

Министерство нефтяной промышленности
ВНИСПТнефть

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ
ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ТРУБОПРОВОДОВ

РД 39-0147103-386-87

Министерство нефтяной промышленности

ВНИИСПТнефть

УТВЕРЖДЕН

заместителем начальника

Главтранснефти

Б. Х. Гилком

20 апреля 1987 года

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА

ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

ТРУБОПРОВОДОВ

ИД 39-0147103-386-87

1987

Изложенные в РД рекомендации составлены в соответствии с общепринятой классификацией типов грунтов (глинистые, суглинистые, супесчаные, песчаные), применяемой при проектировании инженерных сооружений.

Определение расчетного коэффициента теплопроводности приводится для грунтов в естественном состоянии, с учетом подошвы и водонасыщенности.

В основу РД легли материалы по обобщению и систематизации имеющихся в настоящее время теоретических и экспериментальных исследований как в области трубопроводного транспорта, так и механике грунтов, инженерной геологии и почвоведении.

РД разработан П.И. Тугуновым, Н.А. Гаррис, В.В. Новоселовым (Уфимский нефтяной институт), Н.М. Гостевым (ВНИИСПНефть), Н.А. Малиновым (Тюменский филиал Гипротрубопровода), Л.М. Бажером (Гипротрубопровод).

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Выбор расчетных значений коэффициента
теплопроводности грунта при проектировании
трубопроводов

РД 39 - 0147103 - 386 - 87

Вводится впервые

Срок введения установлен с 1.06.87
Срок действия до 1.06.90

Настоящие методические указания предназначены для определения расчетным путем коэффициента теплопроводности грунта для проектирования подземных магистральных трубопроводов при выполнении теплогидравлических расчетов. РД следует использовать при технико-экономическом обосновании и на стадии технического проектирования, когда достаточно полная информация по теплофизическим свойствам грунтов отсутствует.

РД предназначен для организаций Министерства нефтяной промышленности, занимающихся проектированием магистральных трубопроводов.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. По настоящей методике могут быть определены расчетным путем коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии λ_0 и эффективный коэффициент теплопроводности грунта $\lambda_{эф}$ для следующих технологических процессов: первоначальный

пуск трубопровода или возобновление перекачки после длительной остановки (λ_0); длительная эксплуатация трубопровода, когда грунт, окружающий трубопровод, вследствие прогрева изменил свои теплофизические свойства ($\lambda_{эф}$).

I.2. Расчетный способ определения λ_0 может быть применим в случае дефицита исходной информации и при невозможности определения λ_0 лабораторным путем.

I.3. Под минимальной исходной информацией понимается совокупность основных показателей: плотности ρ , массовой влажности ω и категории грунта. ρ и ω связаны между собой соотношением ($\rho_{ск}$ - плотность скелета грунта):

$$\rho_{ск} = \frac{100\rho}{100 + \omega} \quad (I)$$

I.4. Массовая влажность грунта ω выражает в процентах отношение массы воды, содержащейся в грунте, к массе скелета грунта (сухих твердых частиц); должна быть определена в соответствии с ГОСТ 5180-84.

I.5. Плотность грунта - масса его в единице объема, - должна быть определена в соответствии с ГОСТ 5180-84, ГОСТ 5131-78.

I.6. При рассмотрении варианта, когда трубопровод находится в эксплуатации длительное время, коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии не может быть принят в качестве расчетного λ_p по двум причинам:

а). В результате теплового влияния подземного трубопровода на окружающий его массив происходит миграция влаги и образование подсушенного слоя грунта вокруг трубопровода; эффективное значение $\lambda_{эф}$ всегда меньше λ_0 ;

б). В случае переувлажнения грунта из-за таяния снегового покрова, повышения уровня грунтовых вод и т.п. коэффициент тепло-

проводности грунта также меняется.

1.7 Для определения эффективного коэффициента теплопроводности грунта с учетом подсушки $\lambda_{эф}$ по настоящей методике необходима следующая исходная информация: категория грунта, его коэффициент теплопроводности в естественном состоянии λ_0 , температура грунта в ненарушенном тепловом состоянии на глубине заложения трубопровода T_0 , температура стенки трубопровода в рассматриваемом сечении $T_{ст}$.

1.8. В РД приняты следующие условные обозначения:

- λ_0 – коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии, Вт/(м·К);
- $\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·К);
- $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности грунта при температуре стенки трубопровода, Вт/(м·К);
- λ_p – расчетный коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·К);
- ω – массовая влажность грунта, %;
- ω_0 – массовая влажность грунта в естественном состоянии, %;
- ρ – плотность грунта, кг/м³;
- $\rho_{ск}$ – плотность скелета грунта, кг/м³;
- T_H – температура нефтепродукта в начальном сечении рассматриваемого участка трубопровода, К;
- T_K – температура нефтепродукта в конечном сечении рассматриваемого участка трубопровода, К;
- $T_{ст}$ – температура стенки трубопровода, К;
- T_0 – температура грунта на глубине заложения трубопровода в ненарушенном тепловом состоянии, К;
- h – глубина заложения трубопровода до верхней образующей, м;
- L – общая протяженность трассы трубопровода, м;

l - длина участка трубопровода с постоянным типом грунта, м.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА В ЕСТЕСТВЕННОМ СОСТОЯНИИ

При первоначальном пуске трубопровода или пуске после длительной остановки, когда система "трубопровод-грунт" находится в холодном состоянии, расчетный коэффициент теплопроводности грунта λ_p принимается равным коэффициенту теплопроводности грунта в естественном состоянии λ_0 .

2.1. Коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии рекомендуется определять по формуле СИБИИИСа

$$\lambda_0 = 116 [K_p^* (10^{-3} \rho + 0,1 \cdot \omega - 1,1) - 0,1 \omega]. \quad (2)$$

Здесь коэффициент $K_p^* = 1,5$ - для песка, $K_p^* = 1,4$ - для супесей, $K_p^* = 1,3$ - для суглинков и глин.

2.2. С учетом регионального расположения трассы проектируемого трубопровода коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии определяется по формуле

$$\lambda_0 = C_1 + C_2 \cdot \rho_{ск} \cdot \omega + C_3 \cdot \gamma_{ск}. \quad (3)$$

Эмпирические коэффициенты C_1 , C_2 и C_3 для некоторых регионов СССР приведены в таблице I.

Таблица I

Тип грунта	T > 273 K			ω , %	ρ , кг/м ³
	C_1	$C_2 \times 10^5$	$C_3 \times 10^4$		
I	2	3	4	5	6

Большеземельная тундра, Енисейский Север, Центральная Якутия,
север Западной Сибири

I	!	2	!	3	!	4	!	5	!	6
Суглинки и глины	-0,791	2,29		8,35		5...40		1200...1300		
Пески	-0,519	3,22		8,14		5...40		1200...1800		
Супеси	-0,210	3,72		5,32		5...40		1200...1800		
Забакайлье										
Глинистый	-0,516	1,85		7,64		3...40		1100...1600		
Песчаный	-0,776	3,17		9,18		2...20		1100...1600		
Тюменская область										
Песчаный	0,032	3,00		5,33		30...40		1370...1660		

2.3. Коэффициент теплопроводности торфа и за торфованных грунтов в естественном состоянии выбирается из табл. П.2.1.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА С УЧЕТОМ ПОДСУШКИ

В процессе эксплуатации подземного трубопровода при температуре перекачки нефти (нефтепродукта), превышающей температуру грунта, происходит теплоотдача. В результате грунт, окружающий трубопровод, прогревается, влага мигрирует, и вокруг трубы образуется слой подсушенного грунта. Коэффициент теплопроводности такого грунта уменьшается, что приводит к понижению эффективного (осредненного по сечению, перпендикулярному оси трубопровода) коэффициента теплопроводности грунта. Его величину следует определять в зависимости от интенсивности теплообмена.

3.1. Высокоинтенсивный теплообмен, $T_{ст} > 350$ К

Высокоинтенсивный теплообмен наблюдается при перекачке мазутов и других тяжелых остатков нефтепереработки при температурах выше 350 К. Грунт, прилегающий к трубе, при этом оказывается почти сухим. Эффективный коэффициент теплопроводности грунта определяется по формуле

$$\lambda_{эф} = \frac{\lambda_0 - \lambda_c}{Ln \frac{\lambda_0}{\lambda_c}} \quad (4)$$

Коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии λ_0 определяется на самое холодное время года. Определяется либо лабораторным путем, либо рассчитывается в соответствии с рекомендациями раздела 2.

Коэффициент теплопроводности сухого грунта λ_c определяется по справочным данным либо лабораторным путем.

Ориентировочно он может быть принят равным:

для глинистых грунтов	0,5...0,7 Вт/(м.К)	
для суглинистых грунтов	0,4...0,6 Вт/(м.К)	(5)
для супесчаных грунтов	0,3...0,5 Вт/(м.К)	
для песчаных грунтов	0,2...0,3 Вт/(м.К)	

3.2. Теплообмен средней интенсивности, $T_{ст} = 320...350$ К

Наблюдается, как правило, при перекачке высоковязких и высокозастывающих нефтей по подземным трубопроводам. Для данного случая рекомендуется формула (6), идентичная формуле (4), прошедшая достаточную экспериментальную проверку

$$\lambda_{ад} = \frac{\lambda_0 - \lambda_{ст}}{Ln \frac{\lambda_0}{\lambda_{ст}}} \quad (6)$$

В настоящее время надежных зависимостей, по которым можно было бы

рассчитать $\lambda_{ст}$ для различных типов грунтов, нет. Поэтому рекомендуется определять ориентировочно:

для глинистых грунтов	0,3...0,9 Вт/(м.К)	
для суглинистых грунтов	0,7...0,8 Вт/(м.К)	(7)
для супесчаных грунтов	0,6...0,7 Вт/(м.К)	
для песчаных грунтов	0,5...0,6 Вт/(м.К)	

3.3. Малоинтенсивный теплообмен, $T_{ст} < 320$ К

С точки зрения количественного учета – наиболее сложный случай. Практически, работе всякого магистрального трубопровода, по которому перекачивается нефть без предварительного подогрева, сопровождается малоинтенсивным теплообменом. Магистральные нефтепроводы – трубопроводы неавтономические, т.к. температура закачки нефти в трубу, как правило, отличается от температуры грунта в ненагретом тепловом состоянии. Кроме того, в результате выделение тепла трения на линейной части и при прохождении насосных агрегатов температура нефти может возрастать на пути следования на 30...40 К.

Температурный напор в таких случаях невелик. Но именно это положение обязывает учитывать механизм переноса влаги в грунте. Проведенные лабораторные исследования позволили установить, что для всех типов грунтов следует учитывать два механизма влагопереноса: капиллярный и пленочный.

Эффективный коэффициент теплопроводности грунта рекомендуется определять по формуле

$$\lambda_{эф} = \lambda_0 - C_2 \cdot \rho_{ск} \cdot b_w \frac{T_{ст} - T_0}{2} \quad (8)$$

Здесь $\lambda_0 = C_1 + C_2 \cdot \rho_{ск} \cdot \omega_0 + C_3 \cdot \rho_{ск}$ – коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии (см. раздел 2)

Для участка трубы большой протяженности температуру стенки трубы следует брать среднелогарифмическую

$$T_{ст} = T_0 + (T_H - T_K) / \ln \frac{T_H - T_0}{T_K - T_0} \quad (9)$$

При характере изменения температуры, близкому к линейному, то есть при $(T_H - T_0) / (T_K - T_0) \geq 2$, температуру стенки трубы допускается определять как среднеарифметическую

$$T_{ст} = 0,5 (T_H + T_K) \quad (10)$$

При этом коэффициент $\lambda_{эф}$, определенный при средней температуре стенки $T_{ст}$, будет средним на данном участке трубопровода.

Величину b_w — уменьшения влажности вокруг трубопровода, соответствующую приросту температуры на 1 К, — можно в приближенных расчетах принимать равной $b_w = 0,3 \% / \text{К}$.

3.3.1. Расчет коэффициента b_w с учетом механизма влагопереноса

Порядок расчета следующий:

3.3.1.1. Определяется коэффициент термовлагопроводности δ :

$$\delta = \sqrt{a_0 \cdot \omega_0^2 + a_1 \cdot \omega_0 + a_2} \quad (11)$$

Значения эмпирических коэффициентов, зависящих от механической структуры грунта, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Категория грунта	a_0	a_1	a_2
песчаный	- 0,000321	0,0122	- 0,00705
супесчаный	- 0,000483	0,0162	- 0,00997
суглинистый	- 0,000254	0,0105	- 0,00832
глинистый	- 0,000806	0,0187	- 0,0371

3.3.1.2. Выявляется механизм влагопереноса. Для этого определяется критическая влажность $\omega_{кр}$ разрыва капиллярности по (12) и сопоставляется с естественной влажностью ω_0 . При $\omega_0 \geq \omega_{кр}$ механизм влагопереноса капиллярный, при $\omega_0 < \omega_{кр}$ — пленочный.

$$\omega_{кр} = b_0 + b_1' \cdot T_0 + b_2' \cdot \rho \quad (12)$$

Эмпирические коэффициенты b_0, b_1, b_2' , зависящие от категории грунта, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Категория грунта	b_0	b_1'	b_2'
песчаный	1,881	0,203	- 0,0263
супесчаный	2,073	0,199	- 0,0271
суглинистый	0,439	0,257	- 0,0345
глинистый	8,714	0,282	- 0,0362

3.3.1.3. Рассчитывается коэффициент b_w по формуле (13):

$$b_w = \frac{2\delta(T_{ст} - T_0)}{(\alpha + 1)(T_{ст} - T_0) - b \cdot h} \quad (13)$$

Коэффициенты α, b зависят от механизма влагопереноса и категории грунта (см. табл. 4).

Таблица 4

Категория грунта	Механизм влагопереноса			
	$\omega_0 \geq \omega_{кр}$, капиллярный		$\omega_0 < \omega_{кр}$, пленочный	
	α	b	α	b
песчаный	1,690	8,49	1,766	17,15
супесчаный	1,912	11,03	1,871	18,98
суглинистый	1,602	7,64	1,576	15,63
глинистый	1,499	6,43	1,603	14,12

3.4. Примечание

Нижняя граница процесса подсушки определяется критическим градиентом $g_{кр} \sim T_{кр}$; а, следовательно, и критической разностью температур стенки трубопровода и грунта. В том случае, когда $(T_{ст} - T_0) < (T_{ст} - T_0)_{кр}$ подсушки грунта вокруг трубопровода не происходит, величину $\lambda_{эф}$ грунта можно принимать равной

$$\lambda_{эф} \geq \lambda_0 \quad (14)$$

Значения критической разности температур приведены в таблице 5 в зависимости от категории грунта.

Таблица 5

Категория грунта	$(T_{ст} - T_0)_{кр}$	
	механизм влагопереноса	
	капиллярный	плёночный
песчаный	14,3...19,7	26,9...35,8
супесчаный	14,5...19,4	26,2...34,9
суглинистый	15,2...20,3	27,6...37,0
глинистый	15,5...20,6	28,1...37,5

3.5. Определение $\lambda_{эф}$ при прокладке трубопровода в водонасыщенных грунтах

Для водонасыщенных грунтов значение $\lambda_{эф}$ не должно быть меньше λ_0 в естественном состоянии:

$$\lambda_{эф} \geq \lambda_0 \quad , \quad \text{при} \quad \omega_0 \geq \omega_{нас} \quad (15)$$

Для ориентировочных расчетов значение влажности насыщения ω_0 %, можно принимать по таблице 6.

Таблица 6

Объемная плотность ρ , кг/м ³								
1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Песчанистые породы								
52,3	-	-	37,7	33,5	29,0	24,7	21,2	17,7
Глинистые породы								
63	53,8	46,3	40,0	34,4	29,6	25,4	21,7	-

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА

4.1. Расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта определяется по формуле (16):

$$\lambda_p = \lambda_{эф} \cdot K_p \cdot K_{сн} \quad (16)$$

Здесь $K_p \cong 1,1$ - коэффициент резерва;

$K_{сн} = 1,1 \dots 1,3$ - коэффициент, учитывающий увеличение теплопроводности грунта в случае проталивания снегового покрова над трубой. Верхний предел берется для трубопроводов большого диаметра в интенсивном теплообмене. Нижний предел соответствует малоинтенсивному теплообмену.

4.2. Усреднение расчетного коэффициента теплопроводности для разных типов грунта, или для одного и того же грунта, но при разных температурах, по всей длине трассы трубопровода производится по формуле

$$\lambda_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} \cdot l_i \quad (17)$$

Здесь λ_{pi} - расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта для i -го участка;

n - число участков, на которых λ_p принимается постоянным.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ
РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА

ПРИМЕР I. Определить расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта в естественном состоянии, если известно, что протяженность трассы $80 \cdot 10^3$ м, из которых $30 \cdot 10^3$ м преобладающими грунтами являются глины, $20 \cdot 10^3$ м - суглинки, $10 \cdot 10^3$ м - пески. При этом, для глины: $\rho = 1400$ кг/м³, $\omega = 18$ %; для суглинки: $\rho = 1300$ кг/м³, $\omega = 15$ %; для супеси: $\rho = 1200$ кг/м³, $\omega = 12$ %; для песка: $\rho = 1600$ кг/м³, $\omega = 8$ %.

РЕШЕНИЕ I. Определяем расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта для каждого участка по формуле (2):

для глины

$$\lambda_{01} = 1,16 \left[1,3(1400 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 18 - 1,1) - 0,1 \cdot 18 \right] = 1,030 \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$$

для суглинки

$$\lambda_{02} = 1,16 \left[1,3(1300 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 15 - 1,1) - 0,1 \cdot 15 \right] = 0,823 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

для супеси

$$\lambda_{03} = 1,16 \left[1,4(1200 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 12 - 1,1) - 0,1 \cdot 12 \right] = 0,721 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

для песка

$$\lambda_{04} = 1,16 \left[1,5(1600 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 8 - 1,1) - 0,1 \cdot 8 \right] = 1,337 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

2. Определяем расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта в естественном состоянии для всей трассы трубопровода по формуле (17):

$$\lambda_0 = \frac{1,030 \cdot 30 \cdot 10^3 + 0,823 \cdot 20 \cdot 10^3 + 0,721 \cdot 10 \cdot 10^3 + 1,337 \cdot 20 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3} = 1,035 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

ПРИМЕР 2. Используя исходные данные и результаты расчета примера 1, определить эффективное значение коэффициента теплопроводности грунта для случаев высокоинтенсивного теплообмена и теплообмена средней интенсивности.

РЕШЕНИЕ.

I. Высокоинтенсивный теплообмен ($T_{ст} > 350 \text{ K}$)

I. Определяем эффективное значение коэффициента теплопроводности для каждого типа грунта по участкам. Расчет проводится по формуле (4) с учетом рекомендаций (5).

Для глины

$$\lambda_{эф1} = \frac{1,080 - 0,6}{L_n \frac{1,080}{0,6}} = 0,816 \text{ Вт/(м·К)};$$

для суглинки

$$\lambda_{эф2} = \frac{0,823 - 0,5}{L_n \frac{0,823}{0,5}} = 0,648 \text{ Вт/(м·К)};$$

для супеси

$$\lambda_{эф3} = \frac{0,721 - 0,4}{L_n \frac{0,721}{0,4}} = 0,544 \text{ Вт/(м·К)};$$

для песка

$$\lambda_{эф4} = \frac{1,337 - 0,25}{L_n \frac{1,337}{0,25}} = 0,727 \text{ Вт/(м·К)};$$

2. Определяем $\lambda_{эф}$ для всей трассы трубопровода

$$\lambda_{эф} = \frac{0,816 \cdot 30 \cdot 10^3 + 0,648 \cdot 20 \cdot 10^3 + 0,544 \cdot 10 \cdot 10^3 + 0,727 \cdot 20 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3} = 0,717 \text{ Вт/(м·К)}$$

П. Теплообмен средней интенсивности ($T_{ст} = 320 \dots 350 \text{ К}$)

1. Определяем $\lambda_{эф}$ по формуле (6) с учетом рекомендаций (7).
Расчет проводится по участкам.

Для глины

$$\lambda_{эф1} = \frac{1,000 - 0,85}{\ln \frac{1,000}{0,85}} = 0,960 \text{ Вт/(м·К)};$$

для суглинки

$$\lambda_{эф2} = \frac{0,823 - 0,75}{\ln \frac{0,823}{0,75}} = 0,786 \text{ Вт/(м·К)};$$

для супеси

$$\lambda_{эф3} = \frac{0,721 - 0,65}{\ln \frac{0,721}{0,65}} = 0,684 \text{ Вт/(м·К)};$$

для песка

$$\lambda_{эф4} = \frac{1,337 - 0,55}{\ln \frac{1,337}{0,55}} = 0,885 \text{ Вт/(м·К)}.$$

2. Определяем расчетное значение $\lambda_{эф}$ для всей длины трубопровода

$$\lambda_{эф} = \frac{0,960 \cdot 30 \cdot 10^3 + 0,786 \cdot 20 \cdot 10^3 + 0,684 \cdot 10 \cdot 10^3 + 0,885 \cdot 20 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3} =$$

$$= 0,853 \text{ Вт/м·К}$$

ПРИМЕР 3. Определить расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта при следующих исходных данных: район прохождения трассы – север Западной Сибири, протяженность рассматрива-

емого участка $L = 40 \cdot 10^3$ м, из которых $25 \cdot 10^3$ м - суглинки и глинн: $\rho = 1700$ кг/м³, $\omega = 13$ %; $15 \cdot 10^3$ м - супеси:

$\rho = 1500$ кг/м³, $\omega = 10$ %. Температура грунта в ненарушенном тепловом состоянии $T_0 = 276$ К. Температура нефти в начальном сечении трубопровода $T_H = 317$ К. Температура застывания нефти $T_3 = 288$ К. Глубина заложения трубопровода до верхней обрезающей $h = 0,8$ м.

При определении расчетного коэффициента теплопроводности грунта учесть возможное переувлажнение вследствие таяния снежного покрова.

РЕШЕНИЕ I. Принимаем условие, что температура нефти в конечном сечении рассматриваемого участка трубопровода должна быть на 5 К больше T_3 :

$$T_K = 288 + 5 = 293 \text{ К}$$

2. Определяем $T_{ст}$:

$$\frac{T_H - T_0}{T_K - T_0} = \frac{317 - 276}{293 - 276} = 2,4 > 2,$$

поэтому расчет $T_{ст}$ проводится по формуле (9).

$$T_{ст} = 276 + \frac{317 - 293}{\ln \frac{317 - 276}{293 - 276}} = 303,2 \text{ К.}$$

3. Выявляем возможный механизм влагопереноса вследствие подсушивания грунта. Для этого определяем $\alpha_{кр}$ по формуле (12) и табл. 2:

для суглинки и глины

Учитывая, что в исходных данных четко не разграничены суглинки и глины, эмпирические коэффициенты b_0 , b'_1 и b'_2 из табл. 3 принимаем для глинистого грунта. Подсушивание для глинистого грунта менее вероятно, чем для суглинистого, поэтому возможное отклонение в конечном результате идет в запас расчета.

$$\omega_{кр} = 8,714 + 0,282 \cdot 276 - 0,0362 \cdot 1700 = 25,0 \%$$

$\omega_{кр} = 25 \% > \omega_0 = 18 \%$ - возможен пленочный механизм влагопереноса;

для супеси

$$\omega_{кр} = 2,073 + 0,199 \cdot 276 - 0,027 \cdot 1500 = 16,3 \%$$

$\omega_{кр} = 16,3 \% > \omega_0 = 10 \%$ - возможен пленочный механизм влагопереноса.

4. Проверяем, происходит подсушивание грунта или нет. Для этого сопоставляем $(T_{ст} - T_0)$ с $(T_{ст} - T_0)_{кр}$. Критический градиент $(T_{ст} - T_0)_{кр}$ принимается по табл. 5 в зависимости от механизма влагопереноса.

$$(T_{ст} - T_0) = 303,2 - 276 = 27,2 \text{ К};$$

для суглинки и глины

$(T_{ст} - T_0)_{кр} = 28,1 \dots 37,5 \text{ К} > 27,2 \text{ К}$ - подсушивания грунта не будет;

для супеси

$(T_{ст} - T_0)_{кр} = 26,2 \dots 34,9 \text{ К}$. Значения $27,2 \text{ К}$ попадает в этот интервал температур. Следовательно, будет происходить подсушива-

ние грунта.

5. Определяем $\lambda_{эф}$ для участка трассы трубопровода, на котором преобладающими грунтами являются суглинки и глины. Учитывая, что подсушивания грунта здесь происходить не будет, принимаем $\lambda_{эф} = \lambda_0$. Коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии λ_0 определяем по формуле (3), при этом $\rho_{ск}$ находится по формуле (1).

$$\rho_{ск} = \frac{100 \cdot 1700}{100 + 18} = 1440 \text{ кг/м}^3$$

$$\lambda_{эф} = \lambda_0 = -0,791 + 2,29 \cdot 10^{-5} \cdot 1440 \cdot 18 + 8,35 \cdot 10^{-4} \cdot 1440 = 1,004 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

6. Расчетный коэффициент теплопроводности грунта λ_p для участка с суглинками и глинами находим по формуле (16)

$$\lambda_{p1} = 1,004 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,214 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Дальнейший расчет ведется для участка трассы трубопровода, на котором преобладают супеси.

7. Определяем коэффициент термсвлагопроводности δ по формуле (11). Эмпирические коэффициенты для супеси принимаются по табл.2.

$$\delta = \sqrt{20,000433 \cdot 10^2 + 0,0162 \cdot 10 - 0,00997} = 0,333 \text{ \% / К}$$

8. Определяем коэффициент b_w по формуле (13). Эмпирические коэффициенты a и b принимаются по табл.4.

$$b_w = \frac{2 \cdot 0,383(303,2 - 276)}{(1,871 + 1)(303,2 - 276) - 18,98 \cdot 0,8} = 0,331 \text{ \% / К}$$

9. Определяем коэффициент теплопроводности супеси в естественном состоянии по формуле (3), при этом $\rho_{ск}$ находится по формуле (1).

$$\rho_{ск} = \frac{100 \cdot 1500}{100 + 10} = 1363 \text{ кг/м}^3$$

$$\lambda_0 = -0,210 + 3,72 \cdot 10^{-5} \cdot 1363 \cdot 10 + 5,32 \cdot 10^{-4} \cdot 1363 = 1,022 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

10. Определяем эффективный коэффициент теплопроводности грунта для суглеси. Расчет проводится по формуле (8)

$$\lambda_{\text{эф}} = 1,022 - 3,72 \cdot 10^{-5} \cdot 1364 \cdot 0,331 \frac{303,2-276}{2} = 0,793 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

11. По формуле (16) определяем расчетный коэффициент теплопроводности для участка трассы, где преобладают суглеси

$$\lambda_{p2} = 0,793 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 0,959 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

12. Определяем расчетный коэффициент теплопроводности грунта для всей трассы трубопровода по формуле (17). Для этого используем результаты расчетов в пп. 6 и 11.

$$\lambda_p = \frac{1,214 \cdot 25 \cdot 10^3 + 0,959 \cdot 15 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3} = 1,118 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

Теплофизические характеристики торфа и за торфованных грунтов

Тип грунта	Степень затор- фован- ности, %	$\rho_{ск},$ кг/м ³	$\omega,$ %	$\lambda_{м},$ Вт/(м·к)	$\lambda_{г},$ Вт/(м·к)	$\alpha_{м} \cdot 10^6$ м ² /с	$\alpha_{г} \cdot 10^6$ м ² /с	$C_{м},$ кДж м ³ ·к	$C_{г},$ кДж м ³ ·к	Примеча- ние
Песчаные за- торфованные грунты	5	1600	5	0,70	0,60	0,50	0,40	1390	1400	T ₁ = 263 К T ₂ = 287 К
		1900		1,23	1,05	0,74	0,59	1660	1780	
		2100		1,75	1,33	0,95	0,68	1830	1960	
		2200	2,30	1,80	1,20	0,87	1920	2060	21	
		1100	10	0,70	0,60	0,65	0,26	1070		2260
		1600		1,23	1,05	0,79	0,37	1560		2840
		1300		1,75	1,33	0,99	0,67	1760		1990
		1900	2,30	1,80	1,24	0,83	1860	2170		
		1300	15	1,23	1,05	0,87	0,60	1410		1760
		1600		1,75	1,33	1,01	0,61	1730		2170
		1700		2,30	1,80	1,25	0,78	1840		2300
		1100	20	1,23	1,05	0,94	0,61	1310		1720
		1400		1,75	1,33	1,05	0,61	1660		2190
		1600		2,30	1,80	1,21	0,72	1900	2500	
		1000	25	1,23	1,05	0,95	0,59	1290	1780	
		1240		1,75	1,33	1,09	0,60	1600	2200	
		1400		2,30	1,80	1,27	0,72	1810	2490	

I	!	2	!	3	!	4	!	5	!	6	!	7	!	8	!	9	!	10	!	11
				1100		30		1,75		1,33		1,14		0,51		1549		2180		
				1300				2,30		1,87		1,26		1,14		1820		1580		
	20			1500		5		0,48		0,30		0,33		0,18		1470		1660		
				1800				0,80		0,58		0,45		0,29		1760		1990		
				1900				1,20		0,90		0,64		0,43		1860		2100		
				2000				1,65		1,28		0,85		0,58		1960		2200		
				1100		10		0,48		0,30		0,37		0,23		1310		1330		
				1500				0,80		0,58		0,45		0,32		1780		1810		
				1700				1,20		0,90		0,59		0,44		2020		2060		
				1800				1,65		1,28		0,80		0,55		2060		2330		
				1200		15		0,80		0,58		0,51		0,34		1580		1680		
				1300				1,20		0,90		0,61		0,43		1970		2100		
				1600				1,65		1,28		0,79		0,57		2100		2240		
				1070		20		0,80		0,58		0,53		0,34		1520		1720		
				1300				1,20		0,90		0,64		0,43		1860		2090		
				1500				1,65		1,28		0,77		0,52		2130		2470		
				1170		25		1,20		0,90		0,67		0,42		1780		2130		
				1300				1,65		1,28		0,83		0,54		1980		2370		
				1070		30		1,20		0,90		0,69		0,42		1740		2170		
				1230				1,65		1,28		0,82		0,51		2000		2490		
				1150		35		1,65		1,28		0,83		0,50		1990		2570		
	40			1340		5		0,32		0,25		0,23		0,12		1390		2150		
				1620				0,56		0,40		0,33		0,15		1680		2600		
				1700				0,86		0,63		0,49		0,23		1770		2750		

I	!	2	!	3	!	4	!	5	!	6	!	7	!	8	!	9	!	10	!	11
				2000				1,34		0,90		0,60		0,28		2070		3210		
				1000		10		0,32		0,25		0,25		0,16		1260		1530		
				1350				0,56		0,40		0,27		0,24		2050		1680		
				1520				0,86		0,63		0,45		0,27		1900		2310		
				1800				1,24		0,90		0,56		0,33		2200		2730		
				1340		15		0,86		0,63		0,44		0,26		1950		2430		
				1700				1,94		0,90		0,78		0,29		2480		3080		
				1100		20		0,56		0,40		0,33		0,21		1670		1920		
				1210				0,86		0,63		0,43		0,24		2020		2320		
				1500				1,24		0,90		0,50		0,31		2500		2880		
Глинистые за- торфованные	2			1600		5		0,43		0,34		0,16		0,12		2660		2840		
				2000				0,73		0,58		0,21		0,16		3530		3530		
грунты				1100		10		0,34		0,34		0,21		0,16		2000		2070		
				1600				0,73		0,58		0,24		0,19		2980		3010		
				1800				1,10		0,84		0,37		0,25		2990		3380		
				2000				1,46		1,15		0,39		0,29		3760		3950		
				900		15		0,33		0,34		0,24		0,18		1790		1880		
				1300				0,73		0,58		0,28		0,21		2580		2710		
				1600				1,10		0,84		0,36		0,35		3180		3300		
				1800				1,46		1,15		0,41		0,31		3570		3750		
				1100		20		0,73		0,58		0,32		0,23		2300		2520		
				1400				1,10		0,84		0,37		0,26		2930		3210		
				1600				1,46		1,15		0,44		0,31		3340		3670		
				1250		25		1,10		0,85		0,40		0,27		2740		3120		

I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
			I450		I,46	I,15	0,46	0,32	3180	3620	
			I300	30	I,10	0,84	0,37	0,23	2990	3590	
			I350		I,46	I,15	0,48	0,32	3060	3610	
			II00	40	I,46	I,15	0,58	0,33	2530	3440	
	20		I480	5	0,33	0,26	0,14	0,09	2350	2750	
			I810		0,60	0,45	0,21	0,13	2880	3370	
			I960		0,90	0,70	0,29	0,19	3110	3640	
			2040		I,28	0,98	0,39	0,26	3250	3790	
			1090	10	0,33	0,28	0,17	0,12	1970	2140	
			I480		0,60	0,45	0,22	0,15	2660	2910	
			I680		0,90	0,70	0,30	0,21	3040	3300	
			I800		I,28	0,98	0,39	0,28	3240	3540	
			860	15	0,33	0,26	0,19	0,15	1730	1780	
			I250		0,60	0,45	0,24	0,17	2510	2590	
			I480		0,90	0,70	0,30	0,23	2970	3060	
			I630		I,28	0,98	0,39	0,32	3280	3100	
			1080	20	0,60	0,45	0,25	0,19	2350	2400	
			I320		0,90	0,70	0,28	0,24	2870	2930	
			I480		I,28	0,98	0,30	0,30	3220	3280	
			II00	30	0,90	0,70	0,35	0,24	2600	2900	
			I250		I,28	0,98	0,43	0,30	2980	3310	
			1090	40	I,28	0,98	0,45	0,29	2830	2340	
			940	50	I,28	0,98	0,48	0,32	2640	3090	
	40		I360	5	0,28	0,20	0,14	0,73	2030	2730	

I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			I630		0,50	0,36	0,21	0,11	2420	3270	
			I750		0,74	0,58	0,28	0,16	2610	3510	
			2000		1,06	0,80	0,43	0,20	2480	4010	
			I010	10	0,28	0,20	0,16	0,09	1710	2130	
			I360		0,50	0,36	0,22	0,12	2310	2870	
			I540		0,74	0,58	0,28	0,18	2620	3250	
			I820		1,06	0,80	0,36	0,21	2910	3840	
			II00	15	0,50	0,36	0,24	0,15	2100	2440	
			I350		0,74	0,58	0,23	0,19	2580	2990	
			I670		1,06	0,80	0,33	0,22	3190	3700	
			I000	20	0,50	0,36	0,23	0,15	2140	2320	
			I350		0,74	0,58	0,28	0,20	2610	2950	
			I670		1,06	0,80	0,33	0,22	3250	3550	
Topφ			II00	25	0,74	0,58	0,29	0,19	2580	2990	
			I420		1,06	0,80	0,32	0,22	3310	3700	
			I320	30	1,06	0,80	0,32	0,24	3300	3340	
			II50	40	1,06	0,80	0,34	0,23	3150	3400	
			I010	50	1,06	0,80	0,35	0,22	3010	3650	
			500	100	0,88	0,60	0,43	0,23	2850	2600	
			I80	200	0,38	0,26	0,29	0,15	1290	1700	
			250	200	0,58	0,36	0,32	0,16	1800	2360	
			300	200	0,88	0,50	0,41	0,21	2150	2820	

I	1	2	1	3	1	4	:	5	1	6	1	7	1	8	1	9	1	10	1	11
			I20			300		0,38		0,26		0,32		0,16		1180		1630		
			I80			340		0,58		0,38		0,35		0,15		1670		2450		
			220			388		0,88		0,60		0,43		0,20		2050		2990		
			I40			400		0,58		0,38		0,36		0,15		1600		2490		
			30			500		0,88		0,60		0,85		0,37		1030		1600		

Индексы: м - мерзлый грунт
т - талый грунт

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ
ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ТРУБОПРОВОДОВ

РД 39-0147103-386-87

Издание ВНИИСПТнефти
450055, г.Уфа, пр.Октября, 144/3

Подписано к печати 28.05.87г. Ю8357

Формат 90х60/16. Уч.-изд.л. 1,4. Тираж 150 экз.

Заказ 94

Ротапринт ВНИИСПТнефти