

Министерство нефтяной промышленности
ВНИИСПТнефть

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ
ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ТРУБОПРОВОДОВ

РД 39-0147103-386-87

Министерство нефтяной промышленности
ВНИИСПНефть

УТВЕРЖДЕН
заместителем начальника
Главтранонефти
Б.Х.Гилалом
20 апреля 1987 года

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ
ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ТРУБОПРОВОДОВ

ЕД 39-0147103-386-87

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. Тулуновым, Н.А. Гаррис, В.В. Новоселовым (Уфимский нефтяной институт), Н.М. Гостевым (ВНИИСПНефть), Н.А. Ивочкиным (Тюменский филиал Гипротрубопровода), И.М. Бажжером (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 прогресса изменил свои теплофизические свойства ($\lambda_{зф}$).

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

1.3. 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):

$$\rho_{ск} = \frac{100\rho}{100 + \omega} \quad (1)$$

1.4. 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.

1.5. Плотность грунта - масса его в единице объема, - должна быть определена в соответствии с ГОСТ 5180-84, ГОСТ 5181-78.

1.6. 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 $\lambda_{зф}$ 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 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 $T_{ст}$.

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_e .

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

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

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

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

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		-0,79I		2,29		8,35		5...40		I200...I300
Пески		-0,5I9		3,22		8,14		5...40		I200...I800
Супеси		-0,2I0		3,72		5,32		5...40		I200...I800
Забайкалье										
Глинистый		-0,5I6		I,85		7,64		3...40		II00...I600
Песчаный		-0,776		3,17		9,18		2...20		II00...I600
Тимевская 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.2.1.

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 труб 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

$$\lambda_{сп} = \frac{\lambda_0 - \lambda_c}{\ln \frac{\lambda_0}{\lambda_c}} \quad (4)$$

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

$$\lambda_{сп} = \frac{\lambda_0 - \lambda_{ст}}{\ln \frac{\lambda_0}{\lambda_{ст}}} \quad (6)$$

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, работа всякого магистрального трубопровода, по которому перекачивается нефть без предварительного подогрева, сопровождается малоинтенсивным теплообменом. Магистральные нефтепровода – трубопроводы неадиабатические, т.к. температура закачки нефти в трубу, как правило, отличается от температуры грунта в ненарушенном 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 труб 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 среднелинейную

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

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):

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

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	18,48
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 $\lambda_{зр}$ грунта можно принимать равной

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

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	плотный
песчаный	14,9...19,7	26,9...36,8
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 $\lambda_{зр}$ при прокладке трубопровода в водонасыщенных грунтах

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

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

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
52,3	-	-	37,7	33,5	29,0	24,7	21,2	17,7
63	53,8	46,3	40,0	34,4	29,6	25,4	21,7	-
Песчаные породы								
Глинистые породы								

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: $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$, $\omega = 18 \%$; для суглинки: $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$, $\omega = 15 \%$; для супеси: $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$, $\omega = 12 \%$; для песка: $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$, $\omega = 8 \%$.

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

для глины

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

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):

$$\lambda_0 = \frac{1,080 \cdot 30 \cdot 10^3 + 0,823 \cdot 20 \cdot 10^3 + 0,721 \cdot 10 \cdot 10^3 + 1,337 \cdot 20 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3} = 1,085 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

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 ($T_{ст} > 350 \text{ K}$)

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

Для глины

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

для суглинки

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

для супеси

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

для песка

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

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

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

II. Теплообмен средней интенсивности ($T_{\text{ср}} = 320 \dots 350 \text{ K}$)

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

Для глины

$$\lambda_{\text{эф1}} = \frac{1,090 - 0,85}{\ln \frac{1,090}{0,85}} = 0,960 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)};$$

для суглинки

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

для супеси

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

для песка

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

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

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

$$= 0,863 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

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 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)

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

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

7. Определяем коэффициент термостойкости δ по формуле (II). 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.

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

Теплофизические характеристики торфа и за торфованных грунтов

Тип грунта	Степень за тор- фован- ности, %	$\rho_{ск},$ кг/м ³	$\omega,$ %	$\lambda_m,$ Вт/(м·к)	$\lambda_r,$ Вт/(м·к)	$\alpha_m \cdot 10^6$ м ² /с	$\alpha_r \cdot 10^6$ м ² /с	$C_m,$ Дж м ³ ·К	$C_r,$ Дж м ³ ·К	Примеча- ние
Постоянные 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
						30		1.75		1.33		1.14		0.61		1540		2180		
								2.30		1.80		1.26		1.14		1820		1580		
	20					5		0.48		0.30		0.33		0.18		1470		1660		
								0.80		0.58		0.45		0.29		1760		1990		
								1.20		0.90		0.64		0.43		1860		2100		
								1.65		1.28		0.85		0.58		1960		2200		
						10		0.48		0.30		0.37		0.23		1310		1330		
								0.80		0.58		0.45		0.32		1780		1810		
								1.20		0.90		0.59		0.44		2020		2060		
								1.65		1.28		0.80		0.55		2060		2330		
						15		0.80		0.58		0.51		0.34		1580		1680		
								1.20		0.90		0.61		0.43		1970		2100		
								1.65		1.38		0.79		0.57		2100		2240		
						20		0.80		0.58		0.53		0.34		1520		1720		
								1.20		0.90		0.64		0.43		1860		2090		
								1.65		1.28		0.77		0.52		2130		2470		
						25		1.20		0.90		0.67		0.42		1780		2130		
								1.65		1.28		0.83		0.54		1980		2370		
						30		1.20		0.90		0.69		0.42		1740		2170		
								1.65		1.28		0.82		0.51		2000		2490		
						35		1.65		1.28		0.83		0.50		1990		2570		
	40					5		0.32		0.25		0.23		0.12		1390		2150		
								0.56		0.40		0.33		0.15		1680		2600		
								0.86		0.63		0.49		0.23		1770		2750		

	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
			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	2930	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	I	2	I	3	I	4	I	5	I	6	I	7	I	8	I	9	I	10	I	11
				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		
				1800				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		2250		2400		
				I320				0,90		0,70		0,28		0,24		2870		2930		
				I480				I,28		0,98		0,30		0,30		3220		3280		
				1100		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	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	
		1010	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	
		1100	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	
		1000	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	
Topf		1100	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	
		1150	40	1,06	0,80	0,34	0,23	3150	3400	
		1010	50	1,06	0,80	0,35	0,22	3010	3650	
		500	100	0,88	0,60	0,43	0,23	2850	2600	
		180	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	0,60	0,41	0,21	2150	2820	

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	120	300	0,38	0,26	0,32	0,16	1180	1630		
	180	340	0,58	0,38	0,35	0,15	1670	2450		
	220	369	0,88	0,60	0,43	0,20	2050	2990		
	140	400	0,58	0,38	0,36	0,15	1600	2490		
	90	500	0,88	0,60	0,85	0,37	1030	1600		

Индекс: м - мерзлый грунт

г - талый грунт

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ
ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ТРУБОПРОВОДОВ
ИД 39-0147103-386-87

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

Подписано к печати 28.05.87г. ПО6357
Формат 90х60/16. Уч.-изд.л. 1,4. Тираж 150 экз.
Заказ 94

Ротапринт ВНИСПТнефти