Министерство нефтяной промышленности

ВНИИСПТнефть

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРУБОПРОВОДОВ

РД 39-0147103-386-87

1987

gost.e-ecolog.ru

Министерство нефтяной промышленности

ВНИИСПТнефть

УТВЕРЖДЕН

заместителем начальника
Главтранснефти
Б.Х.Галиком
20 апреля 1987 года

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРУБОПРОВОДОВ

РД 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 подсушки 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.К.Гостевым (ВНИИСПТнефть), Н.А.Малюшиным (Тюменский филиал Гипротрубопровода), Л.М.Бекзеровым (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.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. 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_o); длительная эксплуатация трубопровода, когда грунт, окружающий трубопровод, вследствие прогрева изменил свои теплофизические свойства ($\lambda_{эф}$).

I.2. Расчетный способ определения λ_o может быть применим в случае дефицита исходной информации и при невозможности определения λ_o 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):

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

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 5181-78.

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_ρ 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_o ;

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

проводности грунта также меняется.

I.7 Для определения эффективного коэффициента теплопроводности грунта с учетом подсушки $\lambda_{эф}$ по настоящей методике необходимо 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 $T_{ст}$.

I.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);

$\lambda_р$ – расчетный коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·К);

ω – массовая влажность грунта, %;

ω_0 – массовая влажность грунта в естественном состоянии, %;

ρ – плотность грунта, кг/м^3;

$\rho_{ск}$ – плотность скелета грунта, кг/м^3;

$T_н$ – температура нефтепродукта в начальном сечении рассматриваемого участка трубопровода, К;

$T_к$ – 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.I. Коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии рекомендуется определять по формуле СибЦНИИСа

$$\lambda_0 = 1{,}16\left[K_p^*\left(10^{-3}\cdot\rho + 0{,}1\cdot\omega - 1{,}1\right) - 0{,}1\omega\right]. \qquad (2)$$

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

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

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

Таблица I

Тип грунта	$T > 273$ К			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	-0,79I	2,29	8,35	5...40	I200...I300
Пески	-0,5I9	3,22	8,I4	5...40	I200...I800
Супеси	-0,2I0	5,72	5,32	5...40	I200...I800
		Забакайье			
Глинистый	-0,5I6	I,85	7,64	3...40	II00...I600
Песчаный	-0,776	3,I7	9,I8	2...20	II00...I600
		Тюменская область			
Песчаный	0,032	3,00	5,33	30...40	I370...I660

2.3. *Коэффициент теплопроводности торфа и заторфованных грунтов* в естественном состоянии выбирается из табл. П.2.I.

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.I. Высокоинтенсивный теплообмен, $T_{ст} \geq 350$ 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

$$\lambda_{эф} = \frac{\lambda_0 - \lambda_c}{\ln \frac{\lambda_0}{\lambda_c}} \qquad (4)$$

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

$$\lambda_{эф} = \frac{\lambda_0 - \lambda_{ст}}{\ln \frac{\lambda_0}{\lambda_{ст}}} \; . \qquad (6)$$

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, работа всякого магистрального трубопровода, по которому перекачивается нефть без предварительного подогрева, сопровождается малоинтенсивным теплообменом. Магистральные нефтепроводы – трубопроводы неизотермические, т.к. температура закачки нефти в трубу, как правило, отличается от температуры грунта в ненарушенном тепловом состоянии. Кроме того, в результате выделения 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

$$\lambda_{эф} = \lambda_0 - C_2 \cdot \rho_{ск} \cdot b_W \frac{T_{ст} - T_a}{2} . \qquad (8)$$

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

$$T_{ст} = T_0 + (T_н - T_к) / \ln \frac{T_н - T_0}{T_к - T_0} \cdot \qquad (9)$$

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

$$T_{ст} = 0{,}5 (T_н + T_к) . \qquad (10)$$

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

Величину b_{tW} – уменьшения влажности вокруг трубопровода, соответствующую приросту температуры на 1 К, – можно в прикидочных расчетах принимать равной $b_W \approx 0{,}3\ \% / К$.

3.3.1. Расчет коэффициента b_W с учетом механизма влагопереноса

Порядок расчета следующий:

3.3.1.1. Определяется коэффициент термовлагопроводности δ :

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

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.I.2. Выявляется механизм влагопереноса. Для этого определяется критическая влажность $\omega_{кр}$ разрыва капиллярности по (I2) и сопоставляется с естественной влажностью ω_0. При $\omega_0 \geq \omega_{кр}$ механизм влагопереноса капиллярный, при $\omega_0 < \omega_{кр}$ – пленочный.

$$\omega_{кр} = b_0 + b_1' \cdot T_0 + b_2' \cdot \rho. \qquad (I2)$$

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	I,88I	0,203	– 0,0263
супесчаный	2,073	0,I99	– 0,0271
суглинистый	0,439	0,257	– 0,0345
глинистый	8,7I4	0,282	– 0,0362

3.3.I.3. Рассчитывается коэффициент b_W по формуле (I3):

$$b_W = \frac{2\delta(T_{ст} - T_0)}{(a+1)(T_{ст} - T_0) - b \cdot h} \qquad (I3)$$

Коэффициенты a, 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	
	a	b	a	b
песчаный	I,690	8,49	I,766	I7,I5
супесчаный	I,9I2	II,03	I,87I	I8,98
суглинистый	I,602	7,64	I,376	I5,63
глинистый	I,499	6,43	I,603	I4,I2

3.4. Примечание

Нижняя граница процесса подсушки определяется критическим градиентом: $grad\,T_{кр}$; 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

$$\lambda_{эф}=\lambda_0 \qquad (14)$$

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	пленочный
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:

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

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								
62,3	-	-	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):

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

Здесь $K_p \cong 1{,}1$ – коэффициент резерва;

$K_{сн} = 1{,}1 \ldots 1{,}3$ – коэффициент, учитывающий увеличение теплопроводности грунта в случае протаивания снегового покрова над трубой. Верхний предел берется для трубопроводов большого диаметра и 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

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

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: ρ = 1400 кг/м^3, ω = 18 %; для суглинка: ρ = 1300 кг/м^3, ω = 15 %; для супеси: ρ = = 1200 кг/м^3, ω = 12 %; для песка: ρ = 1600 кг/м^3, ω = 8 %.

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

для глины

$$\lambda_{01} = 1{,}16 \left[1{,}3(1400 \cdot 10^{-3} + 0{,}1 \cdot 18 - 1{,}1) - 0{,}1 \cdot 18\right] = 1{,}080 \text{ Вт/м·К};$$

для суглинка

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

для супеси

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

для песка

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

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

$$\lambda_0 = \frac{1{,}080 \cdot 30 \cdot 10^3 + 0{,}823 \cdot 20 \cdot 10^3 + 0{,}721 \cdot 10 \cdot 10^3 + 1{,}337 \cdot 20 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3} =$$

$$= 1{,}095 \text{ Вт/(м·К)}.$$

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

РЕШЕНИЕ.

I. Высокоинтенсивный теплообмен ($T_{ст} > 350$ К)

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

Для глины

$$\lambda_{эф_1} = \frac{I,080 - 0,6}{\ln \frac{I,080}{0,6}} = 0,816 \text{ Вт/(м·К)};$$

для суглинка

$$\lambda_{эф_2} = \frac{0,823 - 0,5}{\ln \frac{0,823}{0,5}} = 0,648 \text{ Вт/(м·К)};$$

для супеси

$$\lambda_{эф_3} = \frac{0,72I - 0,4}{\ln \frac{0,72I}{0,4}} = 0,544 \text{ Вт/(м·К)};$$

для песка

$$\lambda_{эф_4} = \frac{I,337 - 0,25}{\ln \frac{I,337}{0,25}} = 0,727 \text{ Вт/(м·К)};$$

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

$$\lambda_{эф} = \frac{0,816 \cdot 30 \cdot I0^3 + 0,648 \cdot 20 \cdot I0^3 + 0,544 \cdot I0 \cdot I0^3 + 0,727 \cdot 20 \cdot I0^3}{80 \cdot I0^3} =$$

$$= 0,7I7 \text{ Вт/(м·К)}$$

II. Теплообмен средней интенсивности ($T_{ст}$=320...350 К)

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

Для глины

$$\lambda_{эф_1} = \frac{1,080 - 0,85}{\ln \frac{1,080}{0,85}} = 0,960 \text{ Вт/(м·К)};$$

для суглинка

$$\lambda_{эф_2} = \frac{0,823 - 0,75}{\ln \frac{0,823}{0,75}} = 0,786 \text{ Вт/(м·К)};$$

для супеси

$$\lambda_{эф_3} = \frac{0,721 - 0,65}{\ln \frac{0,721}{0,65}} = 0,684 \text{ Вт/(м·К)};$$

для песка

$$\lambda_{эф_4} = \frac{1,337 - 0,55}{\ln \frac{1,337}{0,55}} = 0,885 \text{ Вт/(м·К)}.$$

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

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

$$= 0,863 \text{ Вт/м·К}$$

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

емого участка L = 40·I0³м, из которых 25·I0³ м - суглинки и глины: ρ = I700 кг/м³, ω = I8 %; I5·I0 м - супеси: ρ = I500 кг/м³, ω = I0 %. Температура грунта в ненарушенном тепловом состоянии T_0=276 К. Температура нефти в начальном сечении трубопровода $T_н$=3I7 К. Температура застывания нефти $T_з$= 288 К. Глубина заложения трубопровода до верхней образующей 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 $T_з$:

$$T_к = 288 + 5 = 293 \text{ К}$$

2. Определяем $T_{ст}$:

$$\frac{T_н - T_0}{T_к - T_0} = \frac{3I7-276}{293-276} = 2,4 > 2,$$

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

$$T_{ст} = 276 + \frac{3I7 - 293}{\ln \frac{3I7-276}{293-276}} = 303,2 \text{ К}.$$

3. Выявляем возможный механизм влагопереноса вследствие подсушивания грунта. Для этого определяем $\omega_{кр}$ по формуле (I2) и табл. 2:

для суглинка 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. Проверим, 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.

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

для суглинка и глины

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

для супеси

$(T_{ст}-T_0)_{кр} = 26,2...34,9\ К$. Значение 27,2 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 $\lambda_{эф} = \lambda_o$. Коэффициент теплопроводности грунта в естественном состоянии λ_o определяем по формуле (3), при этом $\rho_{ск}$ находится по формуле (I).

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

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

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

$$\lambda_{р_1} = 1{,}004 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}1 = 1{,}214 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

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

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

$$\delta = \sqrt{20{,}00433 \cdot 10^2 + 0{,}0162 \cdot 10 - 0{,}00997} = 0{,}333 \text{ %/К}$$

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).

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

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

I0. Определяем эффективный коэффициент теплопроводности грунта для супеси. Расчет проводится по формуле (8)

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

II. По формуле (I6) определяем расчетный коэффициент теплопроводности для участка трассы, где преобладают супеси

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

I2. Определяем расчетный коэффициент теплопроводности грунта для всей трассы трубопровода по формуле (I7). Для этого используем результаты расчетов в пп. 6 и II.

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

Теплофизические характеристики торфа и заторфованных грунтов

Тип грунта	Степень заторфованности, %	$\rho_{ск}$, кг/м³	ω, %	$\lambda_м$ Вт/(м·К)	$\lambda_т$, Вт/(м·К)	$a_м \cdot 10^6$ м²/с	$a_т \cdot 10^6$ м²/с	$C_м$, кДж/(м³·К)	$C_т$, кДж/(м³·К)	Примечание
I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0	II
Песчаные заторфованные грунты	5	I600	5	0,70	0,60	0,50	0,40	I390	I400	T_1= 263 К
		I900		I,23	I,05	0,74	0,59	I660	I780	T_2= 287 К
		2I00		I,75	I,33	0,95	0,68	I830	I960	
		2200		2,30	I,80	I,20	0,87	I920	2060	
		II00	I0	0,70	0,60	0,65	0,26	I070	2260	
		I800		I,23	I,05	0,79	0,37	I560	2840	
		I300		I,75	I,33	0,99	0,67	I760	I990	
		I900		2,30	I,80	I,24	0,83	I860	2I70	
		I300	I5	I,23	I,05	0,87	0,60	I4I0	I760	
		I600		I,75	I,33	I,0I	0,6I	I730	2I70	
		I700		2,30	I,80	I,25	0,78	I840	2300	
		II00	20	I,23	I,05	0,94	0,6I	I3I0	I720	
		I400		I,75	I,33	I,05	0,6I	I660	2I90	
		I600		2,30	I,80	I,2I	0,72	I900	2500	
		I000	25	I,23	I,05	0,95	0,59	I290	I760	
		I240		I,75	I,33	I,09	0,60	I600	2200	
		I400		2,30	I,80	I,27	0,72	I8I0	2490	

I	2	3	4	5	6	7	8	9	IO	II
		II00	30	I.75	I,33	I,I4	0,8I	I540	2I80	
		I300		2,30	I,80	I,26	I,I4	I820	I580	
	20	I500	5	0,48	0,30	0,33	0,I8	I470	I660	
		I800		0,80	0,58	0,45	0,29	I760	1990	
		I900		I,20	0,90	0,64	0,43	I860	2I00	
		2000		I,65	I,28	0,85	0,58	I960	2200	
		II00	I0	0,48	0,30	0,37	0,23	I3I0	I330	
		I500		0,80	0,58	0,45	0,32	I780	I8I0	
		I700		I,20	0,90	0,59	0,44	2020	2060	
		I800		I,65	I,28	0,80	0,55	2060	2330	
		I200	I5	0,80	0,58	0,5I	0,34	I580	I680	
		I500		I,20	0,90	0,6I	0,43	I970	2I00	
		I600		I,65	I,38	0,79	0,57	2I00	2240	
		I070	20	0,80	0;58	0,53	0,34	I520	I720	
		I300		I,20	0,90	0,64	0,43	I860	2090	
		I500		I,65	I,28	0,77	0,52	2I30	2470	
		II70	25	I,20	0,90	0,67	0,42	I780	2I30	
		I300		I,65	I,28	0,83	0,54	I980	2370	
		I070	30	I,20	0,90	0,69	0,42	I740	2I70	
		I230		I,65	I,28	0,82	0,5I	2000	2490	
		II50	35	I,65	I,28	0,83	0,50	I990	2570	
	40	I340	5	0,32	0:25	0,23	0,I2	I390	2I50	
		I620		0,56	0,40	0,33	0,I5	I680	2600	
		I700		0,86	0,63	0,49	0,23	I770	2750	

I	2	3	4	5	6	7	8	9	IO	II
		2000		I,34	0,90	0,60	0,28	2070	32IO	
		IOOO	IO	0,32	0,25	0,25	0,I6	I260	I530	
		I350		0,56	0,40	0,27	0,24	2050	I680	
		I520		0,86	0,63	0,45	0,27	I900	23IO	
		I800		I,24	0,90	0,56	0,33	2200	2730	
		I340	I5	0,86	0,63	0,44	0,26	I950	2430	
		I700		I.94	0,90	0,78	0,29	2480	3080	
		IIOO	20	0,56	0,40	0,33	0,2I	I670	I920	
		I2IO		0,86	0,63	0,43	0,24	2020	2320	
		I500		I,24	0,90	0,50	0,3I	2500	2880	
Глинистые за- торфованные	2	I600	5	0,43	0,34	0,I6	0,I2	2660	2840	
		2000		0,73	0,58	0,2I	0,I6	3530	3530	
грунты		IIOO	IO	0,34	0,34	0,2I	0,I6	2000	2070	
		I600		0,73	0,58	0,24	0,I9	2930	30IO	
		I800		I,IO	0,84	0,37	0,25	2990	3380	
		2000		I,46	I,I5	0,39	0,29	3760	3950	
		900	I5	0,33	0,34	0,24	0,I8	I790	I880	
		I300		0,73	0,58	0,28	0,2I	2580	27IO	
		I600		I,IO	0.84	0,36	0,35	3I80	3300	
		I800		I,46	I,I5	0,4I	0,3I	3570	3750	
		IIOO	20	0,73	0:58	0,32	0,23	2300	2520	
		I400		I.IO	0,84	0,37	0,26	2930	32IO	
		I600		I,46	I,I5	0,44	0,3I	3340	3670	
		I250	25	I,IO	0,85	0,40	0,27	2740	3I20	

I	I	2	I	3	I	4	I	5	I	6	I	7	I	8	I	9	I	IO	I	II
				I450				I,46		I,I5		0,46		0,32		3I80		3620		
				I300		30		I,IO		0,84		0,37		0,23		2990		3590		
				I350				I,46		I,I5		0,48		0,32		3060		36IO		
				IIOO		40		I,46		I,I5		0,58		0,33		2530		3440		
		20		I480		5		0,33		0,26		0,I4		0,09		2350		2750		
				I8IO				0,60		0,45		0,2I		0,I3		2880		3370		
				I960				0,90		0,70		0,29		0,I9		3II0		3640		
				2040				I,28		0,98		0,39		0,26		3250		3790		
				I090		IO		0,33		0,28		0,I7		0,I2		I970		2I40		
				I480				0,60		0,45		0,22		0,I5		2660		29IO		
				I680				0,90		0,70		0,30		0,2I		3040		3300		
				I800				I,28		0,98		0,39		0,28		3240		3540		
				860		I5		0,33		0,26		0,I9		0,I5		I730		I780		
				I250				0,60		0,45		0,24		0,I7		25IO		2590		
				I480				0,90		0,70		0,30		0,23		2970		3060		
				I630				I,28		0,98		0,39		0,32		3280		3IOO		
				IO80		20		0,60		0,45		0,25		0,I9		2350		2400		
				I320				0,90		0,70		0,28		0,24		2870		2930		
				I480				I,28		0,98		0,30		0,30		3220		3280		
				IIOO		30		0,90		0,70		0,35		0,24		2600		2900		
				I250				I,28		0,98		0,43		0,30		2980		33IO		
				IO90		40		I,28		0,98		0,45		0,29		2830		3340		
				940		50		I,28		0,98		0,48		0,32		2640		3090		
		40		I360		5		0,28		0,20		0,I4		0,78		2030		2730		

I	1 2	1 3	1 4	1 5	1 6	1 7	1 8	1 9	1 IO	1 II
		I630		0,50	0,36	0,2I	0,II	2420	3270	
		I750		0,74	0,58	0,28	0,I6	26I0	35I0	
		2000		I,06	0,80	0,43	0,20	2480	40I0	
		I0I0	I0	0,28	0,20	0,I6	0,09	I7I0	2I30	
		I360		0,50	0,36	0,22	0,I2	23I0	2870	
		I540		0,74	0,58	0,28	0,I8	2620	3250	
		I820		I.06	0,80	0,36	0,2I	29I0	3840	
		II00	I5	0,50	0,36	0,24	0,I5	2I00	2440	
		I350		0,74	0,58	0,23	0,I9	2580	2990	
		I670		I,06	0,80	0,33	0,22	3I90	3700	
		I000	20	0,5[illegible]	0,36	0,23	0,I5	2I40	2320	
		I350		0.74	0,58	0,28	0,20	26I0	2950	
		I670		I,06	0,80	0,33	0,22	3250	3550	
Торф		II0C	25	0,74	0,58	0,29	0,I9	2580	2990	
		I420		I,06	0,80	0,32	0,22	33I0	3700	
		I320	30	I,06	0,80	0,32	0,24	3300	3340	
		II50	40	I,06	0,80	0,34	0,23	3I50	3400	
		I0I0	50	I,06	0,80	0,35	0,22	30I0	3650	
		500	I00	0,88	0,60	0,43	0,23	2850	2600	
		I80	200	0,38	0,26	0,29	0,I5	I290	I700	
		250	200	0,58	0,38	0,32	0,I6	I800	2360	
		300	200	0,88	0,60	0,4I	0,2I	2I90	2820	

I	1	2	1	3	1	4	1	5	1	6	1	7	1	8	1	9	1	I0	1	II
				I20		300		0,38		0,26		0,32		0,I6		II80		I630		
				I80		340		0,58		0,38		0,35		0,I5		I670		2450		
				220		389		0,88		C,60		0,43		0,20		2050		2990		
				I40		400		0,58		0,38		0,36		0,I5		I60C		2490		
				90		500		0,88		0,60		0,85		0,37		I030		I600		

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. Ю06357
Формат 90х60/16. Уч.-изд.л. 1,1. Тираж 150 экз.
Заказ 94

Ротапринт ВНИИСПТнефти

gost.e-ecolog.ru