ м}$ .

Верхней границе расчётной области, включавшей конструкцию и дневную поверхность, соответствовали граничные условия третьего рода. На дневной поверхности задавалась среднемесячная температура воздуха, суммарная солнечная радиация, термическое сопротивление слоя снега зимой (табл. 1) и дёрна толщиной  $0,15\text{ м}$  с теплопроводностью  $0,52\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ . С учётом снегозанося, толщина снега на расстоянии  $5\text{ м}$  от оси трубопровода удваивалась. Коэффициент теплообмена на поверхности рассчитывался в зависимости от скорости ветра, наличия снежного покрова (табл. 1) и дёрна согласно методике [12]. Температура внешней стенки трубопровода диаметром  $1\text{ м}$  была принята равной  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  круглогодично, что отвечает оптимальным эксплуатационным параметрам нефтепровода [5].

Исходя из предположения, что прокладка трубопровода происходит в зимний период, когда тепловое и механическое воздействие строительной техники на грунт минимально, начало расчёта соответствовало 01 января 2024 г. Согласно данным скважинной термометрии, было принято начальное распределение температуры в основании: на глубине  $0-0,5\text{ м}$  от  $-6$  до  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0,5-5\text{ м}$  от  $-4$  до  $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $5-15\text{ м}$   $-0,8$  до  $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Прогнозный расчёт выполнялся на весь срок эксплуатации трубопровода, который, согласно нормам проектирования, составляет не менее 30 лет [1-5]. Конечная дата расчёта соответствовала 5 октября, когда глубина сезонного оттаивания грунта достигает максимального значения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тепловое воздействие трубопровода ежегодно изменяет естественное положение ВГММГ в основании (рис. 1), которое характеризует искомую границу раздела грунта на мёрзлый и талый. Определяя температурное поле основания расчётным методом, эту границу целесообразно визуализировать ежегодно на конечную расчётную дату 5 октября с помощью изотермы, соответствующей температуре начала замерзания грунта (табл. 2). Результатом будет являться ежегодная динамика изменения положения ВГММГ в основании трубопровода.

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА НА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛОЕ ОСНОВАНИЕ

На первом этапе исследования была смоделирована конструкция наземного трубопровода по традиционному способу прокладки в насыпи из грунта типа 1. Насыпь имела типовые размеры, расстояние от земли до оси трубы составляло 1 м, труба покрыта слоем пенополиуретана толщиной 0,05 м [1, 2, 3, 4]. Из фрагмента расчётной области на рис. 2 следует, что изменение положения ВГММГ имеет отрицательную динамику. Под воздействием данной конструкции, глубина сезонного оттаивания основания через 10 лет достигнет 2,8 м, что приведёт к существенному снижению его несущей способности и неизбежному самопогружению трубопровода в талый грунт уже на второй год эксплуатации. Переход трубопровода в плавучее состояние может иметь неблагоприятные последствия для окружающей среды.

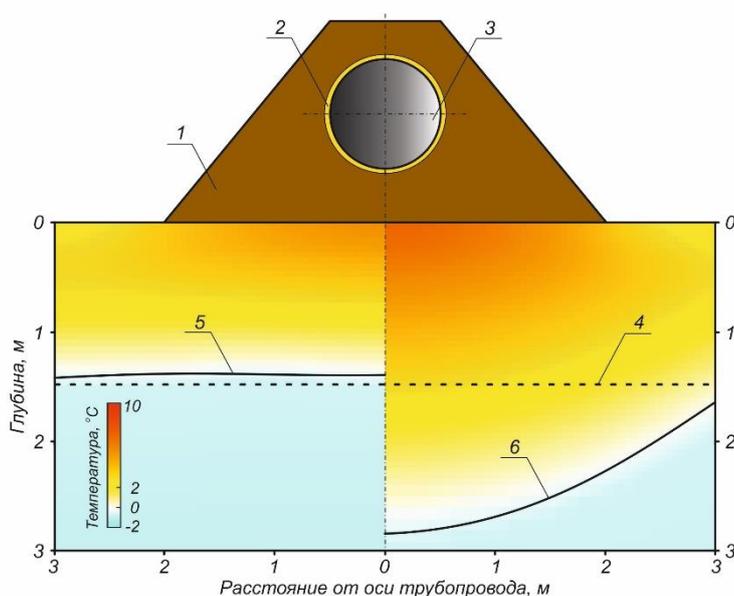


Рис. 2. Воздействие трубопровода в традиционной насыпи: 1 — Насыпь из грунта; 2 — Пенополиуретан; 3 — Трубопровод; 4, 5 и 6 — Естественное положение ВГММГ, через 2 года и 10 лет эксплуатации соответственно.

Температурное поле основания под воздействием предлагаемой конструкции трубопровода отражено на рис. 3. Динамика изменения ВГММГ сводится к постепенному понижению, в результате чего глубина сезонного оттаивания основания через 10 лет достигает 1,6 м. Хотя этот показатель почти в 1,8 раза ниже в сравнении с традиционным трубопроводом, предлагаемое решение недостаточно эффективно. Частичное погружение трубопровода и переход всей конструкции в плавучее состояние может произойти уже на 5-й год эксплуатации. В этой связи, потребуются дополнительные инженерные решения по обеспечению сохранения основания трубопровода в мёрзлом состоянии.

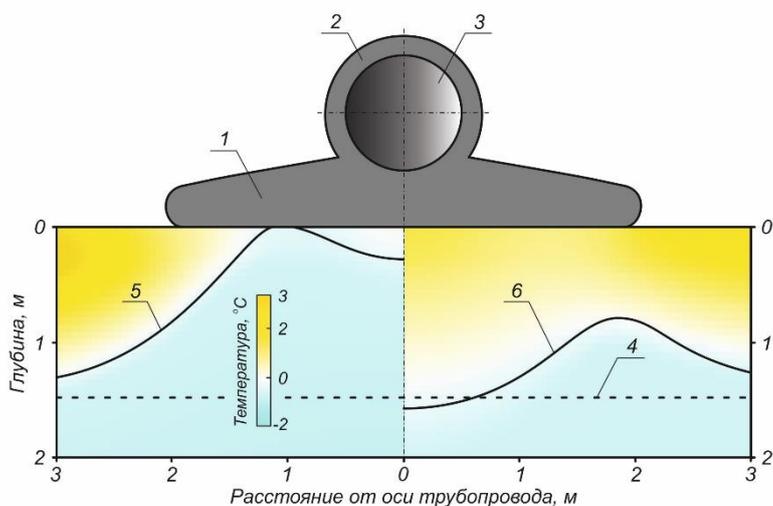


Рис. 3. Воздействие трубопровода на теплоизоляционной подушке: 1, 2 — Теплоизоляционная подушка и теплоизоляция трубопровода из гранулированной пеностеклокерамики соответственно; 3 — Трубопровод; 4, 5 и 6 — Естественное положение ВГММГ, через 2 года и 10 лет эксплуатации соответственно.

Как показывает анализ литературы за последние годы, устройство в насыпях вентилируемых каналов является одной из наиболее эффективных мер в данном направлении [17, 18, 19]. Вентиляция каналов осуществляется за счёт разницы положения входа и выхода воздуха по высоте. В результате естественной вентиляции канала зимой происходит дополнительное охлаждение насыпи и основания. Перекрытые в тёплое время года каналы не оказывают температурного воздействия на насыпь, оставаясь в виде закрытых воздушных полостей. Такие инженерные решения уже используются в строительстве транспортных сооружений на мерзлоте: автодорогах и нефтепроводах, доказав свою эффективность: [17, 18, 19].

Вход или выход канала может иметь устройство, усиливающее скорость потока воздуха через канал зимой. Например, дополнительная тяга в выходном канале может создаваться ветром с помощью специальной поворотной трубы [20], что может существенно усилить охлаждающий эффект. Оценить эффективность вентилируемых каналов, можно сравнив их тепловое взаимодействие в традиционной насыпи и в теплоизоляционной подушке, путём прогнозного компьютерного моделирования [12].

Благодаря накопленному опыту использования каналов диаметром 0,22 и 0,38 м [18, 19], в расчётах принимался усреднённый диаметр 0,3 м. С 1 мая по 30 сентября

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА НА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛОЕ ОСНОВАНИЕ

каналы рассматривались как замкнутые воздушные полости, которые расположены вдоль трубопровода и не сообщаются с атмосферой. В апреле и октябре температура воздуха в открытых каналах приравнивалась значениям таблицы 1 при усреднённой скорости 1 м/с. В наиболее холодные месяцы (с ноября по март) предполагалось, что воздух в каналах имел температуру  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Как показывает предварительный расчёт, положение канала на высоте 0,1 м от уровня земли при данной температуре является оптимальным.

На рис. 4 представлен результат расчёта температурного поля трубопровода в традиционной грунтовой насыпи с двумя симметрично расположенными вентилируемыми каналами. Расстояние от центральной оси до стенки канала принято равным его диаметру. Сравнивая положение ВГММГ с рис. 2 следует отметить существенный охлаждающий эффект каналов, т.к. глубина оттаивания грунта под трубопроводом снизилась в 1,6 раза. Несмотря на это, картина температурного поля через 10 лет эксплуатации трубопровода требует увеличения их числа до 4-х и более, что выходит за рамки данного исследования.

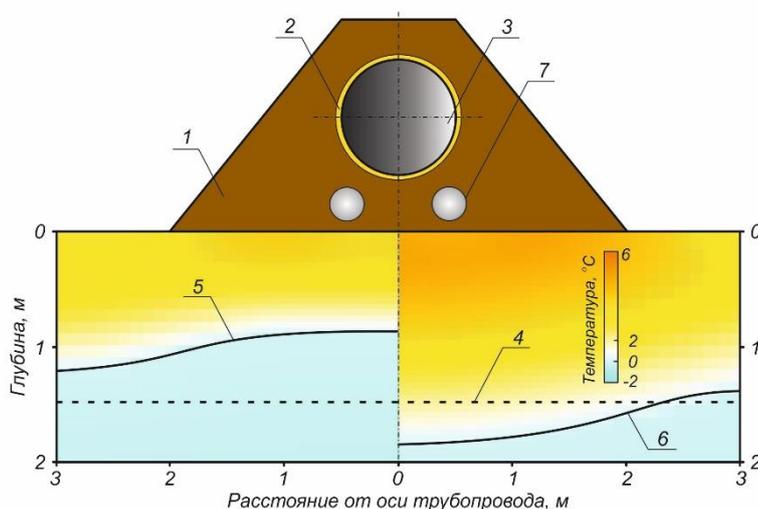


Рис. 4. Воздействие трубопровода в традиционной насыпи с вентиляционными каналами: 1 — Насыпь из грунта; 2 — Пенополиуретан; 3 — Трубопровод; 4, 5 и 6 — Естественное положение ВГММГ, через 2 года и 10 лет эксплуатации соответственно; 7 — Вентиляционный канал.

Максимально приближенное положение ВГММГ к подошве конструкции имеет вариант трубопровода на подушке из гранулированной пеностеклокерамики с двумя вентилируемыми каналами. Картина температурных полей на рис. 5 свидетельствует о том, что предложенные инженерные меры имеют высокий

охлаждающий эффект в совокупности. Благодаря этому, основание трубопровода сохраняется в мёрзлом состоянии на протяжении 30 лет эксплуатации.

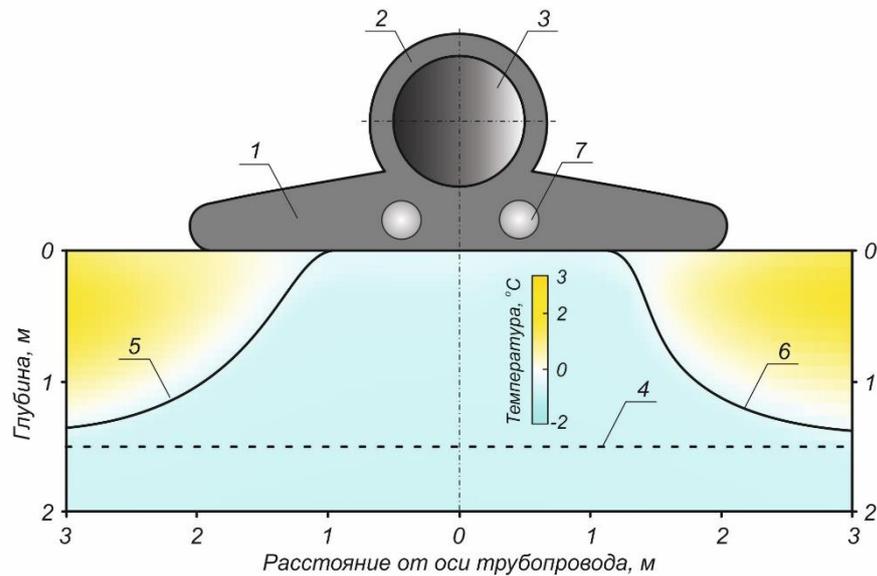


Рис. 5. Воздействие трубопровода на теплоизоляционной подушке с вентиляционными каналами: 1, 2 — Теплоизоляционная подушка и теплоизоляция трубопровода из гранулированной пеностеклокерамики соответственно; 3 — Трубопровод; 4, 5 и 6 — Естественное положение ВГММГ, через 2 года и 30 лет эксплуатации соответственно; 7 — Вентиляционный канал.

К недостаткам предложенной конструкции следует отнести: 1) ограничение длины каналов до нескольких десятков метров, каналы большей длины потребуют принудительной вентиляции зимой; 2) необходимость перекрывать каналы в тёплое время. Таким образом, большое число вентилируемых каналов потребует постоянного обслуживания, притом, что протяжённость мерзлотных участков трубопровода может достигать 1000 км и более. Тем не менее, задача по автоматизации системы вентиляции каналов с помощью спутникового управления, датчиков температуры, микроконтроллеров, солнечных батарей – не научная фантастика, а вызов современному уровню развития науки и технологий. Вызов, который позволит не только безопасно транспортировать природные богатства, но и сохранять хрупкую природу криолитозоны.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате компьютерного моделирования установлено, что максимальный охлаждающий эффект на основание трубопровода с температурой 15 °С оказывает использование теплоизоляционной подушки совместно с вентилируемыми каналами.

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА НА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛОЕ ОСНОВАНИЕ

Такой подход обеспечивает несущую способность основания за счёт его сохранения в мёрзлом состоянии в течение всего срока эксплуатации. Применение нового способа снижает техногенное воздействие на окружающую среду, способствует рациональному недропользованию, удешевляет строительство трубопроводов в криолитозоне. По истечении срока эксплуатации, конструкция может быть демонтирована без нанесения вреда окружающей среде.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-0000-0007).

### Список литературы

1. Кутлыева З. Р., Гаррис Н. А., Глухов О. А. Расчёт регулируемого теплообмена наземного трубопровода в насыпи в режиме самопогружения с замёрзшей поверхностью // Транспорт, хранение нефти и газа, 2019, т. 17, № 5, с. 62-71.
2. Колоколова Н.А., Гаррис Н. А. О выборе способов прокладки трубопроводов в районах вечной мерзлоты // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2013, № 1, с. 13-17.
3. Гаррис Н.А., Закирова Э.А. Третий принцип использования мерзлых грунтов в качестве основания трубопроводов // Территория "Нефтегаз", 2017, № 5, с. 70-76.
4. Гаррис Н.А., Закирова Э.А. О постановке задач регулирования ореола протаивания вокруг трубопровода в районах распространения мерзлоты // Территория "Нефтегаз", 2017, № 1-2, с. 100-106.
5. Чехлов А.Н. Анализ путей повышения эффективности сооружения и эксплуатации магистрального нефтепровода в условиях распространения многолетнемёрзлых грунтов // Всероссийская научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт углеводородов», 2017 г., Омск, Россия, с. 83-87.
6. Makarov D.V., Manakova N.K., Suvorova O.V. Production of rock-based foam-glass materials (review). *Class and Ceramics*. 2023. 79. P. 411–416.
7. Yatsenko E.A. Goltsman V.M. Klimova L.V. Yatsenko L.A Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. 142. P.119–127.
8. Goltsman V.M., Yatsenko L.A., Goltsman N.S. Production of foam glass materials from silicate raw materials by hydrate mechanism. *Solid State Phenomena*. 2020. 299. P.293–298.
9. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Kaznacheev S.V., Zaharova E.A. Biostable silicic rock-based glass ceramic foams. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. 84(8). P.48–56.
10. Астапов А.П., Боровский В.В., Воронин А.С. Северо-Тюменская субпровинция кристобалитопаловых пород – уникальная минерально-сырьевая база Западно-Сибирского промышленного комплекса. *Вестник недропользователя*. 2004. № 14.
11. Колодезников К.Е. Цеолитоносные провинции востока Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 2003. 204 с.
12. Мельников В.П., Мельникова А.А., Аникин Г.В., Иванов К.С. Инженерные решения в строительстве на вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений // *Криосфера Земли*, 2014, т. XVIII, № 3, с. 82–90.
13. Мельников В.П., Мельникова А.А., Иванов К.С. Применение гранулированной пеностеклокерамики в арктическом строительстве малоэтажных зданий. *Арктика: экология и экономика*. 2022. № 2. С. 271–280.
14. СП 313.1325800.2017. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. Москва, Стандартинформ, 2018. 74 с.

15. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Москва, ФЦС, 2012. 120 с.
16. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Москва, ФЦС, 2015. 122 с.
17. Cheng G., Sun Z., Niu F. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai–Tibet railway engineering. *Cold Regions Science and Technology*. 2008. 53. P. 241–258.
18. Cao, Y.; Li, G.; Wu, G.; Chen, D.; Gao, K.; Tang, L.; Jia, H.; Che, F. Proposal of a New Method for Controlling the Thaw of Permafrost around the China–Russia Crude Oil Pipeline and a Preliminary Study of Its Ventilation Capacity. *Water*. 2021. 13. 2908.
19. Coulombe S., Fortier D., Stephani E. Using Air Convection Ducts to Control Permafrost Degradation Under Road Infrastructure: Beaver Creek Experimental Site, Yukon, Canada. 15th International Conference on Cold Regions Engineering. Canada, Quebec, 2012.
20. Пат. 2792466 РФ. Автономное охлаждающее устройство. Устьян Н.А. Заявл. 08.11.2022; опублик. 22.03.2023. Бюл. № 9.

## **WAYS TO REDUCE THE THERMAL IMPACT OF A PIPELINE ON PERMAFROST BASE**

*Ivanov K. S.*

*Institute of the Earth Cryosphere, Tyumen Scientific Center of Siberian Branch RAS, Tyumen,  
Russian Federation  
E-mail: sillicium@bk.ru*

Reducing the technogenic impact on permafrost soils and accident-free operation of engineering structures are pressing problems of environmental protection in the permafrost zone. One of the possible solutions to reduce the thermal impact on the permafrost zone when laying a pipeline on land could be the use of thermal insulation materials obtained from the raw materials and energy resources of the Far North and the Arctic. Localization of the production of building materials near objects under construction has not only an economic perspective, but also contributes to the rational use of natural resources and environmental conservation in the permafrost zone. An analysis of literary sources in recent years indicates a growth trend in new technologies for producing heat-insulating materials based on opal-cristobalite and zeolite rocks. It is widely known that their main deposits are located in the Arctic zone of our country, along with hydrocarbon deposits.

A method for laying a main pipeline above ground using thermal insulation made of granulated glass-ceramic foam obtained from local raw materials is proposed. The pipeline is laid on a heat-insulating pad made of bulk material in a geosynthetic shell, which reduces the thermal effect on the frozen base soil and does not disturb the vegetation cover of the permafrost zone. Replacing a traditional soil embankment with a heat-insulating material makes it possible to reduce the excavation work and soil transportation by 4 times due to the fact that the ratio of the volumes of finished material and raw materials for its production is 4:1. The purpose of the research was to assess the depth of thawing of the frozen base under the temperature influence of the pipeline on a heat-insulating pad.

As a result of computer modeling, it was established that the maximum cooling effect on the base of a pipeline with a temperature of 15 °C is provided by the use of a thermal insulation pad in conjunction with ventilated channels. This approach ensures the bearing

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА НА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛОЕ ОСНОВАНИЕ

capacity of the foundation by maintaining it in a frozen state throughout its entire service life. The use of a new method reduces the technogenic impact on the environment, promotes rational use of subsoil and natural resources, and reduces the cost of constructing pipelines in the permafrost zone. After its service life has expired, the structure can be dismantled without harming the environment.

**Keywords:** environmental safety, permafrost soil, heat-insulating material, construction, pipeline.

### References

1. Kutlyeva Z. R., Garris N. A., Glukhov O. A. Raschot reguliruyemogo teploobmena nazemnogo truboprovoda v nasypı v rezhime samopogruzheniya s zamorzshey poverkhnostyu (Calculation of controlled heat exchange of a ground pipeline in an embankment in self-immersion mode with a frozen surface). *Transport, storage of oil and gas*, 2019, vol. 17, pp. 62-71. (in Russian).
2. Kolokolova N.A., Garris N.A. O vybore sposobov prokladki truboprovodov v rayonakh vechnoy merzloty (On the choice of methods for laying pipelines in permafrost areas). *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2013, no. 1, pp. 13-17. (in Russian).
3. Garris N.A., Zakirova E.A. Tretiy printsip ispol'zovaniya merzlykh gruntov v kachestve osnovaniya truboprovodov (The third principle of using frozen soils as a foundation for pipelines). *Territory "Neftegaz"*, 2017, No. 5, pp. 70-76. (in Russian).
4. Harris N.A., Zakirova E.A. O postanovke zadach regulirovaniya oreola protaivaniya vokrug truboprovoda v rayonakh rasprostraneniya merzloty (On the formulation of tasks for regulating the thawing halo around the pipeline in areas of permafrost). *Territory "Neftegaz"*, 2017, no. 1-2, pp. 100-106. (in Russian).
5. Chekhlov A.N. Analiz putey povysheniya effektivnosti sooruzheniya i ekspluatatsii magistral'nogo nefteprovoda v usloviyakh rasprostraneniya mnogoletnemorzlykh gruntov (Analysis of ways to increase the efficiency of the construction and operation of a main oil pipeline in conditions of the spread of permafrost) All-Russian scientific and practical conference "Pipeline transport of hydrocarbons", 2017, Omsk, Russia, pp. 83-87. (in Russian).
6. Makarov D.V., Manakova N.K., Suvorova O.V. Production of rock-based foam-glass materials (review). *Class and Ceramics*, 2023, vol. 79, pp. 411-416.
7. Yatsenko E.A. Goltsman B.M. Klimova L.V. Yatsenko L.A Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, vol. 142, pp.119-127.
8. Goltsman B.M., Yatsenko L.A., Goltsman N.S. Production of foam glass materials from silicate raw materials by hydrate mechanism. *Solid State Phenomena*, 2020, vol. 299, pp.293-298.
9. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Kaznacheev S.V., Zaharova E.A. Biostable silicic rock-based glass ceramic foams. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 84(8). pp.48-56.
10. Astapov A.P., Borovskiy V.V., Voronin A.S. Severo-Tyumenskaya subprovintsiya kristobalite-opalovykh porod – unikalnaya mineralno-syryevaya baza Zapadno-Sibirskogo promyshlennogo kompleksa (The North Tyumen subprovince of cristobalite-opal rocks is a unique mineral resource base of the West Siberian industrial complex). *Vestnik nedropolzovatelya*, 2004, no. 14 (in Russian).
11. Kolodeznikov K.E. Tseolitonosnyye provintsiy vostochnoy Sibirskoy platformy (Zeolite-bearing provinces of the east of the Siberian Platform). *Novosibirsk: Nauka*, 2003, 204 p. (in Russian).
12. Melnikov V.P., Anikin G.V., Spasennikova K.A., Ivanov K.S. Engineering solutions for building on permafrost in perspective energy-efficient enhancement. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. 18(3), pp. 82-90.
13. Melnikov V.P., Melnikova A.A., Ivanov K.S. The use of granular foam-glass ceramic in the arctic construction of low-rise buildings. *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*, 2022, vol. 12(2). pp. 271-280.
14. SP 313.1325800.2017. Dorogi avtomobilnyye v rayonakh vechnoy merzloty. Pravila proyektirovaniya i stroitel'stva (Automobile roads in permafrost regions. Design and construction rules). *Moscow: Standartinform*, 2018, 74 p. (in Russian).
15. SP 25.13330.2012. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh (Bases and foundations on permafrost soils). *Moscow: FTSS*, 2012. 120 p. (in Russian).

16. SP 131.13330.2012 Stroitel'naya klimatologiya (Building climatology). Moscow: FTSS, 2015, 122 p. (in Russian).
17. Cheng G., Sun Z., Niu F. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai–Tibet railway engineering. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, vol. 53, pp. 241–258.
18. Cao, Y.; Li, G.; Wu, G.; Chen, D.; Gao, K.; Tang, L.; Jia, H.; Che, F. Proposal of a new method for controlling the thaw of permafrost around the China–Russia crude oil pipeline and a preliminary study of its ventilation capacity. *Water*, 2021, vol. 13, p. 2908.
19. Coulombe S., Fortier D., Stephani E. Using air convection ducts to control permafrost degradation under road infrastructure: Beaver Creek experimental site, Yukon, Canada. 15th International Conference on Cold Regions Engineering, Canada, Quebec, 2012.
20. Pat. 2792466 RF. Avtonomnoye okhlazhdayushcheye ustroystvo (Autonomous cooling device). Ustyan N.A. Zayavl. 08. 11.2022; opubl. 22.03.2023. Byul. № 9.

*Поступила в редакцию 25.04.2024 г.*