

ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ

[ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА]

pipemag.vniist.ru

Журнал
о передовых разработках
в сфере трубопроводного
транспорта

ВСТО006 NORD STREAM012 А.К.КОРТУНОВ020 РЕЗЕРВУАРЫ: ВЗГЛЯД С ПРИСТРАСТИЕМ030
СИСТЕМА КАТАЛОГИЗАЦИИ038 PLM-ТЕХНОЛОГИИ052 СТРОИТЕЛЬСТВО В ВЕЧНО-
МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ062 КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО
ГАЗОПРОВОДА: МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТОВ070 «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ» ВСТАВКИ090
СТРАХОВАНИЕ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ094 СМК098 ВЫСТАВКИ101

ISSN 1816-451X



9 771816 451775

№1 2007

(7) апрель

ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРУБОПРОВОДОВ, ПРОЛОЖЕННЫХ В ВЕЧНОМЕРЗЛОМ ГРУНТЕ



Н. Н. ХРЕНКОВ

Технический директор
ООО «Специальные
системы и технологии»,
Москва

УСПЕШНАЯ РАБОТА ОБОГРЕВАЕМОГО ТРУБОПРОВОДА ВО МНОГОМ СВЯЗАНА С ПРАВИЛЬНЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ И МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА.

Для надземных трубопроводов определение величины тепловых потерь не представляет больших сложностей, за исключением учета влияния опор, фланцев, задвижек и других фитингов. Основные расчетные зависимости, которые могут быть использованы для определения потерь, приведены в СП 41-103-2000 [1], хотя прямых указаний в отношении обогреваемых трубопроводов нормы не содержат. При этом под температурой окружающей среды понимается температура самой холодной пятидневки.

Значительно сложнее обстоит дело с подземными трубопроводами. В СП 41-103-2000 есть указание, что при расстоянии от поверхности грунта до оболочки трубопровода менее 0,7 м за расчетную температуру рекомендуется принимать температуру самой холодной пятидневки. Такой подход дает завышенные значения тепловых потерь, так как не учитывает термическое сопротивление грунта и термическую инерционность системы грунт-трубопровод.

В то же время для подземных трубопроводов, расположенных на большей, чем 0,7 м, глубине, за расчетную температуру окружающей среды следует принимать среднюю за год температуру грунта на глубине прокладки трубопровода. Однако эта рекомендация также представляется спорной, поскольку минимальная температура грунта в зимнее время на глубине заложения трубопровода заметно ниже средней за год температуры.

ОПЫТ ОБЩЕНИЯ СО СПЕЦИАЛИСТАМИ ПРОЕКТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ПОКАЗАЛ, ЧТО ПОД СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ГРУНТА ОНИ ЗАЧАСТУЮ ПОНИМАЮТ СТАБИЛЬНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ, КОТОРАЯ ИМЕЕТ МЕСТО НА ГЛУБИНЕ 10 М. ТАКИЕ РАСЧЕТЫ ДАЮТ ЗАНИЖЕННУЮ ВЕЛИЧИНУ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ.

В ДАННОЙ РАБОТЕ МЫ ПРОВОДИМ АНАЛИЗ ЕЖЕГОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТЕ, РАССМАТРИВАЕМ НЕСКОЛЬКО МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ОТ ПОДЗЕМНЫХ ОБОГРЕВАЕМЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И ПРЕДЛАГАЕМ МЕТОДИКУ УПРОЩЕННЫХ РАСЧЕТОВ.



ФОТО 1. Подготовка к опусканию трубопровода в траншею, проложенную в вечномёрзлом грунте

Особый интерес представляет расчет тепловых потерь от подземных трубопроводов, проложенных в зоне вечной мерзлоты. Одним из проектов предусматривалась прокладка подземного трубопровода в Ямало-Ненецком АО. Рассмотрим тепловые процессы, имеющие место в грунте данного региона.

В этом регионе вечномёрзлые грунты (ВМГ) имеют на глубине 10 м постоянную температуру -2°C [2]. Климатические параметры региона (Уренгой), согласно СНиП 23-01-99 [3], приведены в **ТАБЛИЦЕ 1а**. Среднемесячные температуры этого региона представлены в **ТАБЛИЦЕ 1б**.

Для того чтобы определить температурные параметры грунта и временную их зависимость, рассчитаем зависимость глубины промерзания и оттаивания от времени. Воспользуемся зависимостями, приведенными в СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах» [4] и в книге Ястребова [2]. Но прежде необходимо определить характеристики собственно грунтов. Их свойства зависят от состава, плотности, суммарной влажности, количества незамерзшей воды и температуры. По данным полевых исследований, грунты на трассе трубопровода отличаются заметным разнообразием. Мы выбрали два наиболее характерных типа грунтов: супеси и суглинки (**ТАБЛИЦА 2**).

ТАБЛИЦА 1а: КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕГИОНА (УРЕНГОЙ)

ПОКАЗАТЕЛЬ	Обозначение	Единицы	Значение
Средняя температура наиболее холодной пятидневки	T_5	$^{\circ}\text{C}$	-46
Среднегодовая температура	T_y	$^{\circ}\text{C}$	-7,8
Продолжительность периода отрицательных температур	t_{im}	дни	236
Средняя температура периода отрицательных температур	T_{im}	$^{\circ}\text{C}$	-16,8
Продолжительность периода положительных температур	t_{hm}	дни	129
Средняя температура периода положительных температур	T_{hm}	$^{\circ}\text{C}$	10,1
Теплота плавления льда	L_0	Дж/кг	334 000

ТАБЛИЦА 1б: СРЕДНЕМЕСЯЧНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕГИОНА (УРЕНГОЙ)

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$-26,4^{\circ}\text{C}$	$-26,4^{\circ}\text{C}$	$-19,2^{\circ}\text{C}$	$-10,3^{\circ}\text{C}$	$-2,6^{\circ}\text{C}$	$8,4^{\circ}\text{C}$	$15,4^{\circ}\text{C}$	$11,3^{\circ}\text{C}$	$5,2^{\circ}\text{C}$	$-6,3^{\circ}\text{C}$	$-18,2^{\circ}\text{C}$	$-24,0^{\circ}\text{C}$

ТАБЛИЦА 2: ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ (СУПЕСИ И СУГЛИНКИ)

ПОКАЗАТЕЛЬ	Обозначение	Единицы	Супесь	Суглинок
Влажность грунта суммарная	w_{tot}	д.е.	0,22	0,27
Влажность за счет незамерзшей воды	w_w	д.е.	0,05	0,09
Влажность на границе раскатывания	w_p	д.е.	0,13	0,17
Плотность сухого грунта	ρ_d	кг/м ³	1570	1460
Плотность грунта суммарная	ρ	кг/м ³	1910	1860
Температура начала замерзания грунта	T_{bf}	$^{\circ}\text{C}$	-0,2	-0,4
Температура грунта на глубине 10 м	T_0	$^{\circ}\text{C}$	-2,0	-2,0
Кэффициент теплопроводности талого грунта	λ_n	Вт/м $^{\circ}\text{C}$	1,62	1,39
Кэффициент теплопроводности мерзлого грунта	λ_z	Вт/м $^{\circ}\text{C}$	1,74	1,54
Теплоемкость объемная талого грунта	C_n	Дж/м ³ $^{\circ}\text{C}$	2 310 000	2 900 000
Теплоемкость объемная мерзлого грунта	C_z	Дж/м ³ $^{\circ}\text{C}$	2 140 000	2 120 000

Нас интересует процесс промерзания грунта. Согласно документу [4] рекомендуется такой подход для расчета нормативной глубины сезонного промерзания.

$$d_{jn} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f (T_{bf} - T_{jm}) \cdot t_{jm}}{L_0 (w_{tot} - w_w) \rho - 0,5 \cdot C_f (T_{jm} - T_{bf})}} \quad (1)$$

Расшифровка принятых в формуле обозначений показана в **ТАБЛИЦАХ 1а и 2**. Формула пригодна также для вычисления помесячного продвижения границы

промерзания. Кроме того, нас будет интересовать температура грунта на глубине сезонного промерзания и ближе к поверхности. Для этого нам необходимо определить глубину оттаивания грунта в летние месяцы. В нормах [4] приводятся выражения для определения глубины оттаивания:

$$d_{thn} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_h (T_{hc} - T_{bf})}{q_l} + \left(\frac{Q}{2 \cdot q_l}\right)^2} - \frac{Q}{2 \cdot q_l}, \quad (2)$$

где $Q = \left(0,25 - \frac{t_{hc}}{t_1}\right) \cdot (T_0 - T_{bf}) \cdot k_m \sqrt{\lambda_f \cdot C_f \cdot t_{hc}}$;

$$q_l = L_0 (w_{wet} - w_w) \rho + \left(\frac{t_{hc}}{t_2} - 0,1\right) \cdot [C_h (T_{hc} - T_{bf}) - C_f (T_0 - T_{bf})];$$

$$t_{hc} = 1,15 \cdot t_{hmn} + 0,1 \cdot t_1;$$

$$T_{hc} = 1,4 \cdot T_{hmn} + 2,4;$$

$$t_1 = 3600 \text{ ч} = 12 \ 960 \ 000 \text{ с}; \quad t_2 = 7500 \text{ ч} = 27 \ 000 \ 000 \text{ с};$$

k_m — коэффициент; $k_m = 1$ для песчаного грунта и $k_m = 4,55$ для глинистого.

Согласно приведенным формулам выполнен расчет глубины оттаивания и промерзания для обоих типов грунтов (таблица 3).

Глубина оттаивания одновременно является границей вечномерзлых грунтов (ВМГ). Имея данные о средних температурах всех зимних месяцев, мы можем определить характер промерзания грунта. Кроме глубины промерзания нас интересует температура мерзлого

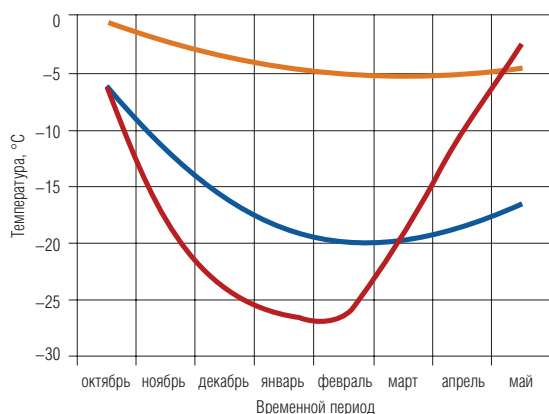


РИСУНОК 1. Ход промерзания супесчаного грунта

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:
 — $T_{глуб.пр}$ — температура на глубине промерзания;
 — $T_{пер}$ — средняя температура периода от начала отрицательных температур до данного месяца;
 — $T_{ср.мес}$ — средняя температура данного месяца

МЕСЯЦ	Дни от начала	Секунды от начала	$T_{ср}$ месяца	$T_{ср}$ периода	СУПЕСЬ		СУГЛИНОК	
					d_{thn}	$T_{мин}$ d_{thn}	d_{thn}	$T_{мин}$ d_{thn}
Октябрь	27	2 332 800	-6,3	-6,3	0,75	-0,58	0,69	-0,70
Ноябрь	57	4 924 800	-18,2	-12,15	1,42	-2,41	1,31	-2,48
Декабрь	88	7 603 200	-24	-16,14	1,99	-3,78	1,84	-3,78
Январь	119	10 281 600	-26,4	-18,73	2,46	-4,72	2,28	-4,67
Февраль	147	12 700 800	-26,4	-20,15	2,82	-5,21	2,61	-5,13
Март	178	15 379 200	-19,2	-19,99	3,09	-5,44	2,86	-5,36
Апрель	208	17 971 200	-10,3	-18,62	3,33	-5,21	3,05	-5,18
Май	236	20 390 400	-2,6	-16,57	3,56	-4,65	3,26	-4,66

ТАБЛИЦА 5: ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ ТИПА ГРУНТА И ГЛУБИНЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВМГ

ТИП ГРУНТА	Самая низкая T на глубине 1 м, °C	Глубина расположения ВМГ, м
Супесь	-12,3	2,67
Суглинок	-11,3	2,43

грунта, которую можно определить по формулам из [2].

$$T_g = m T_0 \left[1 - \exp \left(-z \sqrt{\frac{\pi \cdot C_f}{\lambda_f \cdot \tau_y}} \right) \cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{\tau_y} - z \sqrt{\frac{\pi \cdot C_f}{\lambda_f \cdot \tau_y}} \right) \right], \quad (3)$$

где z — глубина, отсчитываемая от границы ВМГ (вниз от ВМГ с +); T_g — температура мерзлого грунта на заданной глубине z ; τ_y — длительность года, равная 31 536 000 с; τ — время, отсчитываемое от начала наступления отрицательных температур; $m = 1,5 - 0,05 z$ для холодного периода и $m = 1$ для теплового периода.

На РИСУНКЕ 1 и в ТАБЛИЦЕ 4 показано, как постепенно промерзает грунт и как изменяется температура на границе промерзания. Минимум этой температуры достигается, как видно из графика и таблицы, в феврале-марте. Абсолютный минимум мы получим, согласно формуле (3), при $z = 0$, это будет температура на границе ВМГ. Для получения минимальной температуры на границе ВМГ в формулу (3) надо подставить значения: $\tau = 150$ дней и $z = 0$. Независимо от типа грунта на границе ВМГ минимальная температура в это время равна -5,6 °C.

ТАБЛИЦА 3: ГЛУБИНА ОТТАИВАНИЯ И ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ (СУПЕСЬ И СУГЛИНОК)

ТИП ГРУНТА	Глубина оттаивания, м	Глубина промерзания, м	Среднегодовая температура грунта, °C
Супесь	2,67	3,3	-5,16
Суглинок	2,43	3,1	-5,66

ТАБЛИЦА 4: ВРЕМЕННОЙ ХОД ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ (СУПЕСЬ И СУГЛИНОК)

Поскольку наш трубопровод будет заложен на глубине 1 м, то для расчета тепловых потерь нас интересует температура именно на этой глубине. В слое сезонного оттаивания, согласно книге Ястребова [2], изменение температуры можно считать линейным. Причем температурный градиент для этого слоя в зимние месяцы равен -4 °C.

В супеси уровень 1 м находится на расстоянии 1,67 м от ВМГ, а в суглинке на расстоянии 1,43 м. Соответственно изменение температуры составит 6,7 °C в первом случае и 5,7 °C во втором (ТАБЛИЦА 5).



ФОТО 2. Опускание трубопровода в траншею

Судя по представленным данным, температуры, близкие к минимальным, держатся достаточно стабильно не менее 2 месяцев. Именно они и должны браться в расчет при определении тепловых потерь от трубопроводов, проложенных в вечной мерзлоте. Эти температуры значительно ниже стабильной температуры вечной мерзлоты, измеряемой на глубине 10 м и равной $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также среднегодовой температуры грунта, определяемой по формуле (4), согласно нормам [4].

$$\bar{T} = \frac{(T_0 - T_{bf})}{\left(\frac{t_{thc} - 0,22}{t_i}\right)} \quad (4)$$

Полагая, что температура поверхности грунта равна средней февральской ($-20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), а на глубине 1 м равна $-12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, мы получаем, что каждый квадратный метр грунта как бы излучает по 5 Вт. Реально это поток холода, который расходуется на вымораживание еще незамерзшей воды.

В упомянутом выше проекте рассматривается трубопровод диаметром 377 мм с антикоррозионной защитой из полиэтилена, предварительно изолированный пенополиуретаном с оболочкой из полиэтилена. Наружный диаметр оболочки 563 мм. Если считать, что ось трубопровода находится на глубине 1 м, то верхняя часть оболочки будет находиться на расстоянии 0,72 м, а нижняя — 1,28 м от поверхности. В ТАБЛИЦЕ 6 показано различие в расчетных потерях в зависимости от того, какую температуру мы принимаем для грунта на глубине 1 м и какую расчетную схему используем.

Согласно нашим расчетам, минимальные температуры держатся в грунте довольно долго (около 2 месяцев). Поэтому в расчетах 1, 2 и 3 принималось, что на поверхности оболочки трубопровода темпера-

ТАБЛИЦА 6: ВРЕМЕННОЙ ХОД ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ (СУПЕСЬ И СУГЛИНОК)

УСЛОВИЯ РАСЧЕТОВ	СУПЕСЬ		СУГЛИНОК	
	Вт/м	Относительная величина	Вт/м	Относительная величина
Температура грунта около трубопровода: $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$	21	1	21	1
Средняя за год температура грунта:				
$-5,16\text{ }^{\circ}\text{C}$;	23,0	1,095		
$-5,66\text{ }^{\circ}\text{C}$			23,3	1,11
Температура грунта около трубопровода:				
$-12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$;	27,4	1,3		
$-11,3\text{ }^{\circ}\text{C}$			26,8	1,28
Температура поверхности грунта: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	28,4	1,35	28,0	1,33
Учет теплоизолирующих свойств грунта по формуле Форгеймера				
Температура поверхности трубы: для супеси — $-13,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; для суглинка — $-13,2\text{ }^{\circ}\text{C}$				

тура равна той минимальной температуре грунта, которая принята в данном расчете. Если принимать температуру грунта на глубине прокладки трубопровода равной значениям, полученным в результате довольно длительных расчетов, к тому же требующим знания свойств грунта, то величины потерь получаются на 30% большими по сравнению с расчетами, не учитывающими градиент температуры в верхнем слое грунта.

В расчетах 2 и 3 термическое сопротивление грунта учитывается опосредованно. В то же время оно может быть определено по формуле Форгеймера [1]:

$$R_{sp} = \frac{l}{2\pi\lambda_{sp}} \ln \left[\frac{2h}{D_{об}} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_{об}}\right)^2 - 1} \right], \quad (5)$$

где $D_{об}$ — диаметр оболочки трубопровода; h — расстояние от оси трубопровода до поверхности земли; λ_p — коэффициент теплопроводности грунта.

Термическое сопротивление грунта складывается с термическим сопротивлением тепловой изоляции. Расчеты по этой схеме не представляют сложности, а коэффициент теплопроводности грунта может быть определен по справочникам, тем более что его влияние незначительно. Основной вопрос при этих расчетах — какую температуру принимать за температуру воздуха над поверхностью грунта. Расчеты свойств вечномерзлых грунтов показали, что они обладают большой тепловой инерционностью и минимальный отрезок времени, который реально влияет на свойства грунтов, не может быть меньше месяца.

Как видно из **ТАБЛИЦЫ 4**, средняя температура периода в феврале и марте, когда глубина промерзания достигает максимальной величины, составляет около -20 °С. Именно это значение мы использовали при расчетах, в которых учитывалось термическое сопротивление грунта (расчет 4). Итоговые данные незначительно превосходят результаты, при получении которых использовалась расчетная температура грунта на глубине 1 м.

РАССМОТРЕННЫЙ ВЫШЕ ПОДХОД ПОЗВОЛИЛ УСТАНОВИТЬ СЛЕДУЮЩИЕ ВАЖНЫЕ МОМЕНТЫ: 1) процесс промерзания грунта даже в зоне вечной мерзлоты отличается большой постоянной времени, а с учетом того, что минимальные температуры держатся достаточно длительное время (около 2 месяцев), именно они и должны приниматься за основу при расчете величины тепловых потерь трубопроводов, проложенных в грунте; 2) температура грунта на глубине 1 м существенно ниже постоянной температуры вечномерзлых грунтов, наблюдаемой на глубине 10 м.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОМЕРЗАНИЯ. Для того чтобы лучше понять процесс промерзания грунта, рассмотрим этот процесс на модели нестационарного процесса промерзания, построенной с помощью программного комплекса ELCUT версия 5.1.

Как показывает анализ формул (1) и (2), процессы промерзания и оттаивания грунта существенно зависят от содержания влаги в грунте. При превращении воды в лед выделяется значительное количество тепла, которое тормозит процесс промерзания. Зависимость содержания не замерзшей воды в грунте от температуры можно оценить по **ТАБЛИЦЕ 1** обязательного приложения 1 к СНиП 2.02.04-88. В качестве опорных использованы данные полевых анализов, приведенные в **ТАБЛИЦЕ 2**. Результаты расчетов приведены в **ТАБЛИЦЕ 7**.

Моделирование процесса промерзания затрудняется эффектом выделения тепла при замерзании воды, содержащейся в грунте. Для учета этого явления мы использовали понятие условной теплоемкости грунта.

Согласно **ТАБЛИЦЕ 2**, в процессе промерзания грунта большая часть жидкой воды вымерзает, одновременно отдавая накопленное тепло сам грунт. Считаем, что этот процесс в основном происходит в диапазоне от 0 до -10 °С. В **ТАБЛИЦЕ 8** показаны значения, по которым определены величины условной теплоемкости грунта.

ТАБЛИЦА 7: ЗАВИСИМОСТЬ ДОЛИ ВЫМЕРЗАЮЩЕЙ ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТИПА ГРУНТА

ТЕМПЕРАТУРА ГРУНТА, °С	Супесь, д.в	Суглинок, д.в
0	0,22	0,27
-0,2	0,22	0,27
-0,4	0,15	0,27
-0,7	0,10	0,153
-1	0,085	0,13
-2	0,071	0,11
-3	0,066	0,103
-4	0,061	0,098
-6	0,057	0,094
-8	0,053	0,092
-10	0,05	0,09

ТАБЛИЦА 8: ЗНАЧЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЕЛИЧИНЫ УСЛОВНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГРУНТА

ТИП ГРУНТА	Плотность грунта, кг/м ³	Плотность сухого грунта, кг/м ³	Доля вымерзающей воды, д.в.	Масса вымерзающей воды, кг/м ³	Тепло, выделяемое при замерзании воды, кДж	Изменение теплоемкости грунта, кДж	Условная теплоемкость, Дж/кг·°С
Супесь	1910	1570	0,17	267	89 145	22 020	5820
Суглинок	1860	1460	0,18	263	87 775	24 667	6045

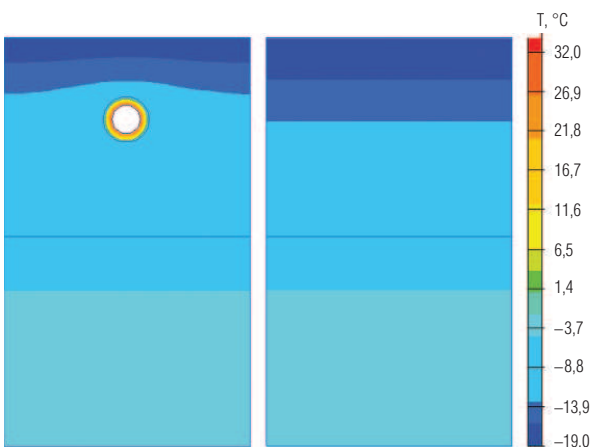


РИСУНОК 2. Характер промерзания супесчаного грунта в обычных условиях и при наличии обогреваемой трубы (моделирование с помощью комплекса ELCUT 5.1)

Величины условной теплоемкости, приведенные в **ТАБЛИЦЕ 8**, использованы в нестационарных моделях промерзания обоих типов грунтов. В качестве температуры поверхности грунта приняты значения средней температуры периода, достигаемые в марте (**ТАБЛИЦА 4**), а длительность периода промерзания принята равной 150 дням (от начала октября до начала марта). Значения температуры на уровне глубины промерзания также взяты из **ТАБЛИЦЫ 4**. Кроме того, для глубины 5 м по формуле (3) определена температура грунта для указанного периода. На **РИСУНКЕ 2** показан характер промерзания грунта в обычных условиях и при наличии на глубине 1 м обогреваемого трубопровода с температурой на внутренней поверхности 32 °С.



ФОТО 3. Технический директор ООО «Специальные системы и технологии» Н.Н.Хренков и заместитель директора по новой технике В.М.Есехин на трассе подземного трубопровода

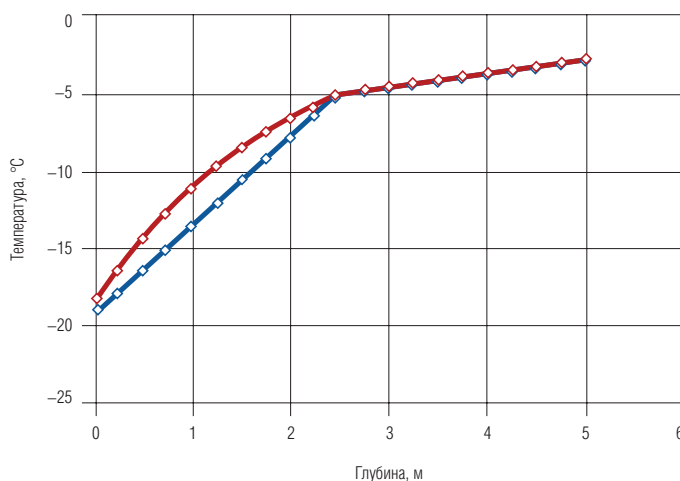


РИСУНОК 3. Изменение температуры по глубине грунта к середине марта

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:
 — в грунте обогреваемый трубопровод диаметром 377 мм (по оболочке 563 мм), ось трубы на глубине 1 м;
 — грунт без трубопровода

ВЫВОДЫ:

1. Рассмотрены три методики расчета тепловых потерь от обогреваемых трубопроводов, проложенных в вечномёрзлом грунте: в соответствии с рекомендациями СНиП 2.02.04-88, с использованием формулы Форгеймера и при помощи программного комплекса моделирования двумерных полей ELCUT.
2. Показано, что наиболее быструю (и немного завышенную) оценку величины потерь можно получить при использовании формулы Форгеймера, но при этом за температуру воздуха над поверхностью грунта следует принимать среднюю температуру периода от начала отрицательных температур до момента наиболее низких температур в грунте (обычно это середина марта).

3. При расчете тепловых потерь от трубопроводов, проложенных в вечномёрзлом грунте, недопустимо использовать стабильную температуру, наблюдаемую на больших глубинах, поскольку это приводит к занижению величины тепловых потерь примерно на 30%.
4. Аналитические расчеты по рекомендациям СНиП 2.02.04-88 и результаты моделирования на компьютерной модели дали практически одинаковые результаты. В то же время компьютерная модель дает наглядное представление о характере тепловых полей в грунте и около трубопровода.

На **РИСУНКЕ 3** показаны кривые изменения температуры супесчаного грунта по глубине, полученные с помощью программного комплекса ELCUT. Сопоставление **РИСУНКОВ 2 и 3** показывает, что наличие обогреваемого трубопровода заметно изменяет тепловую картину. Даже на расстоянии 1,5 м от центра трубы сказывается влияние трубопровода, о чем свидетельствуют кривые на **РИСУНКЕ 3**. На глубине 1 м и на расстоянии 1,5 м от центра трубы получено значение $-11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как для обычного грунта модель дает $-13,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Величина тепловых потерь трубопровода, полученная на модели (**РИСУНОК 2**), равна $27,7\text{ Вт/м}$, что очень хорошо согласуется с данными таблицы 6. При этом средняя температура на поверхности оболочки трубопровода составляет $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что ниже среднегодовой температуры грунта.

Зная основы построения тепловой модели, мы можем значительно точнее определить потери от трубопровода, проложенного в мерзлом грунте, характер тепловых полей в грунте и направление тепловых потоков. В этом состоит главное достоинство программного комплекса.

- [1] СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов.
- [2] Ястребов А.Л. Инженерные коммуникации на вечномёрзлых грунтах. Л.: Стройиздат, 1972.
- [3] СНиП 23-01-99 (2003). Строительная климатология.
- [4] СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах.