МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Всесоюзный научно-исследовательский институт
по строительству магистральных трубопроводов

·ВНИИСТ·

РУКОВОДСТВО

ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Р 486 -83

Москва 1984

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.643.001.624.19(204.1(211-17)

В Руководстве изложена методика прогнозирования теплового взаимодействия трубопроводов с окружающей средой при их строительстве и эксплуатации. Методика позволяет прогнозировать как изменение естественного температурного режима грунтов трассы в полосе строительства, так и нарушенного в процессе эксплуатации трубопровода.

Данная работа является продолжением исследований, опубликованных в 1975 г. в виде Руководства по прогнозированию теплового взаимодействия трубопроводов с вечномерзлыми грунтами. Р 191-75 (М., ВНИИСТ, 1975).

В связи с необходимостью проведения большого объема вычислений при проектировании совместно с институтом ВНИИгаздобыча была разработана программа расчета на ЭВМ, которая апробирована в проектных институтах Мингазпрома, а Инструкция по пользованию программой была издана в 1981 г. в виде специального "Руководства по прогнозированию теплового взаимодействия газопроводов с окружающей средой на ЭВМ" Р 409-80 (М., ВНИИСТ, 1981).

Настоящее Руководство разработано отделом трубопроводов, сооружаемых в особых условиях (ООУ) ВНИИСТа, и предназначено для научных и инженерно-технических работников научных проектных и строительных организаций Миннефтегазстроя, Мингазпрома и Миннефтепрома СССР и других ведомств.

Руководство составлено В.В. Спиридоновым и А.С. Шуриковым.

Все замечания и предложения просьба направлять по адресу: Москва, 105058, Окружной проезд, 19, ВНИИСТ, отдел трубопроводов, сооружаемых в особых условиях.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ), 1984

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящее Руководство распространяется на проектирование магистральных трубопроводов различного целевого назначения (газопроводы, нефтепроводы, конденсатопроводы, водопроводы сооружаемых в различных районах, в том числе в районах распространения вечномерзлых грунтов и для всех применяющихся в настоящее время конструктивных систем прокладок (надземная, наземная, подземная, подводная).

I.2. Проектирование магистральных трубопроводов следует выполнять в соответствии с действующими нормативными документами на основании:

прогноза их теплового взаимодействия трубопроводов с окружающей средой;

изменения параметров мерзлотно-грунтовых условий трассы в результате строительства и всего периода эксплуатации сооружения;

рекультивации осваиваемых территорий.

I.3. Руководство разработано в развитие глав:

СНиП II-45-75 "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования";

СНиП II-37-76 часть II "Газоснабжение, внутренние и наружные устройства. Нормы проектирования";

СНиП II-31-74 "Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Нормы проектирования";

СНиП II-18-76 часть II "Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Нормы проектирования".

I.4. Проектирование трубопроводов (выбор конструкций, материалов, методов строительства, технологии эксплуатации) в

Внесено ОСУ ВНИИСТа	Утверждено ВНИИСТом 12 ноября 1982 г.	Срок введения 1 марта 1984 г.

зонах вечной мерзлоты следует осуществлять исходя из оптимальных решений, удовлетворяющих температурным ограничениям трубопроводных систем и окружающей среды.

Расчетные температуры трубопровода, определяемые с помощью настоящего Руководства и на основании требований строительства и эксплуатации, необходимы для обеспечения:

оптимальных напряжений в металле труб;

сохранения изоляционных покрытий;

сохранения хладостойкости металла труб;

взаимодействия трубопроводов с окружающей средой.

I.5. Настоящее Руководство предназначено для расчетов тепловых режимов трубопроводов, работающих в нестационарных условиях и взаимодействующих с окружающей средой (атмосферой, гидросферой, грунтовой толщей).

Только на основании расчета нестационарности процессов теплообмена трубопровода с окружающей средой, подверженной сезонным изменениям климатических условий, можно прогнозировать:

скорости образования ореолов оттаивания и промерзания грунтов в основании подземных и наземных трубопроводов;

динамику нарастания и разрушения льда на подводных и надземных трубопроводах, транспортирующих продукт с отрицательной температурой по шкале Цельсия.

I.6. Температурные воздействия окружающей среды на трубопровод следует определять в соответствии с главами:

СНиП II-А.6-72 "Строительная климатология и геофизика";

СНиП II-45-75 "Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования";

СНиП II-6-74 "Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования".

I.7. Руководство предназначено для выполнения расчетов тепловых режимов линейной части магистральных трубопроводов с конструкцией теплоизоляции в виде сплошного кольца, полностью охватывающего весь периметр трубы.

Однако Руководство можно использовать и для расчетов трубопроводов, имеющих плоские теплоизоляционные экраны.

I.8. Расчеты, приведенные в данном Руководстве, применимы только для трубопроводов, эксплуатируемых в установившемся тепловом режиме и неприемлемы для расчетов переходных процессов

в трубопроводах, в начальные периоды их эксплуатации, в первые часы с момента пуска трубопроводной системы.

I.9. Руководство разработано для трубопроводов, транспортирующих продукт только в газообразной или жидкой фазах, и не распространяется на трубопроводы, транспортирующие продукт в виде сложных гетерогенных систем (жидкость – газ), если расчетные параметры последних нельзя свести к обобщенным характеристикам, имитирующим однофазную гомогенную среду.

I.IO. Руководство не рассчитано на трубопроводы, по которым транспортируют неньютоновские жидкости (неподчиняющиеся элементарному закону трения) в условиях ламинарного (структурного) режима течения.

I.II. Комплексная методика прогнозирования теплового взаимодействия трубопроводов с окружающей средой, предложенная в настоящем Руководстве, позволяет в процессе многовариантного проектирования при варьировании всеми параметрами системы трубопровод – природная среда осуществлять оптимизацию конструктивных решений и эксплуатационных режимов трубопроводов и выбор оптимальных трасс с учетом охраны и рекультивации окружающей среды.

I.I2. Условные обозначения и размерности основных параметров, необходимых для прогнозирования теплового взаимодействия трубопроводов с окружающей средой, приведены в табл.I.

Таблица I

Основные исходные параметры, используемые при прогнозировании теплового взаимодействия трубопроводов с окружающей средой

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
I.	$A_в$	Годовая (физическая) амплитуда среднемесячных температур воздуха, ^0C	$A_в = \frac{\lvert t_{в min}\rvert + t_{в max}}{2}$, где $t_{в min}$, $t_{в max}$ – определяются по п.62 настоящей таблицы
2.	ΔA_R	Рациональная поправка к годовой амплитуде среднемесячных температур воздуха, ^0C	$\Delta A_R = A_{пр} - A_в$, где $A_в$, $A_{пр}$ – определяют соответственно по пп.I и 3 настоящей таблицы

Продолжение табл.I

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
3.	$A_{пр}$	Приведенная годовая (физическая) амплитуда среднемесячных температур воздуха с учетом радиации и испарения, °С	$A_{пр}=\frac{\lvert t_{пр}^{min}\rvert + t_{пр}^{max}}{2}$, где $t_{пр}^{max}$, $t_{пр}^{min}$ определяют по п.57 настоящей таблицы
4.	$A_т$	Альбедо поверхности трубопровода	Определяют экспериментально или берут из табл.6 приложения I рекомендуемого
5.	$A_п$	Альбедо подстилающей поверхности земли	Определяют экспериментально или берут из табл.6 приложения I рекомендуемого
6.	a_0, a_∞	Коэффициенты температуропроводности грунтов соответственно в зоне фазовых превращений влаги (промерзание или оттаивание грунта) и вне ее, м²/ч	Определяют в зависимости от вида процесса оттаивания ($a_0=a_т$; $a_\infty=a_м$) или промерзания ($a_0=a_м$; $a_\infty=a_т$) согласно п.7 данной таблицы
7.	$a_т$, $a_м$	Коэффициенты температуропроводности соответственно талого и мерзлого грунтов, м²/ч	$a_т=\frac{\lambda_т}{c_т}$; $a_м=\frac{\lambda_м}{c_м}$, где $\lambda_т$, $\lambda_м$ определяют по п.90; $c_т$, $c_м$ определяют по п.9 данной таблицы
8.	B	Параметр, учитывающий падение давления по длине газопровода	$B=\frac{\rho_г \bar{z} q^2 \Delta T_{ср}}{10^6 d_0^5}$, где $\rho_п$, $\bar{z}$, q, Δ, d_0 – определяют соответственно по пп.100, 77, 36, 84, 13; $T_{ср}$ – определяют согласно п.4.9 данной таблицы
9.	$C_т$, $C_м$	Объемная теплоемкость соответственно талого и мерзлого грунтов, ккал/м³	$C_т=\gamma_{ск}(c_{уд}+c_в W)$; $C_м=\gamma_{ск}[c_{уд}+c_в W_{нз}+c_л(W_с-W_{нз})]$, где $\gamma_{ск}$, $W_{нз}$, W, $W_с$ определяют соответственно по пп.83, 74, 73 данной таблицы; $c_{уд}$ – удельная теплоемкость скелета грунта, принимаемая приближенно равной:

Продолжение табл.I

№ п/п	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
			для глин 0,2I–0,22 ккал/кг°С; для суглинков 0,I9–0,20 ккал/кг°С; для супесей 0,I8ккал/кг°С; для песков 0,I7ккал/кг°С; для торфов, мхов, лишайников 0,35 ккал/кг°С; $C_в$ – удельная теплоемкость воды, $C_в$ = Iккал/кг.°С; $C_л$ – удельная теплоемкость льда 0,5 ккал/кг°С
I0.	C_p	Удельная теплоемкость газа ккал/кг°С	$C_p = C_o + \Delta C_p$, где $C_o = \sum_{(i)} C_i n_i$; C_i, n_i – удельная теплоемкость и мольная концентрация i -го компонента газа в идеальном состоянии соответственно, определяют экспериментально; ΔC_p – поправка к C_o учитывающая отклонение от идеального газа, определяют по номограмме рис.I2 приложения I рекомендуемого; C_p – для газа метана определяют по рис.8 приложения I рекомендуемого
II.	$C_н$	Удельная теплоемкость нефти, ккал/кг°С	$C_н = \frac{0{,}76 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\gamma_{15}}}(1687 + 3{,}39 t_{ср})$, где γ_{15} – удельный вес нефти при I5°С; $t_{ср}$ – определяют согласно п.4.I0 данного Руководства
I2.	D_i	Коэффициент Джоуля-Томсона, град/кгс/см²	Определяют по номограмме рис.I5 для газа метана – по рис.9 приложения I рекомендуемого
I3.	$d_н, d_o$	Наружный и внутренний диаметры трубопровода соответственно, м	$d_н = d_o + 2(\delta_{ст} + \delta_{из})$, где $\delta_{ст}, \delta_{из}$ – определяют по п.8б настоящей таблицы

Продолжение табл.I

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
I4.	E	Месячное количество атмосферных осадков, мм	Определяют экспериментально или согласно СНиП II-А-6-72
I5.	F	Функция, учитывающая тепловое взаимодействие трубопроводов с грунтами	$F=-\dfrac{\lambda_0\cdot\theta\cdot t_{cp}}{\ell n\frac{2\rho_n}{d_н}+\lambda_0\sum\limits_{(i)}\frac{1}{\lambda_i}\ell n\frac{d_{i+1}}{d_i}}$, где $\lambda_0,\theta,t_{cp},\rho_n,d_н$ – определяют соответственно по пп.89,88,47,96,I3; λ_i,d_{i+1},d_i – коэффициент теплопроводности i-го кольцевого слоя теплоизоляции и ограничивающие его диаметры соответственно, задаются априори
I6.	θ	Массовый расход нефтепровода или конденсатопровода, тыс.т/ч	Задается априори
I7.	H	Глубина оттаивания или промерзания грунта в основании трубопровода, м	$H=\rho_n-\dfrac{d_н}{2}$, где ρ_n, $d_н$ определяют по данной табл.
I8.	h_0	Глубина заложения трубопровода, м	$h_0=\lvert h_т-\dfrac{d_н}{2}\rvert$
I9.	$h_т$	Расстояние от поверхности грунта до оси трубопровода, м; $h_т>0$, когда ось трубопровода выше поверхности грунта; $h_т<0$, когда ось трубопровода ниже поверхности грунта	Задается априори
20.	$h_н$	Высота насыпи, м	Задается априори
2I.	$h_э$	Приведенная глубина заложения трубопровода, м	$h_э=h_0+\lambda_0\Sigma$, где h_0,λ_0,Σ – определяют соответственно по пп. I8,89,I04 данной табл.
22.	K	Коэффициент теплопередачи трубопровода в окружающую среду, ккал/м²·ч·°С	Определяют согласно п.4.I3 настоящего Руководства
23.	L,X	Длина трубопровода и его расчетного участка соответственно, км	Задается априори

Продолжение табл.I

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
24.	LE	Месячные затраты тепла на испарение с поверхности суши, ккал/сутмес	По рис.3 приложения I рекомендуемого
25.	$\ell_т$	Протяженность участка нефтепровода с турбулентным режимом течения, км	$\theta=2\pi,\ \ell_т=\frac{M_н(t_{нр}-t_н)}{R+F}$; $\theta+2\pi,\ \ell_т=\frac{M_н}{(\pi-\frac{\theta}{2})K\cdot d_н}\left\|\begin{matrix} t_н-t_з-\frac{F+R}{(\pi-\frac{\theta}{2})Kd_н} \\ t_{нр}-t_з-\frac{F+R}{(\pi-\frac{\theta}{2})Kd_н}\end{matrix}\right.$ где $M_н, R, F, \theta, K, d_н, t_{нр}, t_н, t_з$ определяют соответственно по пп.27,40,I5,88,22,I3,49, 44,45 данной таблицы
26.	$M_г$	Параметр, учитывающий теплосодержание газа в газопроводе	$M_г=48{,}58\,Q\cdot C_р\,\Delta$, где $Q, C_р, \Delta$ определяют соответственно по пп.36,I0,84 данной таблицы
27.	$M_н$	Параметр, учитывающий теплосодержание нефти или конденсата в трубопроводе	$M_н=G\,(c_н+1{,}2\cdot\varepsilon)\,I0^{-3}$, где $G, c_н$ – определяют по п.I6,II; $\varepsilon=\begin{cases}0 & t_{нп}<t_н\leqslant t_{кп},\\ const & t_{кп}\leqslant t_н\leqslant t_{кп};\end{cases}$ $t_{нп}, t_{кп}, t_н$ – определяют соответственно по пп.48,44 данной таблицы
28.	N	Параметр теплообмена трубопровода с окружающей средой	$N=(2\pi-\theta)\,\frac{d_н K}{2}$, где $\theta, d_н, K$ определяют соответственно по пп.88,I3,22 данной таблицы
29.	$P_н, P_к$	Начальное и конечное давление газа в газопроводе, кгс/см^2	Задается априори
30.	$P_{ср}$	Среднее давление газа в газопроводе, кгс/см^2	$P_{ср}=\frac{2}{3}\left(P_н+\frac{P_к^2}{P_н+P_к}\right)$, где $P_н, P_к$ определяют по п.29 настоящей таблицы

Продолжение табл.I

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
31.	$P_к$	Давление газа в газопроводе, кгс/см^2	Рассчитывают согласно п.4.6 настоящего Руководства
32.	ΔP	Падение напора в трубопроводах, кгс/см^2	Определяют согласно п.4.11 настоящего Руководства
33.	$P_л$	Гололедная нагрузка на трубопровод, кг/м	Определяют в соответствии с п.4.19 настоящего Руководства
34.	$Q_ф$	Теплота фазовых превращений воды в грунте, ккал/м^3	$Q_ф = \omega(P_w - W_{н.з})\gamma_{ск}$, где ω – скрытая теплота плавления льда (80 ккал/кг); $P_w = \begin{cases} W & \text{для талого грунта;} \\ W_c & \text{для мерзлого грунта;} \end{cases}$ $W, W_c, W_{н.з}, \gamma_{ск}$ определяют соответственно пп.73, 74, 83 данной таблицы
35.	Q_c	Интенсивность суммарной радиации в полдень в июле, ккал/м^2·ч	Определяют по рис.11 приложения I рекомендуемого
36.	q	Пропускная способность газопровода, млн.м^3/сут (при P=1 кгс/см^2 и t =20°С)	Рассчитывают согласно п.4.3 настоящего Руководства
37.	$R_{мес}$	Суммарное значение радиационного баланса за месяц, ккал/мес.см^2	По данным ближайшей метеостанции, по климатическим справочникам или по рис.2 приложения I рекомендуемого
38.	R_{max}	Интенсивность радиационного балланса в полдень в июле, ккал/м^2·ч	Определяют по рис.10 приложения I рекомендуемого
39.	$\overline{Re}$	Модифицированное число Рейнольдса: $\overline{Re} > 1$-турбулентный режим течения; $\overline{Re} \leq 1$- ламинарный режим течения	$\overline{Re} = 1{,}525 \frac{G}{d_0 \cdot \nu \cdot \gamma_н}$, где $G, d_0, \nu, \gamma_н$ определяют соответственно по пп.16, 13, 94, 81 данной таблицы
40.	R, S	Функции гидравлического режима течения продукта (нефти, конденсата) в трубопроводе	Определяют следующими зависимост

Продолжение табл.I

№ п/п	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
			$\overline{Re}>1 \begin{cases} R=\dfrac{0{,}61 G^{2{,}75} \nu_1^{0{,}25}}{\gamma_н^{1{,}75} d_0^{4{,}75}}, \\ S=\dfrac{0{,}61 G^{2{,}75}\left(\nu_1^{0{,}25}-\nu_2^{0{,}25}\right)}{\gamma_н^{1{,}75} d_0^{4{,}75}\left(t_2-t_1\right)} \end{cases}$ $\overline{Re}\le 1 \begin{cases} R=\dfrac{0{,}27 G^2 \nu_{ср}}{\gamma_н d_0^4}; \\ S=0, \end{cases}$ где G; $\gamma_н$, d_0 определяют соответственно по пп.16,81,13 данной табл; ν_1, ν_2 – кинематические вязкости продукта (нефти, конденсата) в трубопроводе, соответственно определяемые экспериментально по вискограмме при температурах t_1 и t_2; $\nu_{ср}$ – определяют по п.94 при температуре $t_{ср}=\dfrac{t_1+t_2}{2}$.
41.	$z_т$, z	Внутренний и наружный радиусы трубопровода соответственно, м	$z_т=\dfrac{d_0}{2}$, $z=\dfrac{d_н}{2}=z_т+\delta_{из}$, где d_0, $d_н$, $\delta_{из}$ – определяют соответственно по п.13,86 данной таблицы
42.	$z_к$	Радиус атмосферных капель, м.	Определяют экспериментально или по табл.4 приложения I рекомендуемого
43.	$z_{кр}$	Критический радиус капель, т.е. тот наименьший радиус капель, при котором возможно образование гололеда на поверхности надземного трубопровода, м	$z_{кр}=\dfrac{3}{4}\sqrt{\dfrac{\nu_в\ d_н\ \rho_в}{2\ v\ \rho_{н_2o}}}$, где $\nu_в, d_н, v, \rho_в, \rho_{н_2o}$ – находят соответственно по пп.93,13,72,99 данной таблицы.
44	$T_н$, $t_н$	Начальная температура продукта, транспортируемого по трубопроводу соответственно в К и °С	Задается априори $T_н=t_н+273$

№ п/п	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
45.	T_s, t_s	Температура окружающей среды, соответственно, К и °С	Определяют согласно п.4.I2 настоящего Руководства $T_s = 273 + t_s$
46.	T, t	Температура продукта, транспортируемого по трубопроводу соответственно, К и °С	Рассчитывают согласно пп.4.7–4.8 настоящего Руководства
47.	$t_{ср}, T_{ср}$	Средняя температура продукта, транспортируемого по трубопроводу соответственно, °С и К	Определяют различно для газопровода и нефтепровода согласно пп.4.9–4.I0 настоящего Руководства $T_{ср} = 273 + t_{ср}$
48.	$t_{н.п}$, $t_{к.п}$	Температуры начала и окончания процесса выпадения парафина из нефти соответственно, °С	Определяют экспериментально
49.	$t_{кр}$	Критическая температура нефти, при которой происходит смена турбулентного режима течения нефти ламинарным, °С	Определяют по вискограмме по значению $\nu = \nu(t_{кр})$ при Re =I см.п.39 данной таблицы
50.	t_h	Среднегодовая температура грунта на глубине распространения годовых колебаний температур (на глубине нулевых амплитуд), °С	В процессе выполнения мерзлотной съемки путем режимных наблюдений или единовременных замеров температуры грунта в скважинах
5I.	t_z	Среднемесячная температура грунта на глубине z в пределах деятельного слоя, °С	Рассчитывают согласно п.3.6 настоящего Руководства
52.	$t_{0\,мес}$	Среднемесячная температура на поверхности грунта, °С	То же
53.	t_∞	Среднемесячная температура на подошве деятельного слоя, °С	"
54.	t_{H_2O}	Среднемесячная температура донных слоев воды в водоемах, °С	Определяют при проведении изысканий
55.	t_f	Температура начала замерзания свободной воды, °С	Должна быть определена опытным путем. Если нет опытных данных, то определяют согласно главе СНиП II-I8-76

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
56.	$t_в$, $t_{пр}$	Среднемесячная температура воздуха и приведенная среднемесячная температура воздуха с учетом радиации и испарения, °С	$t_{пр} = t_в + \frac{R_{мес} - LE}{\alpha_F}$, где R, LE, α_F – определяют соответственно по пп.37,24,79 данной таблицы
57.	$t_{пр}^{min}$, $t_{пр}^{max}$	Минимальные и максимальные среднемесячные приведенные температуры воздуха с учетом радиации и испарения, °С (наиболее холодного и теплого месяца года)	Рассчитывают согласно определению $t_{пр}$ по п.56 настоящей таблицы
58.	t_0, A_0	Среднегодовая температура поверхности грунта и амплитуда колебаний среднемесячных температур под естественными напочвенными покровами (снежным, растительным) соответственно, °С	Рассчитывают согласно п.3.3а настоящего Руководства
59.	t_ξ	Среднегодовая температура на глубине ξ, °С	Определяют в соответствии с п.3.3г настоящего Руководства
60.	$t_в^{ср}$	Среднезимняя или среднелетняя приведенные температуры воздуха, °С	$t_{ср} = t_{в\,зим,лет} + \frac{1}{\tau_{в(i)}} \sum \frac{R_{мес\,i} - LE_i}{\alpha_{F\,i}}$ где $t_{в.зим}$, $t_{в.лет}$, $\tau_в$, $R_{мес\,i}$, LE, α_F определяют соответственно по пп.6I, I0I,37,24,79 данной таблицы
6I.	$t_{в.зим}$, $t_{в.лет}$	Среднезимняя и среднелетняя температура воздуха соответственно, °С	По табл.I главы СНиП П-А.6–72 или по формулам $t_{в.зим,лет} = \frac{1}{\tau_{в(i)}} \sum t_{в_i}$ или $t_{в,зим,лет} = \frac{2}{n} t_{в.min,max}$, где $\tau_в$, $t_{в_i}$, $t_{в\,min}$, $t_{в.max}$ определяют соответственно по пп.I0I,56,62 данной таблицы
62.	$t_{в.min}$, $t_{в.max}$	Минимальная и максимальная среднемесячные температуры воздуха соответственно, °С	Определяют экспериментально или в соответствии с рекомендациями главы СНиП П-А.6–72

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
63.	t_{max}	Максимальная температура нагрева наружной поверхности надземного трубопровода, °С	Определяют в соответствии с пп.4.20 настоящего Руководства
64.	t_{Π}	Максимальная температура нагрева подстилающей поверхности земли, °С	$t_{\Pi} = t_{в}^{max} + \frac{R_{max}}{\alpha_F}$; $R_{max}, t_{в}^{max}, \alpha_F$ – определяют по пп.38,65,79
65.	$t_{в}^{max}$	Суточная температура воздуха по срочным замерам, °С	Определяют экспериментально
66.	Δt_R	Радиационная поправка к среднегодовой температуре воздуха, °С	$\Delta t_R = \frac{1}{12}\sum t_{пр i} - t_{в}^{ср}$, где $t_{пр i}$, $t_{в}^{ср}$ определяют по пп.56,60 данной таблицы
67.	$\Delta t_{сн}$, $\Delta A_{сн}$	Тепловое влияние снежного покрова на t_0 и A_0 соответственно, °С	Рассчитывают по приближенной формуле В.А.Кудрявцева: $\Delta t_{сн} = \Delta A_{сн} = A_в K_{сн}$, где $K_{сн}$ – коэффициент, учитывающий сокращение амплитуды годовых колебаний температуры под снежным покровом, определяемый по табл.I приложения I рекомендуемого
68.	$\Delta t_р, \Delta A_р$	Тепловое влияние растительного покрова на t_0 и A_0 соответственно, °С	Определяют в соответствии с п.3.3б настоящего Руководства
69.	$\Delta t_{ос}$	Тепловое влияние инфильтрации летних атмосферных осадков на t_{ξ}, °С	Определяют согласно п. 3.3д настоящего Руководства
70.	Δt_{λ}	Тепловое влияние неравенства коэффициентов теплопроводности грунтов в талом и мерзлом состоянии ($\lambda_м \neq \lambda_т$) на t_{ξ}, °С	$\Delta t_{\lambda} = \delta_0 A_0$, где A_0 -определяют по п.58 данной табл; δ_0 – коэффициент, определяемый по рис.4 приложения I рекомендуемого
71.	U	Коэффициент улавливания, представляющий собой отношение массы воды, содержащейся в набегающем потоке, к массе воды, улавливаемой поверхностью трубы в данный момент времени	Определяют в соответствии с пп.4.19 настоящего Руководства

№ п/п	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
72.	v^t, v_{cp}	Скорость ветра и среднемесячная скорость ветра, м/с	Берут по данным ближайшей метеостанции или по табл.I главы СНиП П-А. 6-72
73.	W, W_c	Влажность по массе талого грунта и суммарная влажность мерзлого грунта соответственно	Определяют в процессе выполнения мерзлотной съемки в осенний период перед началом промерзания грунта как средневзвешенное значение влажности по всей мощности сезонно-талого (сезонномерзлого) слоя
74.	$W_{н.з}$	Количество незамерзшей воды в грунте	Определяют экспериментально, если нет опытных данных, то в соответствии с рекомендациями главы СНиП П-18-76 п.2.I.
75.	$W_в$	Водность воздуха атмосферы, $г/м^3$	Определяют экспериментально или по табл.3 приложения I рекомендуемого
76.	$X_з$	Протяженность участка трубопровода, на котором продукт (газ, нефть) принимает любую заданную температуру $t = t_з$, К	$\vartheta = 2\pi$; $X_з = (t_з - t_н)\frac{M}{F}$; $\vartheta \neq 2\pi$, $X_з = \frac{M}{\left(\pi - \frac{\vartheta}{2}\right) K d_н} \times \times \ell_п \frac{t_н - t_з - \frac{F}{\left(\pi - \frac{\vartheta}{2}\right) K d_н}}{t_з - t_s - \frac{F}{\left(\pi - \frac{\vartheta}{2}\right) K d_н}}$, $M = \begin{cases} M_н \text{ для жидкообразного продукта} \\ M_г \text{ для газообразного продукта} \end{cases}$

Продолжение табл.I

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
			$M_н, M_г, \theta, K, d_н, t_н, t_з$ – определяют соответственно по пп.27,26,88,22,I3, 44,45 данной таблицы
77.	z	Коэффициент сжимаемости газа	Рассчитывают по формуле Д.Бертло: $z = 1 + \frac{9 T_c \cdot P_{ср}}{128 P_{ср} \cdot T_{ср}} \left[1 - 6\left(\frac{T_c}{T_{ср}}\right)^2\right]$, где P_c, T_c – критические параметры газа, определяют по физическим справочникам. Для метана: T_c = I90 К; P_c = 47,5 кгс/см^2; $T_{ср}, P_{ср}$ – определяют по пп.47,30 данной таблицы
78.	z_1, z_2	Геодезические отметки начала и конца расчетного участка нефтепровода, м	Берут по материалам изысканий или топографическим картам
79.	α_F	Коэффициент конвективного теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой, ккал/м^2·ч °С	Берут по результатам натурных наблюдений или по формуле $\alpha_F = 4 + 2\,v$, где v – определяют по п.72 данной таблицы
80.	α_2, α_1	Коэффициенты внешней и внутренней теплоотдачи трубопровода, ккал/м^2·ч°С	Определяют согласно п.4.I3 настоящего Руководства
8I.	$\gamma_н$	Удельный вес продукта, транспортируемого по трубопроводу, т/м^3	$\gamma_н = \gamma_{20} - (I,825 - I,32\,\gamma_{20}) \times (t - 20)$, где γ_{20} – удельный вес продукта при температуре $t = 20$°С, определяют экспериментально
82.	γ	Объемная масса грунта, кг/м^3	Определяют в процессе мерзлотной съемки и изысканий
83.	$\gamma_{ск}$	Объемная масса скелета грунта, кг/м^3	$\gamma_{ск} = \frac{\gamma}{1 + P_w}$, где $P_w = \begin{cases} W & \text{для талого грунта} \\ W_G & \text{для мерзлого грунта} \end{cases}$

Продолжение табл.I

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
			γ, W, W_c – определяют соответственно по пп.82, 73 данной табл.
84.	Δ	Относительная плотность газа по воздуху (при P = I кгс/см² и t = 20°С)	Задается априори
85.	$\delta_л$	Максимальная толщина гололеда при неосесимметричном обледенении, м	Определяют согласно п.4.19 настоящего Руководства
86.	$\delta_{ст}, \delta_{из}$	Толщины металлической стенки трубопровода и теплоизоляции, соответственно, м	Задаются априори
87.	$\delta_{сн}, \delta_р$	Высота снежного покрова и растительного покрова, соответственно, м	Берут по данным натурных наблюдений или по данным ближайшей метеостанции и климатическим справочникам
88.	θ	Функция теплообмена трубопровода с окружающей средой, зависящая от системы прокладки	Определяют согласно п.4.16 настоящего Руководства
89.	$\lambda_0, \lambda_\infty$	Коэффициенты теплопроводности грунтов соответственно в зоне фазовых превращений влаги (промерзание или оттаивание грунта) и вне ее, ккал/м.ч°С	Определяют в зависимости от вида процесса: при оттаивании ($\lambda_0 = \lambda_т$, $\lambda_\infty = \lambda_м$); при промерзании ($\lambda_0 = \lambda_м$, $\lambda_\infty = \lambda_т$)
90.	$\lambda_т, \lambda_м$	Коэффициенты теплопроводности грунтов в талом и мерзлом состоянии соответственно, ккал/м.ч°С	Определяют экспериментально в процессе изысканий или согласно главе СНиП II-I5-76, или по рис.6 приложения I рекомендуемого
9I.	$\lambda_{сн}$	Коэффициент теплопроводности снежного покрова, ккал/м·ч°С	Определяют по эмпирической формуле Б.В.Проскурякова: $\lambda_{сн} = 0{,}018 + 0{,}87 \cdot \rho_{сн}$, где $\rho_{сн}$ –плотность снега, г/см³, определяют по п.98 данной табл. $\lambda_{сн}$ рекомендуется определять по рис.5 приложения I рекомендуемого

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
92.	$\lambda_р$	Коэффициент теплопроводности растительного напочвенного покрова (мохово-торфяного, лишайникового, травяного и др.), ккал/м.ч°С	По данным натурных наблюдений или по табл.2 приложения I рекомендуемого
93.	$\nu_в$	Кинематическая вязкость воздуха, м²/с	Определяют по табл.5 приложения I рекомендуемого
94.	ν	Кинематическая вязкость жидкообразного продукта, транспортируемого по трубопроводу, Ст	$\nu(t)=\left\{\nu_1^{0,25}-\frac{(\nu_1^{0,25}-\nu_2^{0,25})t}{t_2-t_1}\right\}^4$, где ν_1, ν_2 -кинематические вязкости нефти, соответственно при фиксированных температурах t_1 и t_2, $t_1<t_2$, определяют экспериментально
95.	ξ	Глубина сезонного оттаивания-промерзания грунтов, м	Определяют в соответствии с пп.3.4-3.5 настоящего Руководства
96.	$\rho_п, \rho_{п-1}$	Ореолы оттаивания или промерзания грунта вокруг подземного трубопровода, соответственно для расчетного и предыдущего интервалов времени, м	Рассчитывают согласно п.4.I5 настоящего Руководства
97.	$\rho_0, \rho_н, \rho_п^в$	Ореолы оттаивания или промерзания грунта в основании наземного открытого и наземного в насыпи трубопровода, и подводного трубопровода в проточной воде, соответственно, м	Рассчитывают согласно п.4.I5 настоящего Руководства
98.	$\rho_{сн}$	Объемная масса снежного покрова, г/см³	Определяют экспериментально
99.	$\rho_в, \rho_{н_2О}$	Плотности воздуха и воды соответственно, кг/м³	Определяют в зависимости от температуры и давления по справочникам
I00.	$\rho_г$	Коэффициент гидравлического сопротивления	По формуле $\rho_г=\frac{0,04}{d_0^{0,2}}$, где d_0 определяют по п.I3 данной таблицы
I0I.	$\tau_в$	Продолжительность периода с положительными (летнего) или с отрицательными (зимнего) температурами воздуха, мес	По среднемноголетним данным наблюдений ближайшей метеостанции, или по табл.I главы СНиП II-А.6-72, или по рис.I приложения I рекомендуемого

Окончание табл.I

№ пп	Обозначение	Параметры и их размерность	Способ определения параметров
I02.	$\tau_л$	Время, в течение которого наблюдается обледенение, ч	Определяют продолжительностью условий обледенения, когда $t < 0°C$ и $\tau_к \geq \tau_{кр}$, где t, $\tau_к$, $\tau_{кр}$ определяют соответственно по пп.46,42,43 данной таблицы
I03.	φ	Угол улавливания для верхней траектории полета капель по касательной к поверхности цилиндра, представляет собой максимальную протяженность зоны улавливания	Определяют согласно п.4.I9 настоящего Руководства
I04.	Ω	Термическое сопротивление теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой, м²ч.град/ккал	$\Omega = \frac{1}{\alpha_F} + \frac{\delta_{сн}}{\lambda_{сн}} + \frac{\delta_р}{\lambda_р}$, где α_F, $\delta_{сн}$, $\delta_р$, $\lambda_{сн}$, $\lambda_р$ определяют соответственно по пп.79,87,9I,92 данной таблицы
I05.	$\Omega_{ср}$	Среднее термическое сопротивление Ω_i за расчетный период $\tau_в$ м²ч.град/ккал	$\Omega_{ср} = \frac{1}{\tau_{в\,(i)}} \sum \Omega_i$, где $\tau_в$, Ω_i определяют по пп.I0I, I04 данной таблицы

2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

2.I. При сооружении трубопроводов еще в период строительства (до ввода их в эксплуатацию) происходят существенные, (иногда необратимые) изменения окружающей среды, сопровождающиеся нарушением температурного режима вечномерзлых грунтов и как следствие этого изменением их состава, строения и свойств, глубин сезонного промерзания и оттаивания, а также развитием инженерно-геологических процессов пучения, осадки, солифлюкции, термоденудации, морозного растрескивания и наледеобразования.

В связи с этим для прогнозирования взаимодействия трубопроводов с окружающей средой в уже нарушенных в период строительства природных условиях следует прежде всего принимать во внимание изменение естественных природных факторов (прежде всего рельефа, снежного и растительного покровов, обводнения) и тем самым определить истинный температурный режим грунтов, сформировавшийся к моменту пуска трубопроводной системы (начальные и граничные условия).

2.2. Прогнозирование теплового взаимодействия трубопроводов необходимо осуществлять последовательно в два этапа:

определять изменение в процессе строительства параметров температурного режима грунтов (среднегодовой температуры и мощности деятельного слоя);

рассчитывать тепловые режимы магистральных трубопроводов, исходя из образовавшихся при их строительстве нарушений параметров окружающей среды.

2.3. В зависимости от способов прокладки трубопроводов характер их взаимодействия с окружающей средой различен. Наиболее существенные изменения происходят при подземной, подводной и наземной прокладках за счет теплового влияния трубопровода и изменения условий теплообмена на поверхности, изменения микрорельефа и снежного покрова, а также изменений обводненности трасс, состава, плотности и влажности грунтов, условий дренажа поверхности.

При надземной прокладке трубопровода во взаимодействии с промерзающими и оттаивающими грунтами находятся лишь его основания, и нарушения окружающей среды под воздействием трубопровода минимальные.

2.4. Тепловое взаимодействие трубопровода с окружающей средой прогнозируют последовательно для каждого расчетного участка X, на которые разбивают расстояние L между двумя компрессорными (насосными) станциями, контролирующими технологический режим работы трубопроводной системы.

Конечные значения параметров трубопровода каждого первого расчетного участка являются начальными для последующего расчетного участка трубопровода.

Расчетные участки выбирают на основе специального инженерно-геологического районирования трассы.

2.5. Расчетный участок представляет собой часть газопровода, состоящую из одного определенного типа прокладки, которая характеризуется постоянными параметрами (в частности, величиной заглубления трубопровода в грунт, высотой насыпи, толщиной изоляции) и расположенную в пределах одного мерзлотно-геологического массива пород.

2.6. Основными исходными данными для прогнозирования непосредственного теплового взаимодействия магистральных трубопроводов с окружающей средой являются материалы мерзлотных инженерно-геологических изысканий и расчетные параметры температурного режима грунтов, полученные в результате составления общего мерзлотного прогноза изменений геокриологических условий трассы в период строительства трубопровода вне зоны его теплового влияния до начала эксплуатации.

2.7. Прогнозирование теплового взаимодействия трубопроводов с окружающей средой осуществляют с помощью метода последовательных приближений, состоящего из следующих этапов в приведенной последовательности:

определения воздействия окружающей среды на температурный режим трубопровода;

расчета теплового влияния трубопровода на окружающую среду;

корректировки полученных результатов аналогичными расчетами, на основании реального фактического теплообмена (взаимодействия) в системе трубопровод – окружающая среда.

2.8. Для выбора материалов конструкций, вычисления напряжений в элементах конструкций, расчета деформаций и производительностей трубопроводов расчетную температуру трубопровода определяют в соответствии с п.4.7 настоящего Руководства.

2.9. Расчетная температура трубопровода в период строительства зависит в основном от температурного режима окружающей среды, при испытаниях – от принятой технологии испытаний, а в период эксплуатации – от технологии перекачки продукта, конструкции трубопровода и температуры окружающей среды, принимая во внимание ее изменения в период эксплуатации.

2.10. Для определения глубины оттаивания-промерзания грунтов в основании подземного и наземного трубопровода расчетную

температуру трубопровода следует принимать равной средней ее величине за расчетный период времени.

3. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ТРАССЫ В ПОЛОСЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ТРУБОПРОВОДА ВНЕ ЗОНЫ ЕГО ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ

3.1. Прогнозировать изменения температурного режима грунтов необходимо в пределах конкретного типа местности в связи с изменением каждого в отдельности природного фактора.

3.2. Цель прогнозирования изменения температурного режима грунтов трассы при строительстве – определить среднегодовую температуру подошвы деятельного слоя (t_ξ) и глубину сезонного оттаивания-промерзания грунтов (ξ).

3.3. Прогнозирование температурного режима грунтов рекомендуется осуществлять по методике приближенного расчета, предложенной проф. В.А.Кудрявцевым.

Задачи по определению t_ξ и ξ решают совместно с применением метода последовательных приближений, так как величины t_ξ и ξ очень сложным образом функционально зависят одна от другой. Правильность расчета температурного режима грунта характеризуется строгой последовательностью с охватом всех природных факторов. Приведем этот расчет:

а) среднегодовую температуру поверхности почвы t_0 , зависящую от влияния следующих параметров (см.табл.2)

$$t_в\ , A_в\ ;\ \Delta t_R\ ;\ \Delta A_\rho\ ;\ \Delta t_{сн}\ ;\ \Delta A_{сн}\ ;\ \Delta t_\rho, \Delta A_\rho\ , \Delta t_{вод},$$

рассчитывают по формуле

$$\left.\begin{aligned} t_0 &= t_в^{ср} + \Delta t_R + \Delta t_{сн} \pm \Delta t_\rho ; \\ A_0 &= A_в + \Delta A_R - \Delta A_{сн} - \Delta A_\rho ; \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

б) тепловое влияние растительного покрова Δt_ρ и ΔA_ρ на t_0 и A_0 находят по приближенным зависимостям

$$\left.\begin{aligned} \Delta t_\rho &= \frac{(\Delta A_\rho^3 \tau_в^3 - \Delta A_\rho^л \tau_в^л)}{6\pi} ; \\ \Delta A_\rho &= \frac{\Delta A_\rho^3 \tau_в^3 + \Delta A_\rho^л \tau_в^л}{12} ; \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Таблица 2

Пример формы записи исходных и расчетных данных, характеризующих изменение мерзлотных условий расчетного участка трассы

Элемент рельефа	Участки (I–III) первой надпойменной трассы		
	I	II	III
Тип местности	Просека со слабоизмененными условиями	Просека вблизи траншеи	Притрассовая дорога
Характеристика микрорельефа, растительности и поверхностных вод	Слабохолмистая поверхность с небольшими заболоченными понижениями. Редкий кустарник и травостой	Ровная поверхность с небольшими отвалами вынутого грунта. Растительности нет	Насыпь на отдельных участках высотой 0,3–0,5 м, местами она отсутствует
Состав грунтов в слое и уровень надмерзлотных или грунтовых вод	Супесь с прослоями песка и суглинка	Супень с прослоями песка и суглинка	Супесь
Свойства грунта в слое:			
$Q_ф$, ккал/м^3	I9200	2I000	I7000
$\frac{\lambda_т}{\lambda_м}$, ккал/мг.$^\circ$С	$\frac{I,2}{I,5}$	$\frac{I,25}{I,5}$	$\frac{I,2}{I,3}$
$c_т, c_м$, ккал/м^3 $^\circ$С	560	600	500
γ', кг/м^3	I200	I300	I200
γ, кг/м^3	I700	I700–I970	I600
W, доли ед.	0,23	0,23–0,25	0,20
Температурный режим воздуха, t $^\circ$С:			
$t_в$, $^\circ$С	-I0,5	-I0,5	-I0,5
$A_в$, $^\circ$С	23,3	23,3	23,3
Влияние степени инсоляции и радиационного охлаждения, $^\circ$С:			
Δt_R, $^\circ$С	0,5	I,0	I,0

Окончание табл.2

Элемент рельефа	Участки (I–III) первой надпойменной террасы		
	I	II	III
ΔA_R, °C	I,2	I,8	I,8
Влияние снега $\Delta A_{сн}$:			
$\Delta t_{сн}$, °C,	7,5	7,0	5,5
$z_{сн}$, м	I,2	I,0	0,5
$\rho_{сн}$, г/см³	0,33	0,3	0,28
Влияние растительности, °C:			
$\Delta A_р$, °C	0,7	–	–
$\Delta t_р$, °C	0,3	–	–
Температурный режим на поверхности, °C:			
t_0,	-2,2	-2,5	-4,0
A_0,	I6,3	I8,I	I9,8
Температурная сдвижка $\Delta t_л$, °C	0,7	0,8	I,I
Влияние инфильтрации летних атмосферных осадков $\Delta t_{ас}$, °C	–	0,5	0,5
Среднегодовая температура на глубине ξ, °C			
$t_{\xi\,факт}$,	-3,2	-2,4	–
$t_{\xi\,расчт}$, °C	-2,9	-2,8	-4,6
Глубина сезонного оттаивания, м:			
$\xi_{факт}$, м	I,9	2,0	2,2
$\xi_{расч}$, м	I,7	I,9	2,0

где $\tau_в^з$, $\tau_в^л$ – продолжительность периода с отрицательными и положительными температурами воздуха, соответственно, мес. (см.табл.I, п.I0I);

$\Delta A_р^з$, $\Delta A_р^л$ – средняя разница в среднесуточных температурах на поверхности растительного покрова и под ним соответственно за $\tau_в^з$ и $\tau_в^л$, °C.

в) величину $\Delta A_p^з$ и $\Delta A_p^л$ определяют экспериментально в процессе изысканий как среднемесячные за наиболее холодный и теплый месяцы года. Если этих наблюдений нет, то $\Delta A_p^з$ и $\Delta A_p^л$ могут быть получены расчетным путем по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned} \Delta A_p^з &= A_з\left(1-e^{-\delta_p\sqrt{\frac{\pi}{2a_м^p\tau_в^з}}}\right); \\ \Delta A_p^л &= A_л\left(1-e^{-\delta_p\sqrt{\frac{\pi}{2a_т^p\tau_в^л}}}\right), \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где

$$A_з = A_в - 2\Delta A_{сн} - t_в^{ср};$$

$$A_л = A_в + t_в^{ср};$$

$a_м^p, a_т^p$ – коэффициенты температуропроводности растительного покрова соответственно в талом и мерзлом состоянии, ($м^2/ч$), определяют из табл.2 приложения I рекомендуемого или по данным изысканий по формуле:

$$a_{м,т}^p = \frac{\pi\delta_p^2}{24\ell n^2\frac{A_в^c}{A_p^c}}, \qquad (4)$$

где $A_в^c, A_p^c$ – амплитуда суточных колебаний температуры, соответственно на поверхности растительного покрова и под ним определяют по результатам полевых наблюдений в процессе изысканий, °С;

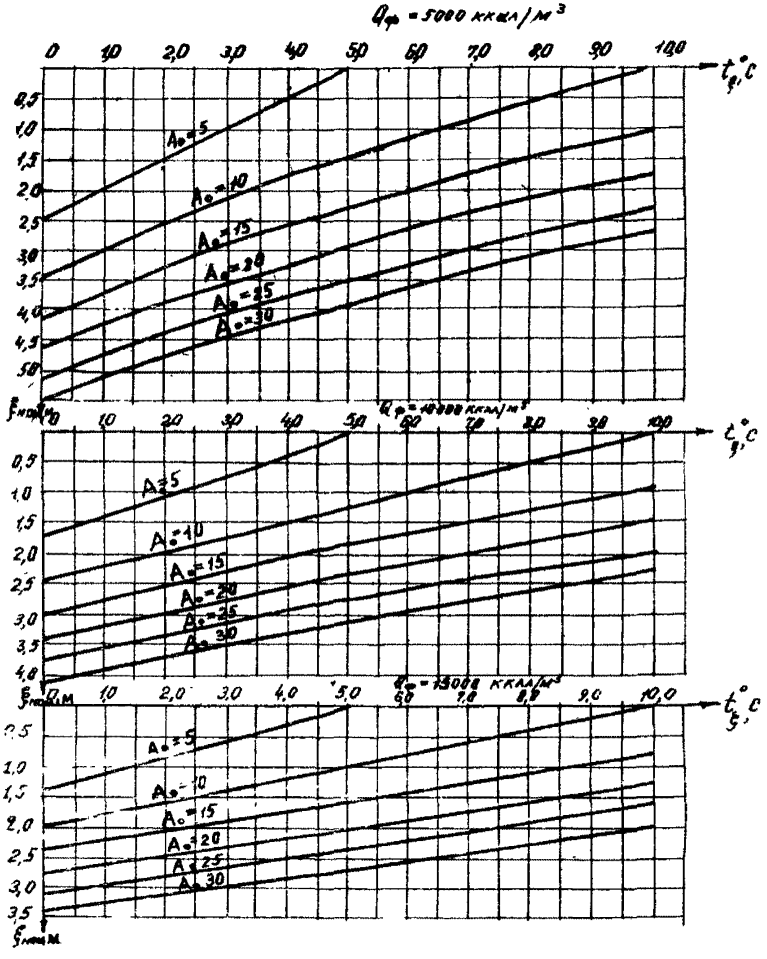
г) среднегодовую температуру на глубине $\xi(t_\xi)$ определяют по температурному режиму на поверхности почвы и влиянию следующих факторов:

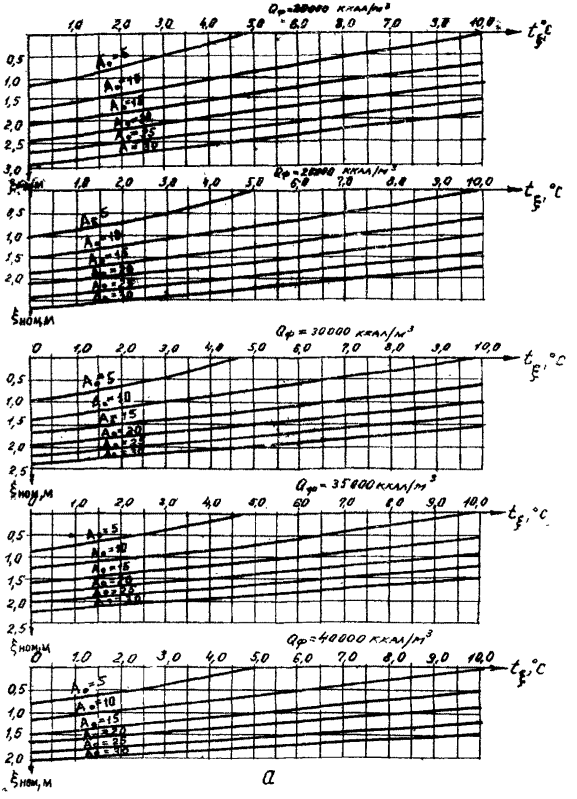
изменения теплопроводности грунтов при промерзании и оттаивании Δt_λ ;

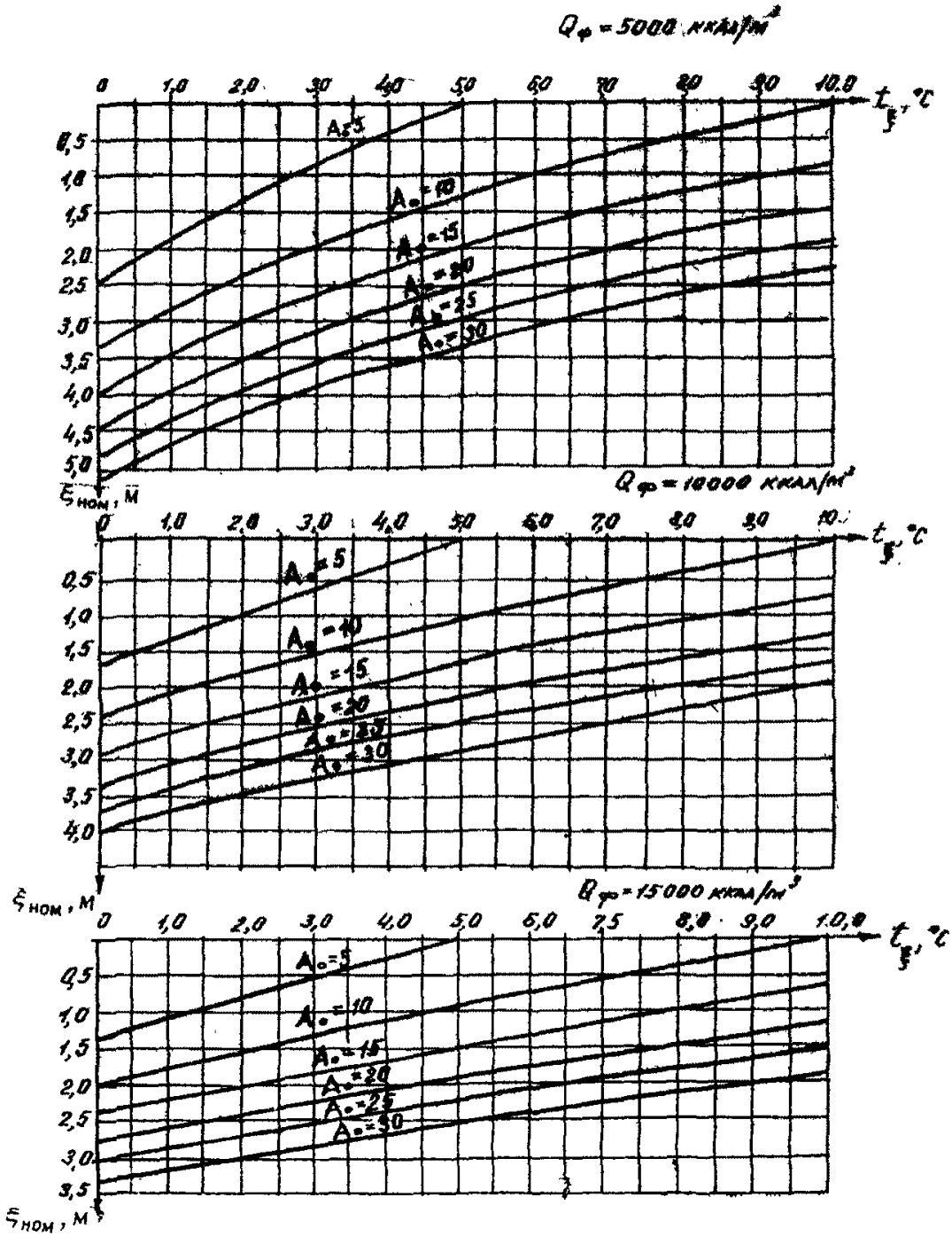
инфильтрации атмосферных осадков $\Delta t_{ос}$; (табл.2, пример формы записи исходных и расчетных данных, характеризующих изменение мерзлотных условий расчетного участка трассы)

$$t_\xi = t_0 - \Delta t_л + \Delta t_{ос} \qquad (5)$$

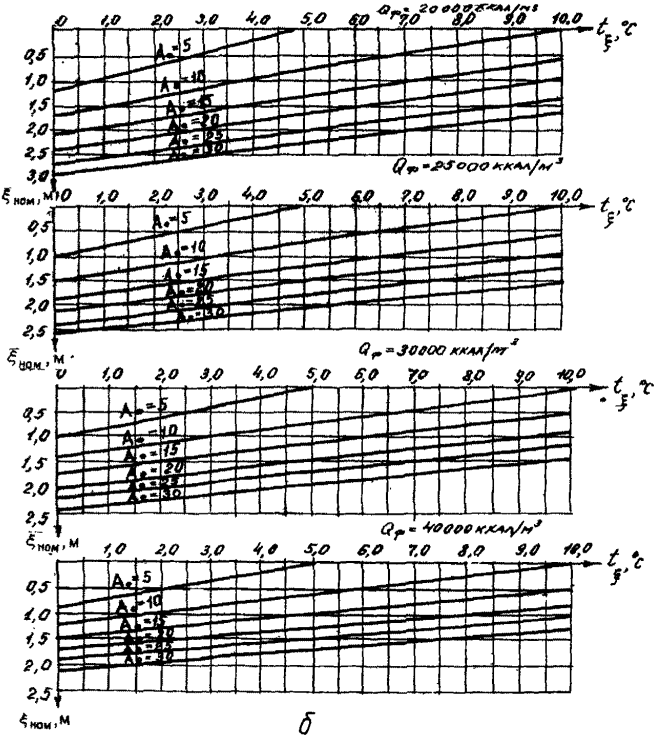
д) тепловое влияние $\Delta t_{ос}$ инфильтрации летних атмосферных осадков на t_ξ находят из решения следующего трансцендентного уравнения:


$Q_{ф}$ = 5000 ккал/м³
$t_г$, °C
A_0=5
A_0=10
A_0=15
A_0=20
A_0=25
A_0=30
$Q_{ф}$ = 10000 ккал/м³
$Q_{ф}$ = 15000 ккал/м³

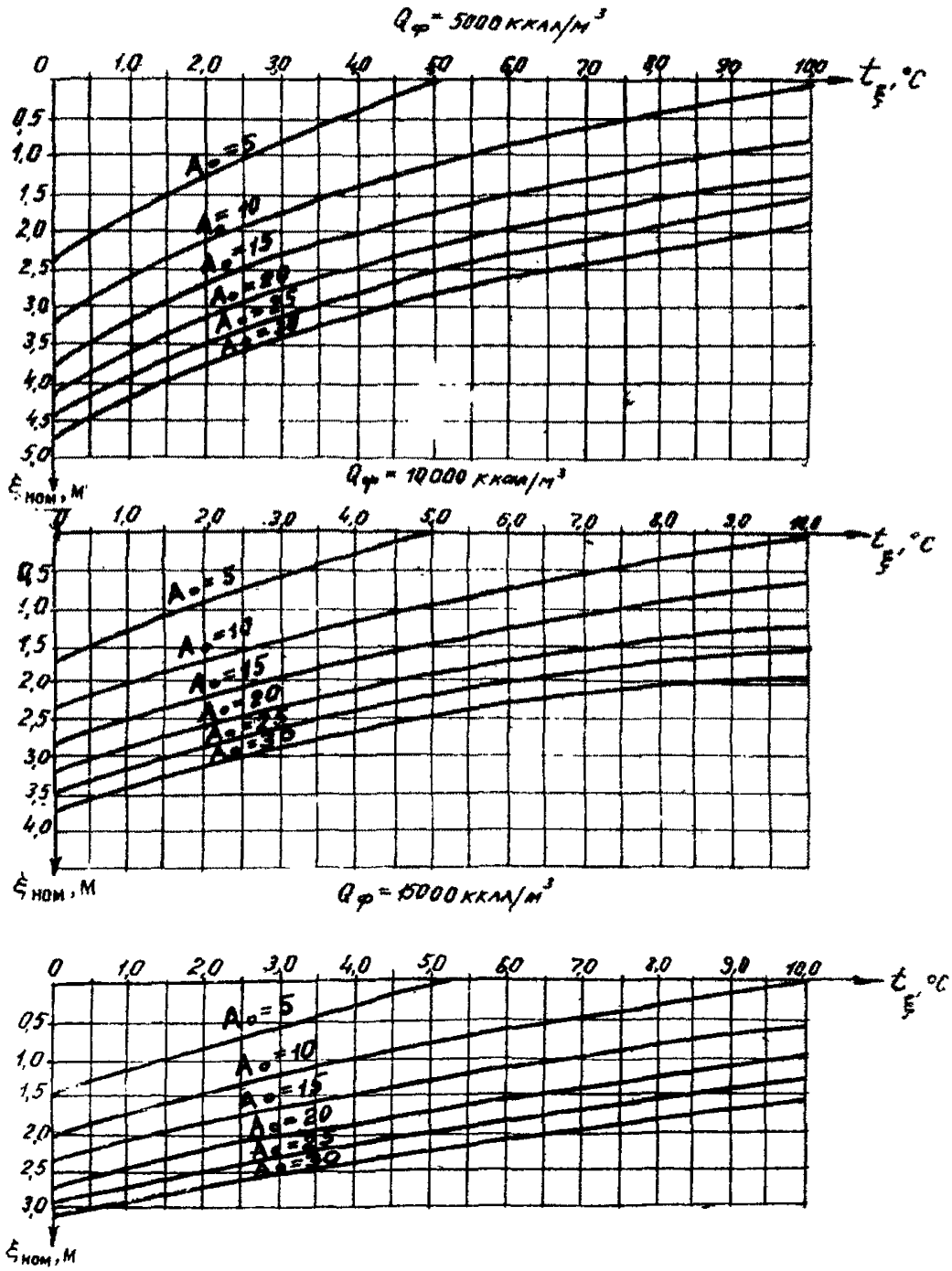

Qф=20000 ккал/м³
Qф=25000 ккал/м³
Qф=30000 ккал/м³
Qф=35000 ккал/м³
Qф=40000 ккал/м³
tξ, °C
ξ ном, м
Ao=5
Ao=10
Ao=15
Ao=20
Ao=25
Ao=30
а

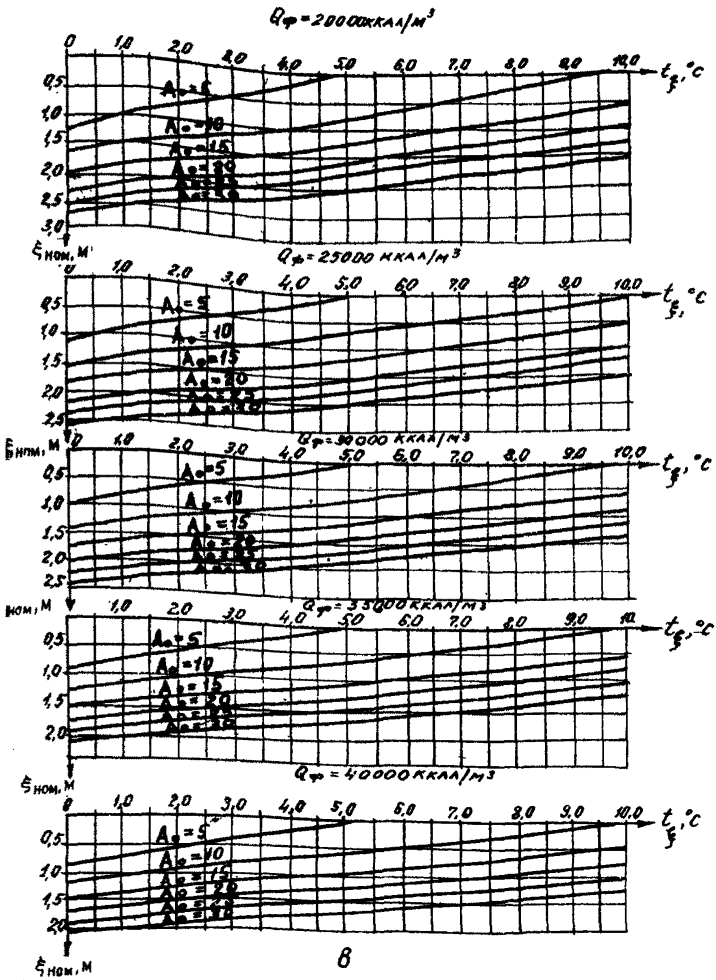


$Q_ф = 5000$ ккал/м²
$t_ξ$, °C
$A_0 = 5$
$A_0 = 10$
$A_0 = 15$
$A_0 = 20$
$A_0 = 25$
$A_0 = 30$
$\xi_{ном}$, м
$Q_ф = 10000$ ккал/м²
$t_ξ$, °C
$A_0 = 5$
$A_0 = 10$
$A_0 = 15$
$A_0 = 20$
$A_0 = 25$
$A_0 = 30$
$\xi_{ном}$, м
$Q_ф = 15000$ ккал/м²
$t_ξ$, °C
$A_0 = 5$
$A_0 = 10$
$A_0 = 15$
$A_0 = 20$
$A_0 = 25$
$A_0 = 30$
$\xi_{ном}$, м


$Q_{пр}$ = 20000 ккал/м²
$Q_{пр}$ = 25000 ккал/м²
$Q_{пр}$ = 30000 ккал/м²
$Q_{пр}$ = 40000 ккал/м²
$t_ξ$, °C
$ξ_{ном}$, м
A_0 = 5
A_0 = 10
A_0 = 15
A_0 = 20
A_0 = 25
A_0 = 30

б


$Q_ф$ = 5000 ккал/м³
0 1,0 2,0 3,0 4,0 5,0 6,0 7,0 8,0 9,0 10,0
$t_ξ$, °C
0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0
A_o = 5
A_o = 10
A_o = 15
A_o = 20
A_o = 25
A_o = 30
$ξ_{ном}$, м
$Q_ф$ = 10000 ккал/м³
0 1,0 2,0 3,0 4,0 5,0 6,0 7,0 8,0 9,0 10,0
$t_ξ$, °C
0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0
A_o = 5
A_o = 10
A_o = 15
A_o = 20
A_o = 25
A_o = 30
$ξ_{ном}$, м
$Q_ф$ = 15000 ккал/м³
0 1,0 2,0 3,0 4,0 5,0 6,0 7,0 8,0 9,0 10,0
$t_ξ$, °C
0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0
A_o = 5
A_o = 10
A_o = 15
A_o = 20
A_o = 25
A_o = 30
$ξ_{ном}$, м



в

Рис.I. Номограммы для определения глубин сезонного промерзания и протаивания грунтов:

а – C=300 ккал/м³°C; б – C=500 ккал/м³°C; в – C = 800 ккал/м³°C

$$\Delta t_{oc} = \frac{Q_{oc} \cdot \xi}{8760 \cdot \lambda_{np}}, \qquad (6)$$

где $Q_{oc} = \sum_{(i)} E_i \cdot t_i$; $\lambda_{np} = \frac{\lambda_T (A_0 + t_0) + \lambda_M (A_в - t_0)}{2A_0}$;

E_i – месячное количество летних тепловых атмосферных осадков, мм;

t_i – среднемесячная температура осадков, ^{0}С;

F_i, t_i – для практических расчетов берутся из метеорологических справочников или СНиП II-А.6-72.

3.4. Глубину сезонного оттаивания или промерзания грунта рассчитывают по формуле

$$\xi = -\frac{m}{2n} + \sqrt{\left(\frac{m}{2n}\right)^2 + \frac{\tau_в - 1{,}3 A_0 \Omega_{cp} \cdot \beta \cdot K_1 \sqrt{\tau_в}}{n}}, \qquad (7)$$

где

$$m = K_1 \beta \sqrt{\tau_в} + 1{,}3 \lambda_0 \Omega_{cp} (\alpha + \gamma');$$

$$n = \frac{1}{K_2} \left(\alpha + \beta + \frac{1}{12 a_0}\right);$$

$$\alpha = \frac{Q_ф}{2\lambda_0 / t_f - t_{np} /};$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\pi a_\infty}} \frac{\lambda_\infty}{\lambda_0} \left(\frac{t_f - t_\xi}{t_f - t_{np}}\right);$$

$$\gamma = \frac{1}{4a_0} \Big/ \frac{t_f - t_\xi}{t_f - t_{np}} \Big/;$$

$$K_1 = \begin{cases} 1 & \tau_в, \text{ ч;} \\ 27 & \tau_в, \text{ мес;} \end{cases}$$

$$K_2 = \begin{cases} 1 & \tau_в, \text{ ч;} \\ 730 & \tau_в, \text{ мес.} \end{cases}$$

В первом приближении допустимо при расчете ξ принима

$$t_\xi = t_h.$$

3.5. Расчет глубины оттаивания или промерзания грунта

четырех параметров C, Q_φ, A_0, t_ξ . Искомая величина ξ будет равна значению $\xi_{ном}$, найденному по номограммам и умноженному на корень квадратный из значения коэффициента теплопроводности грунта λ_0 :

$$\xi = \xi_{ном} \cdot \sqrt{\lambda_0}. \qquad (8)$$

3.6. Расчет годовой динамики среднемесячных температур грунта (t_z) в пределах деятельного слоя ξ (слоя сезонного оттаивания или промерзания) на любой глубине $z \leq \xi$ (см.пояснительный рис.2) рекомендуется осуществлять интерполя-

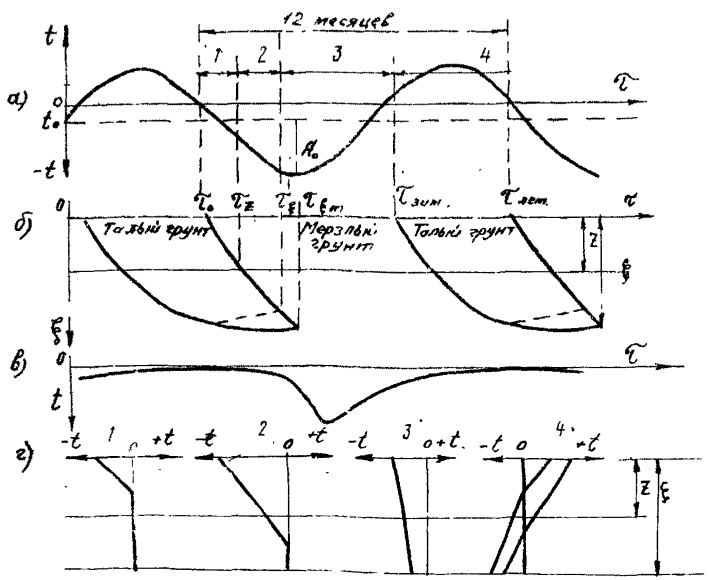


Рис.2. Распределение температур на поверхности грунта в слое сезонного оттаивания в I,2,3,4 периоды времени и ди-

цией между среднемесячными температурами на поверхности грунта ($t_{0мес}$) и на глубине $\xi(t_\infty)$.

В табл.3 приведены абсолютные значения среднемесячных температур на поверхности грунта ($t_{0мес}$).

Абсолютные значения среднемесячных температур t_∞ на подошве деятельного слоя определяют с помощью номограммы (рис.3)

Температуру $t_z(\tau)$ рассчитывают во времени с момента времени $\tau_0 = 0$ начала промерзания слоя сезонного оттаивания ξ (для вечномерзлых грунтов с наступлением холодного периода) или в начале протаивания слоя сезонного промерзания ξ (для талых грунтов в начале теплого периода), что соответствует первому месяцу в табл.3 и рис.3.

В зависимости от времени τ (см.рис.2) t_z рассчитывают следующим образом:

$$t_z(\tau)=\begin{cases} t_f & \text{при } \tau_0 \le \tau \le \tau_z ; \\ t_{0мес}\left(1-\frac{z}{\xi}\sqrt{\frac{\tau_{\xi m}}{K_2(\tau-\tau_0)}}\right) & \text{при } \tau_z < \tau \le \tau_\xi ; \\ t_{0мес}+(t_\infty - t_{0мес})\frac{z}{\xi} & \text{при } \tau_\xi < \tau \le \tau_{зим} ; \\ t_f+(t_\infty - t_f)\frac{z-\xi_\tau}{\xi-\xi_\tau} & \text{при } \tau_{зим} < \tau < \tau_{лет} \text{ и } z \ge \xi_\tau ; \\ t_{0мес}+(t_f - t_{0мес})\frac{z}{\xi_\tau} & \text{при } \tau_{зим} < \tau < \tau_{лет} \text{ и } z < \xi_\tau \end{cases} \quad (9)$$

где

$$\tau_z = \tau_0 + \left(\frac{z}{\xi}\right)^2 \frac{\tau_{\xi m}}{K_2} ;$$

τ_0 – момент начала промерзания сезонноталого слоя, ч;

$$\tau - \tau_0 = \tau_z - \tau_0 + n - 0{,}5 ;$$

n – порядковый номер месяца, начиная с которого глубина промерзания $\xi > z$;

ξ_τ – положение границы протаивания во времени, рассчитывают согласно п.3.4 или определяют по методу Тумеля:

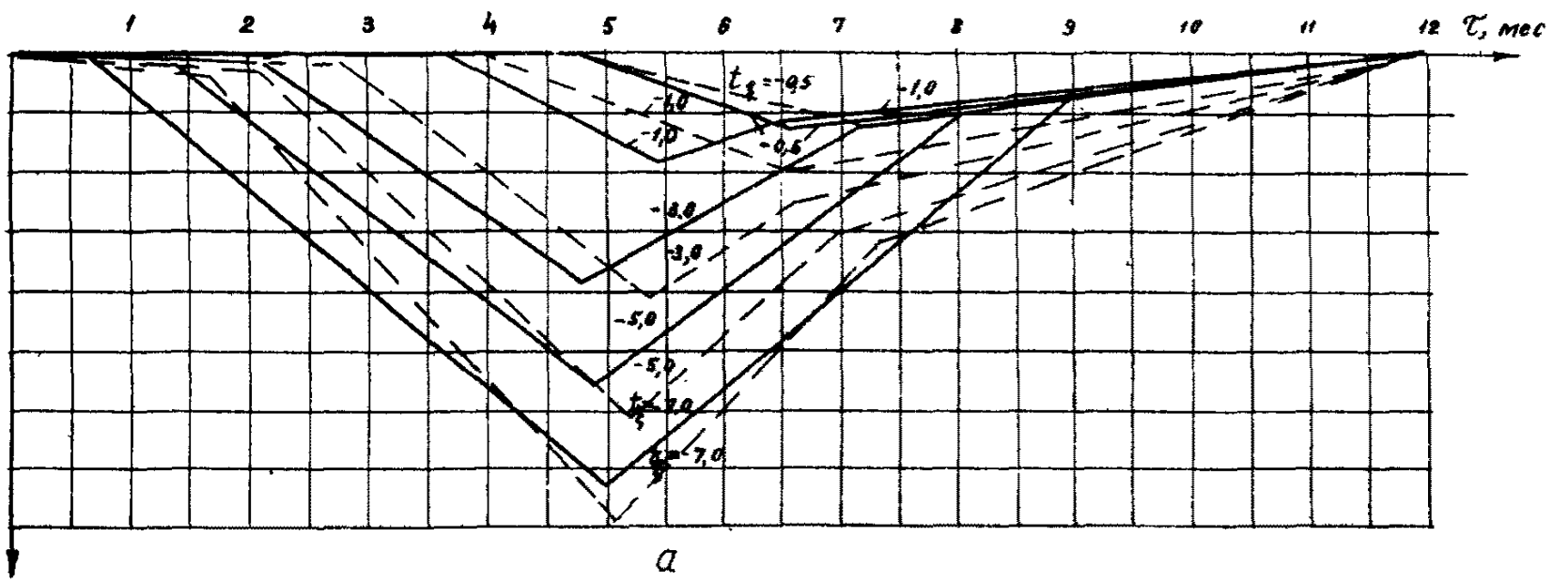
$$\xi_\tau = \frac{\xi \, n_\xi}{100\%} ;$$

n_ξ – интенсивность оттаивания грунта от его максимальной величины ξ, %;

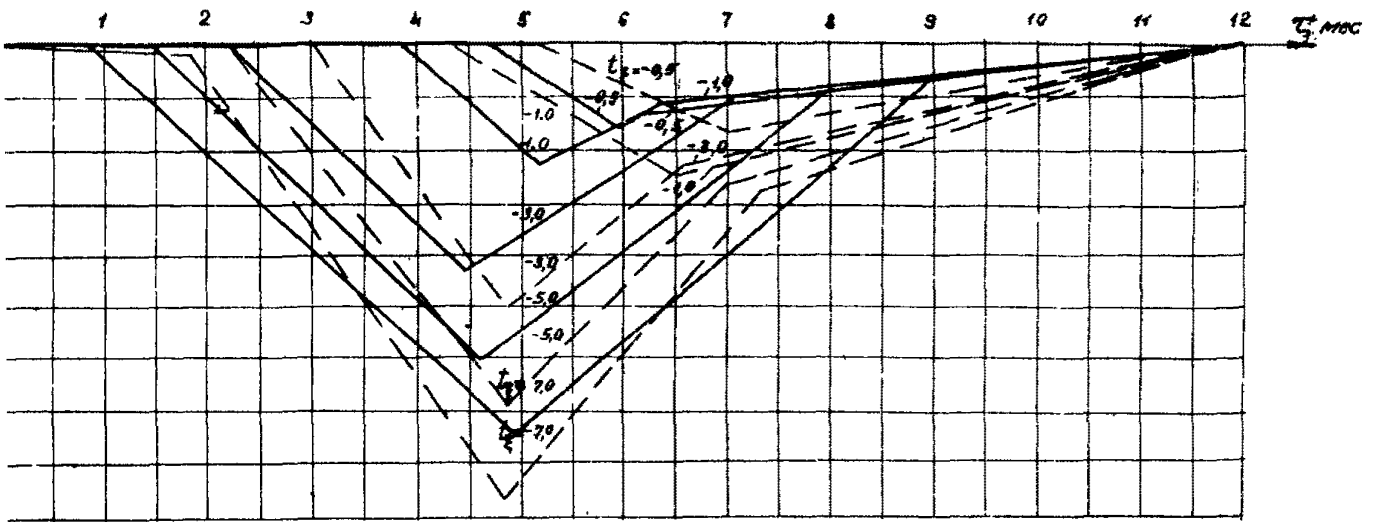
Таблица 3

Абсолютные значения среднемесячных температур на поверхности грунта $t_{0\,мес}$

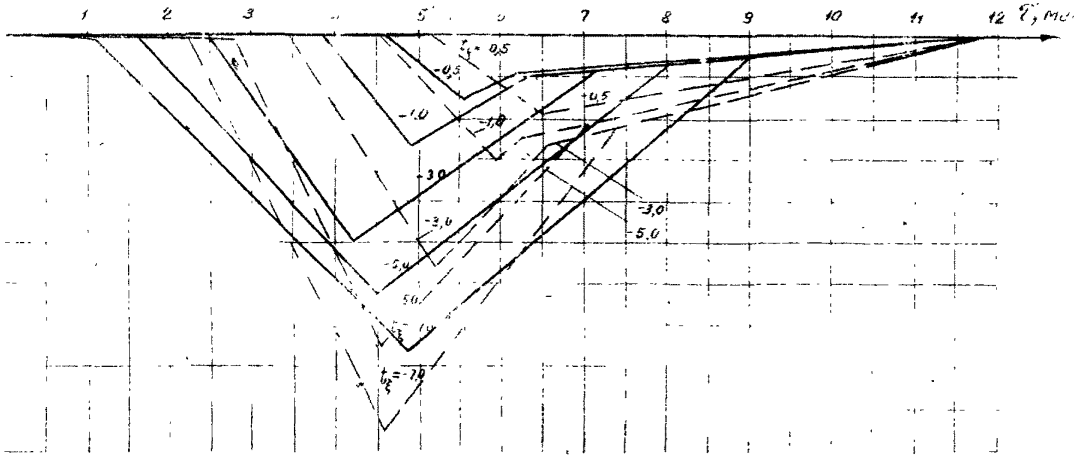
ческая итуда ература поверх- и почв, °С	Средне-годовая темпера-тура по-верхности почвы, °С	Среднемесячная температура поверхности почвы с I по I2-й месяцы, °С											
		I-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	IO-й	II-й	I2-й
)	±0,5	±3,0	±7,0	±I0,0	±I0,0	±8,0	±3,0	±2,0	±6,0	±9,0	±9,0	±7,0	±3,0
	±I,0	±3,0	±7,0	±I0,0	±I0,0	±9,0	±5,0	±0,0	±5,0	±8,0	±9,0	±7,0	±3,0
	±3,0	±2,0	±7,0	±II,0	±I3,0	±I2,0	±9,0	±6,0	±2,0	±6,0	±7,0	±6,0	±5,0
	±5,0	±3,0	±8,0	±I2,0	±I5,0	±I5,0	±I2,0	±7,0	±2,0	±8,0	±5,0	±5,0	±2,0
	±7,0	±2,0	±7,0	±I2,0	±I6,0	±I7,0	±I5,0	±I2,0	±7,0	±I,0	±2,0	±3,0	±2,0
5 .	±0,5	±3,0	±II,0	±I5,0	±I5,0	±I2,0	±8,0	±3,0	±I0,0	±I4,0	±I4,0	±II,0	±4,0
	±I,0	±3,0	±I0,0	±I5,0	±I6,0	±I3,0	±6,0	±1,0	±9,0	±I3,0	±I4,0	±II,0	±4,0
	±3,0	±3,0	±I0,0	±I6,0	±I8,0	±I6,0	±I0,0	±3,0	±5,0	±I0,0	±I2,0	±I0,0	±5,0
	±5,0	±3,0	±II,0	±I7,0	±20,0	±I9,0	±I4,0	±7,0	±I,0	±7,0	±I0,0	±9,0	±4,0
	±7,0	±3,0	±II,0	±I6,0	±2I,0	±2I,0	±I7,0	±I0,0	±3,0	±4,0	±8,0	±7,0	±4,0
	±0,5	±5,0	±I4,0	±2I,0	±20,0	±I5;0	±6,0	±4,0	±I3,0	±I9,0	±I9,0	±I4,0	±6,0
	±I,0	±5,0	±I4,0	±20,0	±2I,0	±I8,0	±7,0	±2,0	±I3,0	±I8,0	±I8,0	±I5,0	±6,0
	±3,0	±5,0	±I5,0	±2I,0	±23,0	±I9,0	±II,0	±2,0	±9,0	±I5,0	±I7,0	±I4,0	±5,0
	±5,0	±5,0	±I5,0	±22,0	±24,0	±22,0	±I5,0	±5,0	±5,0	±I3,0	±I4,0	±I3,0	±5,0
	±7,0	±5,0	±I4,0	±23,0	±27,0	±26,0	±20,0	±I0,0	±I,0	±7,0	±I3,0	±I2,0	±5,0



а



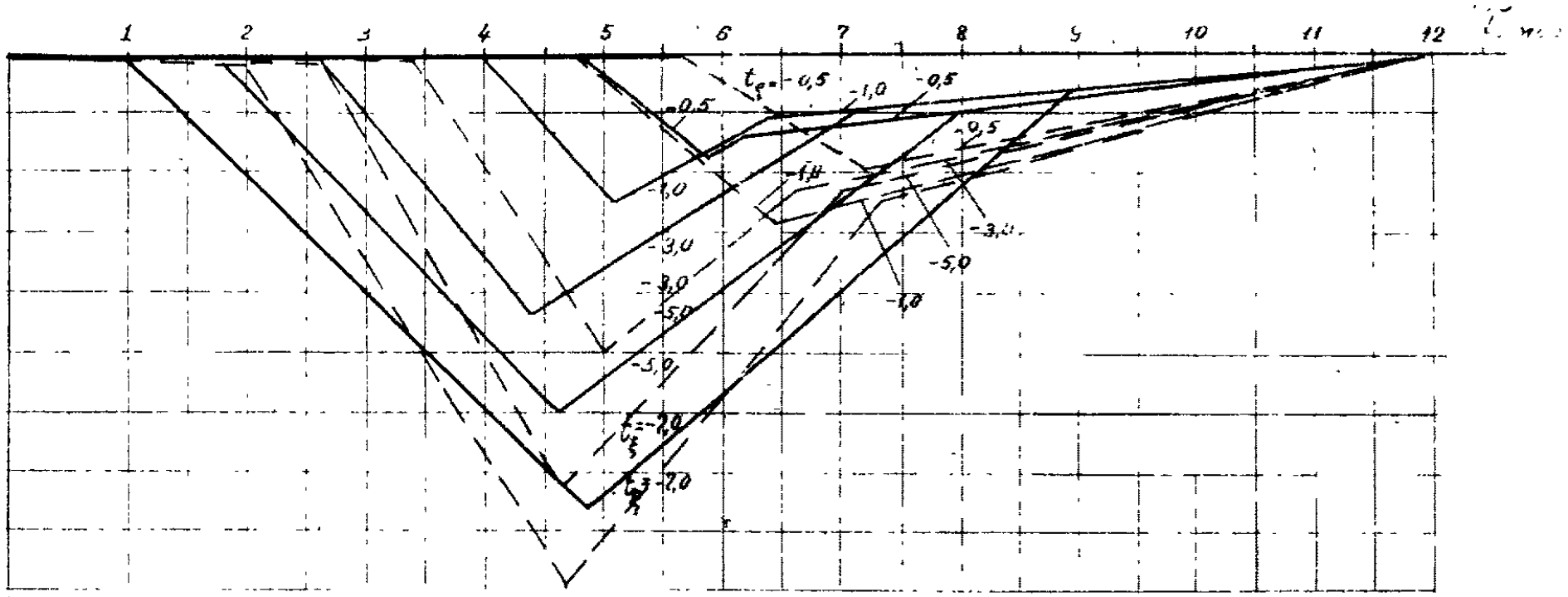
б



2

:.3. Номограммы для определения годовой динамики среднемесячных температур (t_∞) на глубине сезонного оттаивания-промерзания:

$Q_\phi \leq$ I0000 ккал/м^3; б – I0000 < $Q_\phi \leq$ 20000 ккал/м^3; в – 20000 < $Q_\phi \leq$ 40000 ккал/м^3; г – $Q_\phi \geq$ 40000 ккал/м^3; $C_т = C_м$=500 ккал/м^3 °С; $\lambda_т = \lambda_м$; ——— A_0=I0°; - - - - A_0 = 20°С



в

K_2 – параметр, определяемый согласно п.3.4;

$\tau_{\xi m}, \tau_{\xi}$ – время промерзания грунта слоя сезонного оттаивания или же время оттаивания грунта слоя сезонного промерзания, определяют по номограммам рис.7 приложения I рекомендуемого;

$\tau_z, \tau_\xi, \tau_{зим}, \tau_{лет}$ – характерные моменты времени развития процессов сезонного оттаивания или промерзания грунта, см. рис.2.

3.7. Среднегодовую температуру (t_0) и амплитуду колебаний среднемесячных температур (A_0) донных отложений озер определяют по формулам:

$$t_0 = \frac{t_{max\ вод}}{2} + \frac{t_{min\ вод}}{2}\left(1 - \frac{h_л}{h_в}\right); \qquad (10)$$

$$A_0 = t_{max\ вод} - t_0,$$

где $t_{max.вод}$ – максимальная среднемесячная температура воды в водоеме летом, °С:

$$t_{max.вод} = A_в + t_в^{ср};$$

$t_{min.вод}$ – минимальная среднемесячная температура на поверхности льда водоема под снегом, °С:

$$t_{min\ вод} = t_в^{ср} + 2\Delta t_{сн} - A_в;$$

$h_в, h_л$ – глубина водоема и толщина льда, образующаяся на водоеме, соответственно (в м), определяют в процессе проведения изысканий, а если нет практических данных, $h_л$ можно рассчитывать в соответствии с п.3.4 при условии

$$t_\xi = t_f \text{ и } Q_\phi = 80000 \text{ ккал/м}^3.$$

4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТРУБОПРОВОДОВ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

4.1. При расчете тепловых режимов трубопроводов, взаимодействующих с окружающей средой, используют метод последовательных приближений. Это означает, что на I-м приближении определение температуры продукта по длине трубопровода ведут только при значении коэффициента теплопередачи k при

$$\theta = 0, \quad F = 0.$$

Во 2-м приближении полученные значения температуры газа

корректируют с помощью аналогичного расчета с учетом фактического, т.е. реального теплообмена трубопровода с окружающей средой при $\Theta \neq 0$ с учетом ореолов оттаивания (промерзания), вычисленных по данным первого приближения.

Необходимо иметь в виду возможность сочетания различных случаев соотношения знака (по шкале Цельсия) температур газа и грунта, которые могут быть как положительными, так и отрицательными.

Если температура продукта положительная ($t > 0^{o}C$ или $T > 273$ К), а температура грунта отрицательная, то вокруг трубопровода будут развиваться ореолы оттаивания. В противном случае, когда температура газа отрицательная, а грунта – положительная, будут развиваться ореолы промерзания.

Количество итераций зависит от точности вычислений, но, как показывает практика одной итерации, вполне достаточно.

4.2. Изменение пропускной способности газопроводов q связанное с выбором системы прокладки (надземной, подземной, наземной, подводной) и зависимое от сезонной динамики климатических условий трассы, необходимо учитывать при экономическом сравнении различных вариантов прокладки трубопроводов.

Пропускную способность нефтепроводов и конденсатопроводов в расчетах принимают как постоянную величину.

4.3. Пропускную способность газопровода определяют по формуле

$$q = 10{,}3\, d_0^{2{,}5} \sqrt{\frac{p_н^2 - p_к^2}{\rho_г \Delta T_{ср} Z_р L}} . \qquad (11)$$

4.4. Среднемесячную пропускную способность газопровода вычисляют по формуле

$$q_{мес} = q_{год} K_{t_{мес}} , \qquad (12)$$

где

$$K_{t_{мес}} = \sqrt{\frac{Z_{год} T_{ср.год}}{Z_{мес} T_{ср\,мес}}} ;$$

$q_{год}$ – пропускная способность газопровода при $T_{ср\ год}$, млн.м^3/сут;

$T_{ср.год}$, $T_{ср.мес}$ – среднегодовая и среднемесячная абсолютные температуры транспортируемого газа, К;

$Z_{год}$, $Z_{мес}$ – коэффициенты сжимаемости газа, соответственно определяемые для $T_{ср.год}$ и $T_{ср}$.

4.5. Месячную производительность газопровода $П_{мес}$ находят по формуле

$$П_{мес} = q_{мес} \cdot T_{мес} \cdot K_з , \qquad (13)$$

где $T_{мес}$ – число дней в месяце;

$K_з$ – коэффициент загрузки газопровода, учитывающий возможные остановки и другие особенности эксплуатации газопровода ($K_з \leq 1$).

4.6. Давление газа P_x в любой точке газопровода определяют по формуле

$$P_x = \sqrt{P_н^2 - B_x} , \qquad x < \frac{P_н^2}{B} , \qquad (14)$$

где

$$B = \frac{P_г \cdot Z \cdot q^2 \cdot \Delta \cdot T_{ср}}{10^6 d_в^5} .$$

4.7. Температуру газа в любой точке газопровода следует вычислять по формулам

$$T = T_н + \frac{F}{M_г} x - D_i (P_н - \sqrt{P_н^2 - Bx}) \quad \text{при } \theta = 2\pi ; \qquad (15)$$

$$T = T_s + \frac{F}{N} + (T_н - T_s - \frac{F}{N}) e^{-\frac{N \cdot x}{M_г}} - \delta t_д \quad \text{при } 0 < \theta < 2\pi ,$$

$$\delta t_д = \frac{D_i \cdot B \cdot x}{12} \left\{ \frac{1}{\sqrt{P_н^2 - B \cdot x}} + \frac{4 e^{-\frac{N \cdot x}{2 M_г}}}{\sqrt{P_н^2 - \frac{Bx}{2}}} \right\} ;$$

где

$$N = (2\pi - \theta) \frac{d_н K}{2} ; \quad M_г = 48{,}58 q \cdot C_p \cdot \Delta ;$$

θ – функции, учитывающие тепловое взаимодействие трубопровода с окружающей средой, определяют в соответствии с п.4.16. В первом приближении принимают:

$$F = 0 ; \quad \theta = 0 ; \quad \delta t_д = 0 .$$

4.8. Температуру нефти или конденсата в любой точке трубопровода необходимо рассчитывать по формулам

$$t = t_H + \frac{(R+F)}{M_H} X \qquad \text{при } \delta = 0 \quad \text{и } \theta = 2\pi;$$

$$t = \frac{N t_S + F + R}{N+\delta} + \left[t_H - \frac{N \cdot t_S + F + R}{N+\delta} \right] e^{-\frac{(N+\delta)X}{M_H}} \qquad (16)$$

при $0 \le \theta < 2\pi$,

4.9. Среднюю по длине X расчетного участка газопровода температуру транспортируемого газа определяют по формулам

$$T_{cp} = T_S + \frac{F}{N} + \frac{M_\Gamma}{NX}\left(T_H - T_S - \frac{F}{N}\right)\left(1 - e^{-\frac{NX}{M_\Gamma}}\right) - \frac{\delta t_D}{2} \quad 0 \le \theta < 2\pi;$$

$$T_{cp} = T_H + \frac{FX}{2M} + \frac{2D_i}{3BX}\left[\rho_H^3 - (\rho_H^3 - BX)^{3/2}\right] - D_i \cdot \rho_H \quad \text{при } \theta = 2\pi. \qquad (17)$$

4.10. Среднюю по длине X расчетного участка температуру нефтепровода или конденсатопровода вычисляют по формулам

при $0 \le \theta < 2\pi$

$$t_{cp} = \frac{N t_S + F + R}{N+\delta} + \frac{M_H}{(N+\delta)\cdot X}\left[t_H - \frac{N t_S + F + R}{N+\delta} \right]\left(1 - e^{-\frac{(N+\delta)X}{M}}\right), \qquad (18)$$

$$t_{cp} = t_H + \frac{(F+R)X}{2M_H} \qquad \text{при } \delta = 0 \text{ и } \theta = 2\pi$$

4.11. Потери напора ΔP по длине X расчетного участка нефтепровода или конденсатопровода находят по следующим формулам:

$$\Delta P = P_H - P = 0{,}1\gamma_H (Z_2 - Z_1) + \Psi, \qquad \Psi = \begin{cases} \Psi_T & \bar{R}e \ge 1; \\ \Psi_\Pi & \bar{R}e < 1, \end{cases} \qquad (19)$$

где

$$\Psi_T = 0{,}026 \frac{G^{1,75} \cdot \nu^{0,25} \cdot X}{d_0^{4,75} \gamma_H^{1,75}} \left(1 + 0{,}52 \cdot 10^{-2} \frac{G^{1,75} \cdot \nu^{0,25}}{d_0^{4,75} \gamma_H^{1,75}}\right);$$

$$\Psi_\Pi = 0{,}012 \frac{G \nu X}{d_0^4 \gamma_H} \left(1 + 0{,}23 \cdot 10^{-2} \frac{G\nu}{d_0 \gamma_H}\right).$$

4.12. Температуру окружающей среды определяют в зависимости от системы прокладки трубопровода:

а) для надземного трубопровода:

$$t_s^a = t_в + \frac{8{,}72\ R_{мес}(1-A_T)}{\alpha_2^a}; \qquad (20)$$

б) для наземного открытого трубопровода $h_т > -\frac{d_н}{2}$:

$$t_s^a = t_в + \frac{\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)\cdot\alpha_2^a\cdot(t_s^a - t_в)}{\alpha_2^n\left[1+\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)\left(\frac{\alpha_2^a}{\alpha_2^n}-1\right)\right]}; \qquad (21)$$

в) для наземного трубопровода в насыпи:

$$t_s^н = \begin{cases} t_f & \text{при } \xi_п > 0 \text{ и } \rho_н < (h_н - h_т - \xi_п); \\ t_в + \dfrac{(2\pi-\beta)\,\alpha_2^n (t_s^n - t_в)}{\beta\,\alpha_2^н + (2\pi-\beta)\,\alpha_2^n}, & \text{при } \xi_п = 0 \quad \rho_н = \dfrac{d_н}{2} \text{ или } \begin{cases} \rho_н \geq (h_н - h_т - \xi_п); \\ \xi_п \geq 0 \end{cases} \end{cases} \qquad (22)$$

г) для подземного трубопро

$$t_s^n = \begin{cases} t_f & \text{при } \begin{cases} \rho_п = \dfrac{d_н}{2} \text{ и } \xi_п \\ \dfrac{d_н}{2} < \rho_п < |h_т + \ldots| \end{cases} \\ t_\infty & \text{при } \dfrac{h_0}{d_н} < 3{,}0 \text{ и } \rho_п \geq |h_т + \xi_п| \quad \xi_п = 0;\ \rho_п = \dfrac{d_н}{2}; \\ t_в & \text{при } \dfrac{h_0}{d_н} \leq 3{,}0 \quad \rho_п \geq |h_т + \xi_п| \quad \xi_п = 0\ \rho_п = \dfrac{d_н}{2}; \end{cases} \qquad (23)$$

д) Для подводного трубопровода в проточной воде:

$$t_s^в = t_{н_2о}, \qquad (24)$$

где $\beta, \alpha_2^н, \alpha_2^п, \ldots \xi_п, \rho_п, \rho_н$ – определяют согласно пп. 4.I4; 3.4; 4.I5 настоящего Руководства.

4.I3. Коэффициент теплопередачи трубопровода в окружающую среду следует рассчитывать по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{D_н}{2}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\lambda_i}\,\ell n\,\frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \qquad (25)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты внутренней и внешней теплоотдачи соответственно от продукта, движущегося по трубопроводу к внутренней стенке трубы и от ее внешней поверхности в атмосферу (в ккал/м²·ч°С). Для практических расчетов магистральных трубопроводов принимают, что термические сопротивления теплоотдачи как от продукта, движущегося по трубопроводу (величина $1/\alpha_1$), так и самой металлической стенки трубы (толщина которой обычно никогда не превышает 3 см при коэффициенте теплопроводности стали более 40 ккал/м·ч°С), равны нулю с погрешностью менее 0,5%;

λ_i – коэффициент теплопроводности i-го кольцевого слоя теплоизоляции, ккал/м·ч°С;

d_i, d_{i+1} – диаметры соответственно i-го и i+1-го кольцевого слоя теплоизоляции, м.

4.14. Коэффициент внешней теплоотдачи трубопровода в окружающую среду определяют в зависимости от системы прокладки трубопровода:

а) для надземного трубопровода

$$\alpha_2^a = \frac{33{,}5\,\lambda_в}{D_н^{0{,}4}} \left(\frac{v_{ср}}{\nu}\right)^{0{,}6}, \qquad (26)$$

где $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности воздуха, ккал/м·ч·°С;

$\nu_в$ – кинематическая вязкость воздуха, м²/ч.

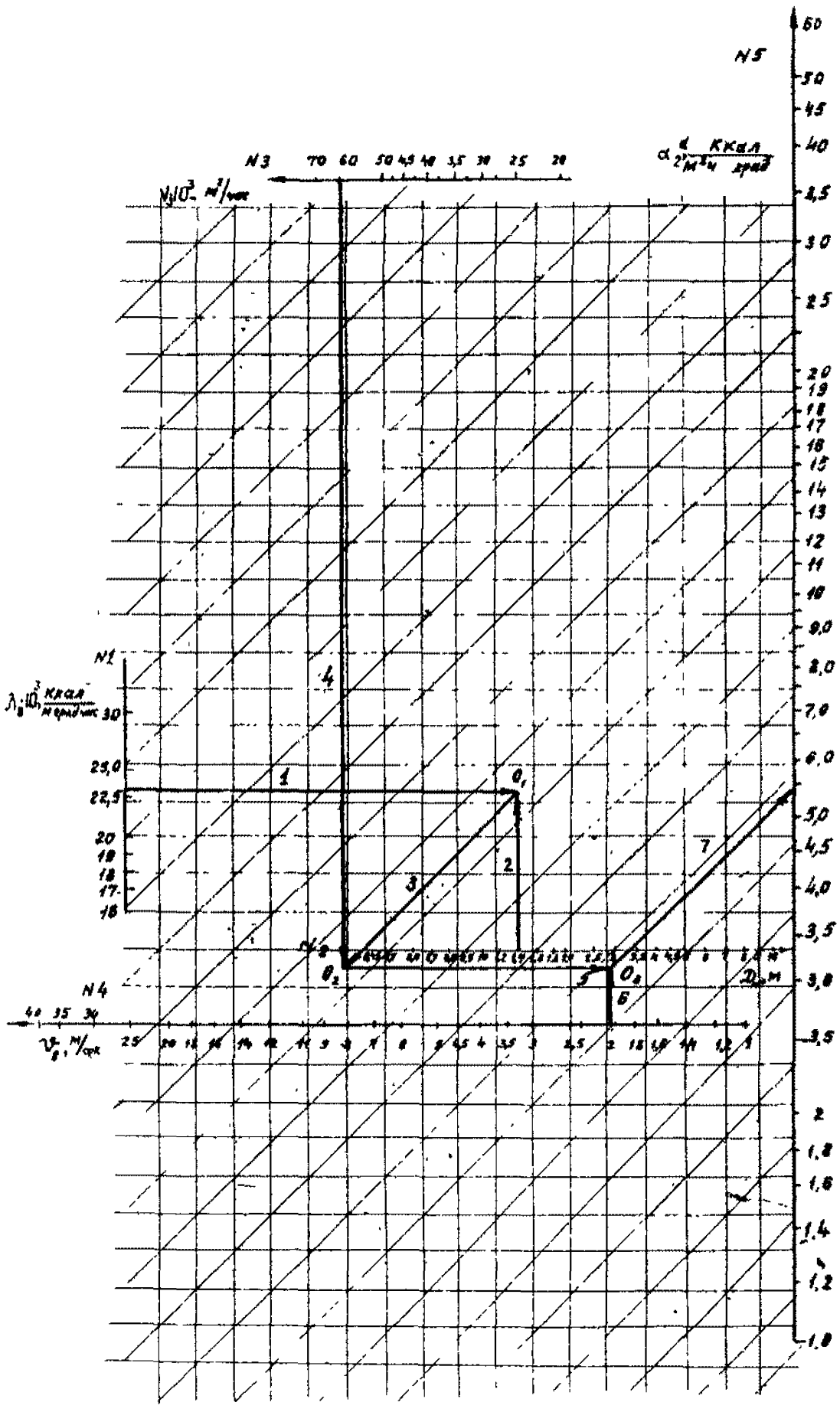
Зависимости параметров $\lambda_в$ и $\nu_в$ от температуры воздуха приведены на рис.4,б.

Расчет величины α_2^a ведут по номограмме (см.рис.4,а) в следующем порядке:

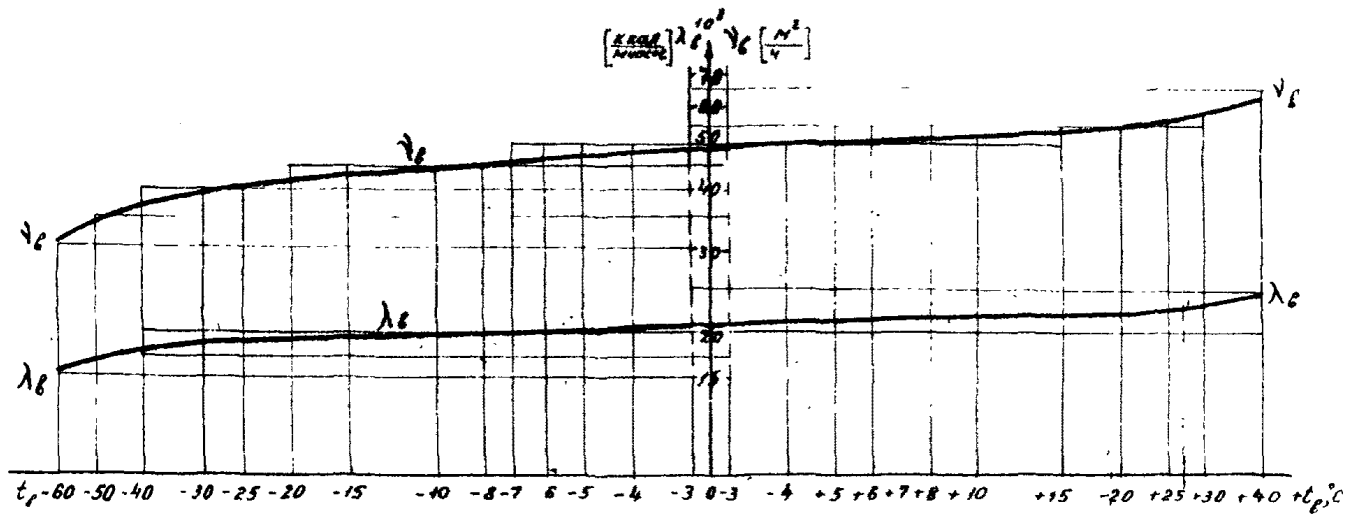
на шкале № 1 $\lambda_в$ (теплопроводности воздуха) и № 2 $D_н$ (внешнего диаметра трубопровода) находим требуемые значения $\lambda_в$ и $D_н$ и через полученные точки проводим прямые 1 и 2, ортогональные между собой, до пересечения их в точке O_1;

от точки O_1 ведем линию 3 под углом 45° по обозначенным направляющим прямым до пересечения в точке O_2 с вертикальной линией 4, проведенной от заданного значения $\nu_в$ (кинематической вязкости) шкалы № 3;

на шкале № 4 (скорости ветра) находим точку, соответствующую заданному значению $v_в$, и через эту точку и точку O_2 проводим ортогональные между собой прямые 5 и 6 до пересечения их в точке O_3;



а



б

Рис.4. Номограммы для определения коэффициента внешней теплоотдачи надземного трубопровода:
а–номограмма для определения коэффициента внешней теплоотдачи надземного трубопровода α_2^e ;
б–вспомогательная номограмма для определения кинематической вязкости воздуха (ν_t) и теплопроводности воздуха (λ_t)

б) для наземного открытого трубопровода

$$\alpha_2^a = \left(1 - \frac{\theta}{2\pi}\right)\alpha_2^a + \frac{\theta\,\alpha_2^n}{2\pi}; \qquad (27)$$

в) для наземного трубопровода в насыпи:

$$\alpha_2^н = \begin{cases} \dfrac{\beta}{\pi d_н\left[\dfrac{1}{\lambda_0}\ell n\dfrac{2(h_н - h_т)}{d_н} + \dfrac{1}{(h_н - h_т)\alpha_{2R}^в}\right] + \left(1 - \dfrac{\beta}{2\pi}\right) d_н \cdot K^n} \\ \hline 1 - \left(1 - \dfrac{\beta}{2\pi}\right)\dfrac{d_н \cdot K^n}{2\lambda_{из}}\ell n\dfrac{d_н}{d_0} \end{cases}$$

при $\xi_n = 0$, $\rho_н = \frac{d_н}{2}$ или $\rho_н \geq (h_н - h_т)$;

α_2^n при $h_s = (h_н + h_0 - \ldots)$; при $\xi_n > 0$, $\rho_н = \frac{d_н}{2}$ и $h_т < -\frac{d_н}{2}$;

$$\frac{2\lambda_0}{d_н \ell_н \dfrac{2(h_н - h_т - \xi_n)}{d_н}};$$

при $\xi_n > 0$, $\rho_н = \frac{d_н}{2}$ и $h_т \geq -\frac{d_н}{2}$,
при $\xi_n > 0$ и $\frac{d_н}{2} < \rho_н < (h_н - h_т - \xi_n)$

$$\frac{2\lambda_0}{d_н \ell n \dfrac{2\rho_н}{d_н}}$$

где

$$\beta = \begin{cases} 0 \text{ при } h_т < -\dfrac{d_н}{2}; \\ 2\arccos\dfrac{|h_т|}{h_н - h_т} \text{ при } -\dfrac{d_н}{2} \leq h_т \leq 0; \\ 2\pi - 2\arccos\dfrac{h_т}{h_н - h_т} \text{ при } 0 < h_т \leq \dfrac{h_н}{2}; \\ 2\pi \text{ при } h_т > \dfrac{h_н}{2}; \end{cases}$$

$K^n, \alpha_2^n, \xi_n, \rho_n$ – определяют согласно пп.4.13; 4.14; 3.4.14. данного Руководства;

α_{2R} – вспомогательный коэффициент внешней теплоотдачи наземного трубопровода, эквивалентный α_2^a, который рассчитывают по формуле (26) или по номограмме рис.4 при условии $d_н = 2(h_н - h_т)$;

г) для подземного трубопровода:

$$\alpha_2^n = \frac{2\lambda_0}{D_н \ell n\left\{\dfrac{2h_s}{d_н}\left[1 + \sqrt{1 + \dfrac{d_н}{h_s}}\right]\right\}}; \qquad (28)$$

Расчет величины α_2^n удобно осуществлять с помощью номограммы, приведенной на рис.5.

д) для подводного трубопровода в проточной воде :

$$\alpha_2^в = 486\sqrt{\frac{v_в}{d_н}}\ ,\quad v_в \geq 10^{-3}\ м/с\ , \qquad (30)$$

е) для подводного трубопровода в стоячей воде :

$$\alpha_2^в = \alpha_2^п\ ,\ v_в < 10^{-3}\ м/с\ ,$$

где $v_в$ - скорость течения воды, м/с.

Расчет $\alpha_2^в$ целесообразно осуществлять с помощью номограммы, приведенной на рис.6.

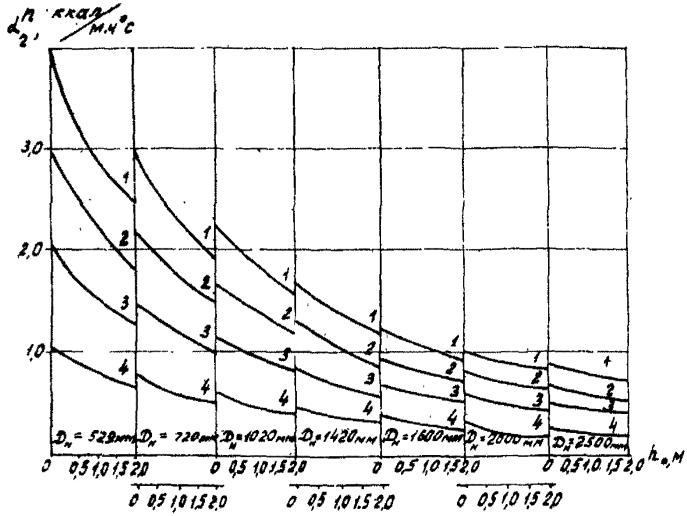


Рис.5. Номограмма для определения коэффициента внешней теплоотдачи подземного трубопровода $\alpha_2^п$ в зависимости от глубины заложения трубопровода h_0 и внешнего диаметра трубопровода $d_н$ при разных значениях коэффициентов теплопроводности грунтов:

I- λ =2,0 ккал/м ч.°С; 2- λ =I,5 ккал/м ч°С; 3- λ =I,0 ккал/м ч°С; 4- λ = 0,5 ккал/м ч°С

4.I5. Ореолы оттаивания или промерзания грунта вокруг трубопровода определяют в зависимости от системы прокладки трубопровода:

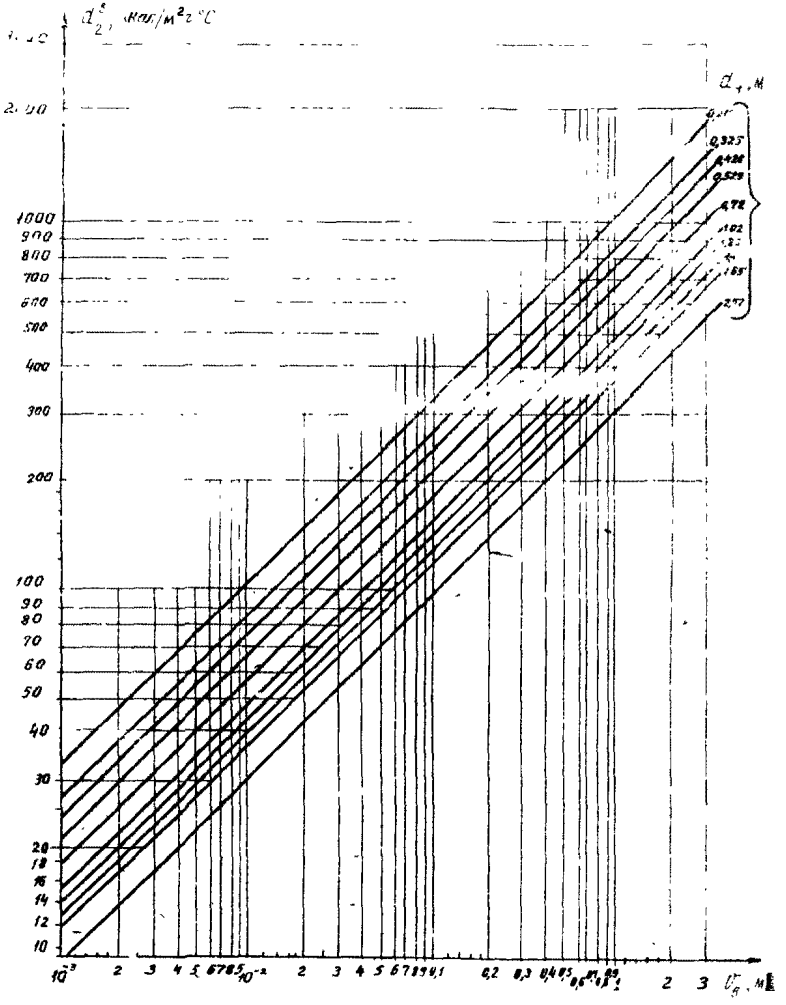


Рис.6. Номограмма для определения коэффициента внешней теплоотдачи подводного трубопровода α_2^0

а) для подземного трубопровода ореолы рассчитывают из следующего трансцендентного уравнения:

$$\tau = \frac{(\theta_\phi + |C_0 t_f - C_\infty t_\infty|)\rho_n(\rho_n - \rho_{n-1})}{K_t \lambda_0 |t_f - t|}\left[\ell n \frac{2\rho_n}{d_н} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{из}} \ell n \frac{d_н}{d_0}\right] + \quad (31)$$

$$+ \frac{(\rho_n - \rho_{n-1})}{K_t \cdot 2a_0}\left[\rho_n - \frac{\rho_n^2 - \frac{d_н^2}{4}\left(1 - \frac{2\lambda_0}{\lambda_{из}} \ell n \frac{d_н}{d_0}\right)}{2\rho_n\left(\ell n \frac{2\rho_n}{d_н} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{из}} \ell n \frac{d_н}{d_0}\right)}\right],$$

при $n = 0 \qquad \rho_{n=0} = \frac{d_н}{2}$,

где $K_t = \begin{cases} 1 \text{ при } t \neq const; \\ 2 \text{ при } t = const; \end{cases}$

б) для подводного трубопровода в проточной воде ореолы обмерзания рассчитывают по следующим зависимостям:

$$\rho_n^б = \frac{d_н}{2}, \text{если} \begin{cases} t_н \geq t_f \quad или \quad t_{н_2 0} > t_f \\ t_н < t_f \;\; и \;\; t_{н_2 0} > t_f \;\; и \;\; \alpha_2^б |t_{н_2 0}| \geq \dfrac{|t_н|}{\dfrac{d_н}{2\lambda_{из}} \ell n \dfrac{d_н}{d_0}} \end{cases}; \quad (32)$$

$$\alpha_2^б \rho_n^б \left(\frac{1}{\lambda_0} \ell n \frac{2\rho_n^б}{d_н} + \frac{1}{\lambda_{из}} \ell n \frac{d_н}{d_0}\right) = \left|\frac{t_н}{t_{н_2 0}}\right| \text{если } t_н < t_f \; и \; t_{н_2 0} > t_f \; и \; \alpha_2^б |t_{н_2 0}| \geq \frac{|t_н|}{\frac{d_н}{2\lambda_{из}} \ell n \frac{d_н}{d_0}} \quad (33)$$

$$\tau = \frac{Q_\phi \cdot \rho_n^б \cdot (\rho_n^б - \rho_{n-1}^б)}{k_t \cdot \lambda_0 |t_f - t|}\left[\ell n \frac{2\rho_n^б}{d_н} + \frac{\lambda_0}{\lambda_{из}} \ell n \frac{d_н}{d_0}\right] \text{если } t_{н_2 0} \leq t_f \; и \; t_н < t_f, \quad (34)$$

где $k_t = \begin{cases} 1 \text{ при } t \neq const; \\ 2 \text{ при } t = const; \end{cases}$

в) для наземного открытого трубопровода и наземного в насыпи трубопровода ореолы оттаивания (промерзания) вычисляют:

$$\rho_0 = \begin{cases} \dfrac{d_н}{2} + \left(\rho_n - \dfrac{d_н}{2}\right)\left[1 - 0{,}4\left(\dfrac{2h_т}{d_н} + 1\right)\right] & при \; h_т > -\dfrac{d_н}{2} \\ \rho_n & при \; h_т \leq -\dfrac{d_н}{2}; \end{cases} \quad (35)$$

$$\rho_н = \begin{cases} \frac{d_н}{2} + 0{,}7\left(\rho_п - \frac{d_н}{2}\right); & при\ h_т \geq \frac{h_н}{2} \\ \frac{d_н}{2} + \left(\rho_п - \frac{d_н}{2}\right)\left[1 - 0{,}3\left(\frac{2h_т + d_н}{h_н + d_н}\right)\right] & при\ -\frac{d_н}{2} \leq h_т \leq \frac{h_н}{2} \\ при\ h_т \leq -\frac{d_н}{2} \end{cases} \quad (36)$$

Для удобства пользования трансцендентным уравнением (31) в расчете мощности ореолов оттаивания (промерзания) грунтов при условии $t = const$ были построены номограммы (см.рис.7, 8 для случаев трубопроводов без теплоизоляции (рис.7) и с теплоизоляцией (рис.8).

Расчет по номограмме (7а) ведут следующим образом:

1) на шкале № 1 (время многолетнего оттаивания τ) и № 1 (средней за период τ температуры поверхности трубопровода $t_т$) находим требуемые значения τ и $t_т$ и через полученные точки проводим взаимно перпендикулярные прямые 1 и 2 до пересечения их в точке 0_1;

2) от точки 0_1 проводим прямую 3 под углом 45° параллельно обозначенным направляющим до пересечения в точке 0_2 с перпендикуляром (прямая 4), опущенным из заданного значения $Q_ф$ на шкале № 3 (теплота фазовых переходов воды в лед в грунте);

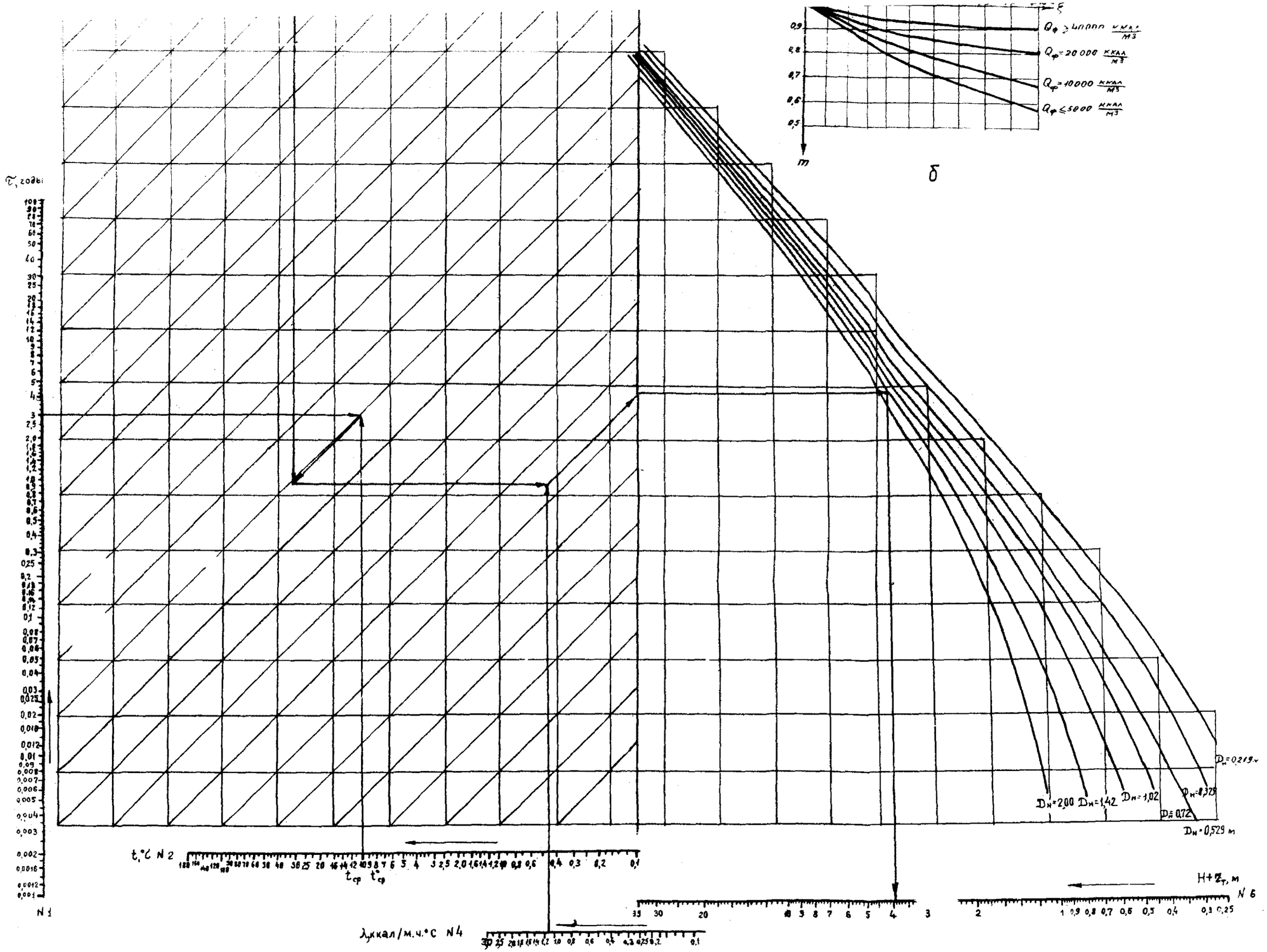
3) от точки, соответствующей значению коэффициента теплопроводности грунта λ на шкале № 4, восстанавливаем перпендикуляр (линия 6) до пересечения в точке 0_3 с горизонтальной прямой 5, проведенной через точку 0_2.

4) из точки 0_3 проводим прямую 7 под углом 45° параллельно направляющим до пересечения в точке 0_4 с вспомогательной прямой;

5) через точку 0_4 на вспомогательной шкале проводим горизонтальную прямую 8 до пересечения в точке 0_5 с кривой, соответствующей заданному диаметру;

6) из полученной точки 0_5 опускаем перпендикуляр 9 до пересечения со шкалой № 6, на которой находим значение мощности ореола оттаивания грунта под трубопроводом от центра трубы.

Для получения мощности ореола оттаивания грунта от нижней образующей трубопровода из полученного значения $H + z_т$ вычитаем величину радиуса трубопровода $z_т$.



τ, годы
N 1
t, °C N 2
$t_{ср}$ $t^{\circ}_{ср}$
λ, ккал/м.ч.°C N 4
H+Z_T, м
N 6
$D_н$=2,00 $D_н$=1,42 $D_н$=1,02
$D_н$=0,72
$D_н$=0,529 м
$D_н$=0,219 м
$Q_ф$ ≥ 40000 ккал/м³
$Q_ф$ = 20 000 ккал/м³
$Q_ф$ = 10000 ккал/м³
$Q_ф$ ≤ 5000 ккал/м³
m
ξ
б

Полученное расчетное значение H соответствует для грунтов, среднегодовая температура которых $t_\infty = t_f$.

В случае $t_\infty \neq t_f$ для наиболее типичных грунтов, для которых соблюдается соотношение $\frac{Q}{\lambda} = 15000\text{–}25000$, величину сокращения ореола оттаивания при низких среднегодовых температурах грунтов получают из рис.7,б. Для этого величину ореола оттаивания H, рассчитанную по номограмме (см.рис.7,а), умножают на поправочный коэффициент m, полученный из рис.7,б в зависимости от среднегодовой температуры грунта.

Для расчета ореолов оттаивания (промерзания) грунтов вокруг теплоизолированных трубопроводов уравнение (31) приведено к следующему виду для случая, когда $t_\infty = t_f = 0°C$:

$$\left.\begin{aligned} \tau &= a\,Z \\ Z &= Z_1 + Z_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (37)$$

где $$a = \frac{Q_\phi}{2\lambda_0 (t_f - t)};$$

Z_1, Z_2 – функции глубины протаивания (промерзания).

Номограммы для определения величин a, β, Z и Z_2 представлены на рис.8.

Номограммы составлены для труб с диаметрами: 1420, 720, 426, 325 и 219 мм.

Для промежуточных значений диаметров труб определяемые величины находят интерполяцией в приведенной последовательности:

1) определяем исходные данные Q_ϕ, $\lambda_T (\lambda_M)$, t_T, $\delta_{из}$, τ, τ_T и задаем ряд значений ρ;

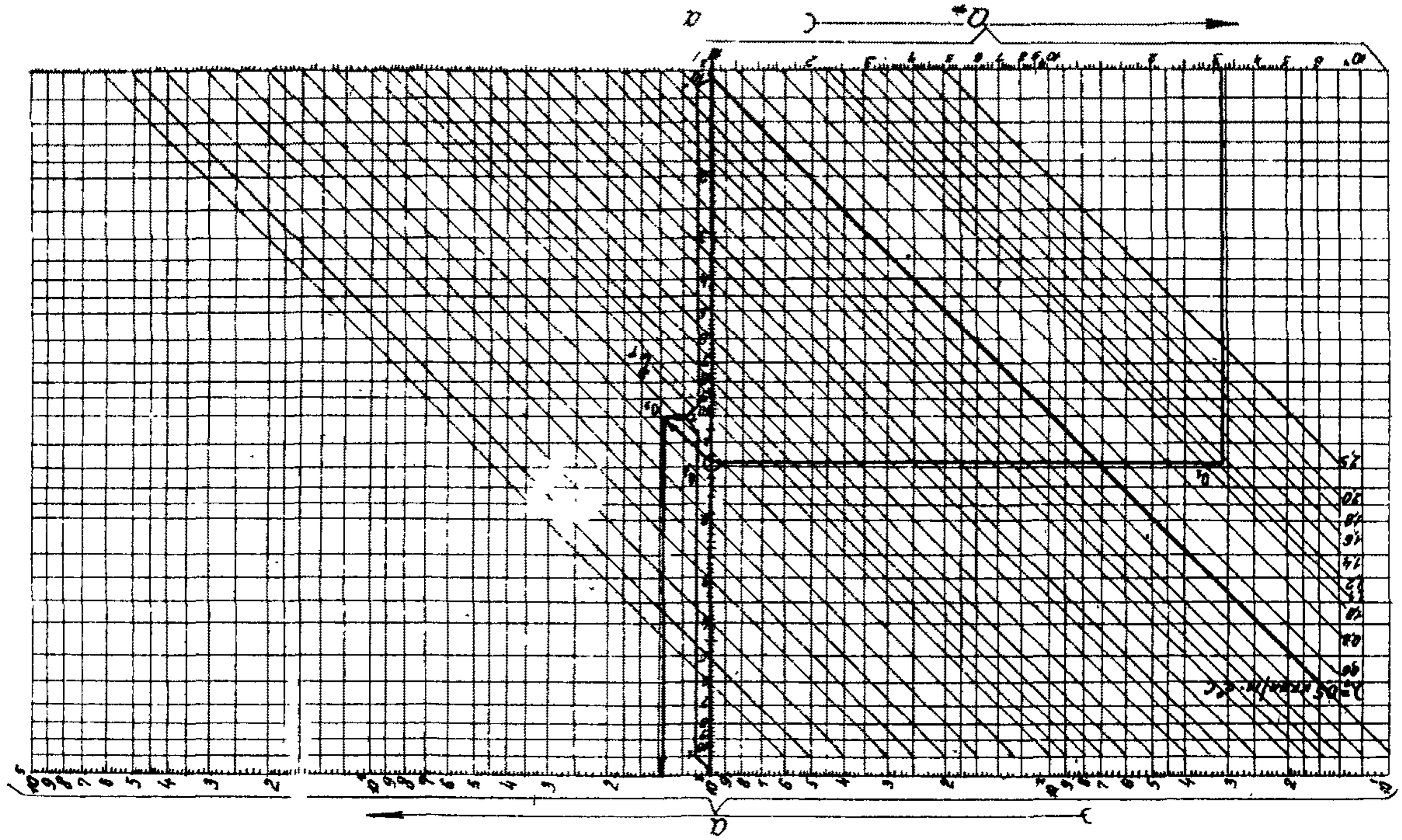
2) по номограмме (рис.8,а) в соответствии с Q_ϕ, λ_T (при определении ореола оттаивания) или λ_M (при определении ореола промерзания) и t_T находим величину a;

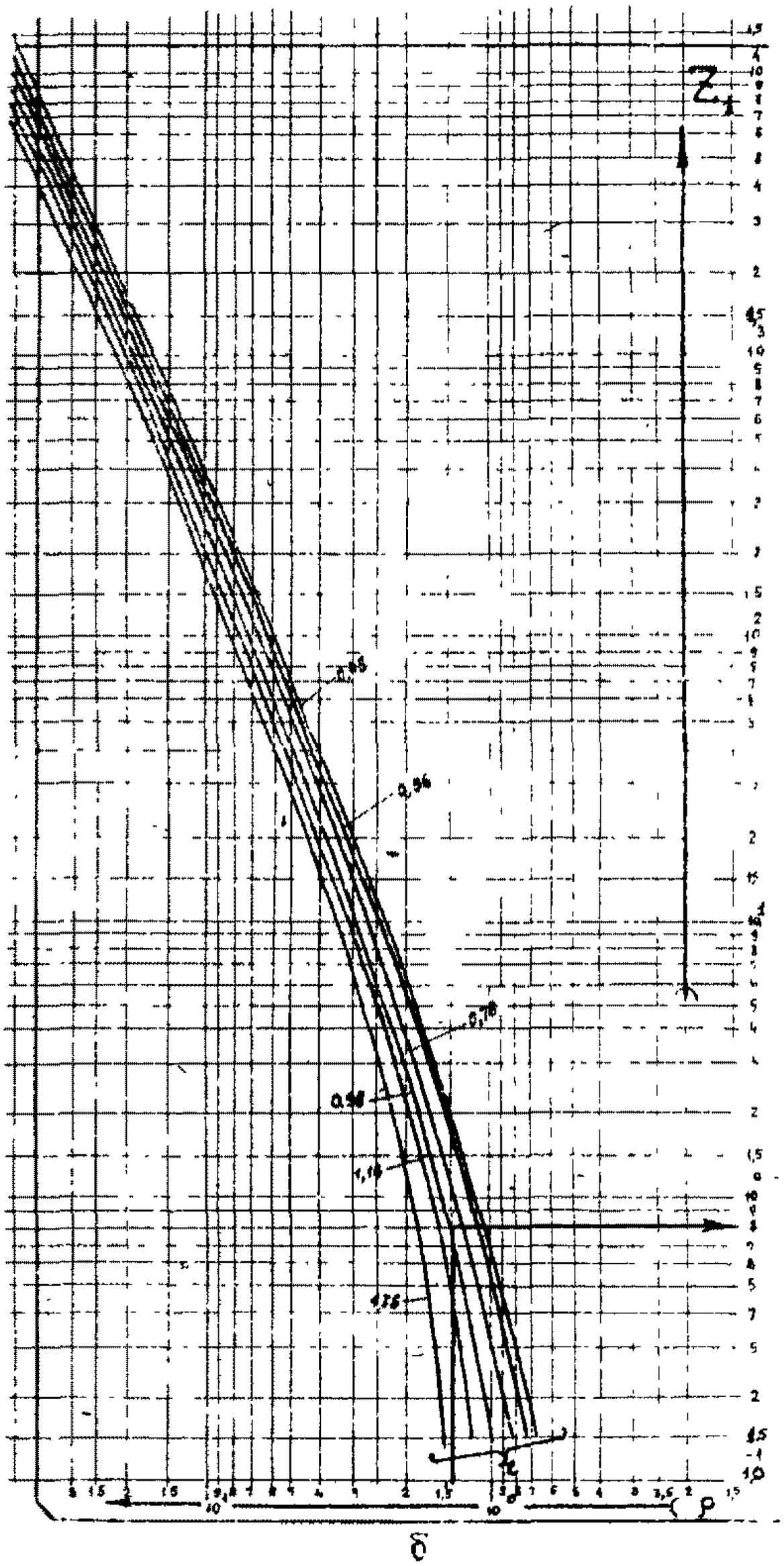
3) по номограмме на рис.8,в в соответствии с λ_T или λ_M, $\lambda_{из}$, τ, τ_T находим величину β;

4) по номограмме (рис.8,б) для принятых значений ρ находим соответствующие значения Z_1;

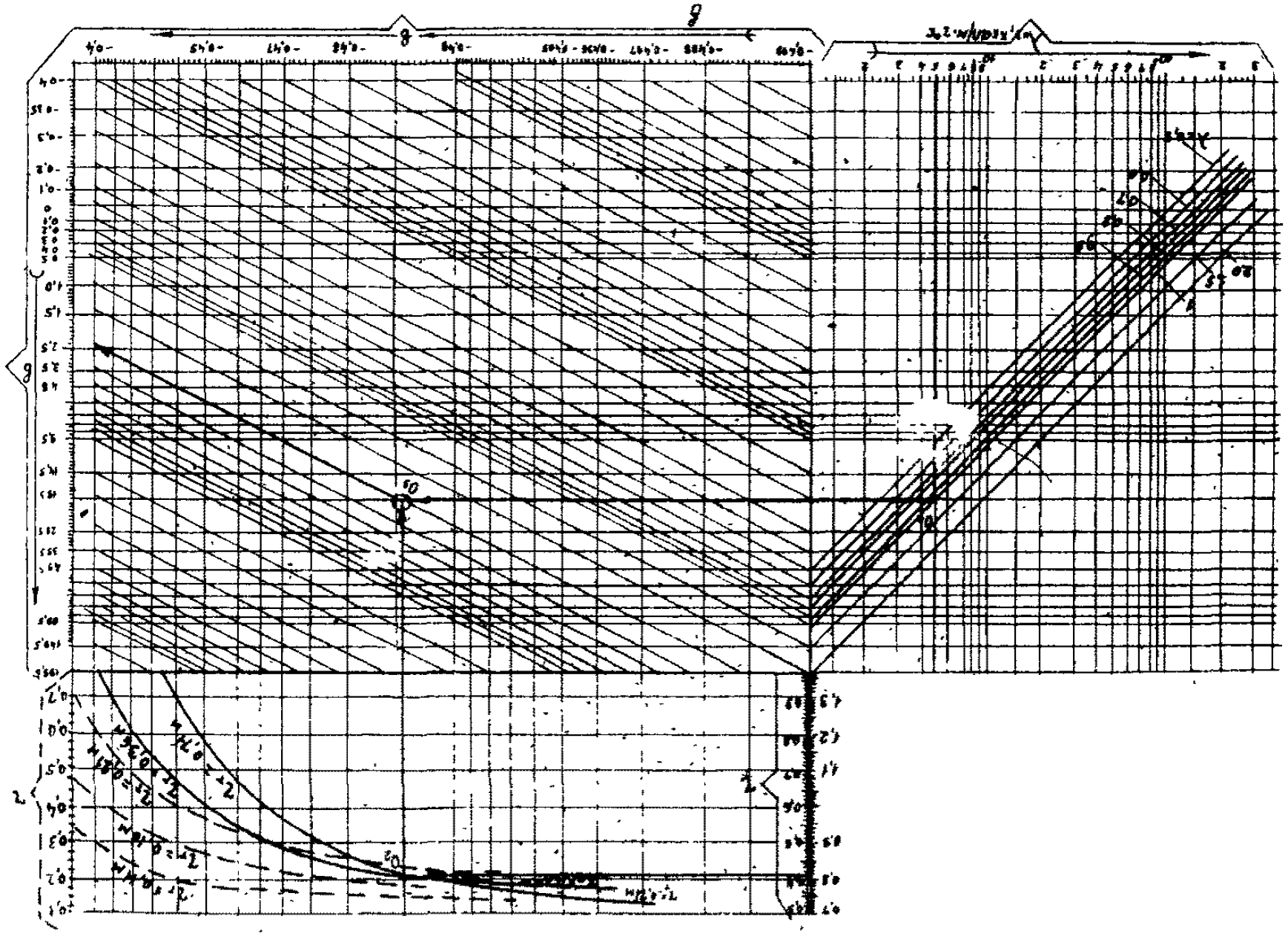
5) по номограмме (рис.8,г) в соответствии с полученным значением β для принятых значений ρ находим Z_2;

6) суммируем Z_1 и Z_2, находим ряд значений Z;


v
Q
D
C



δ



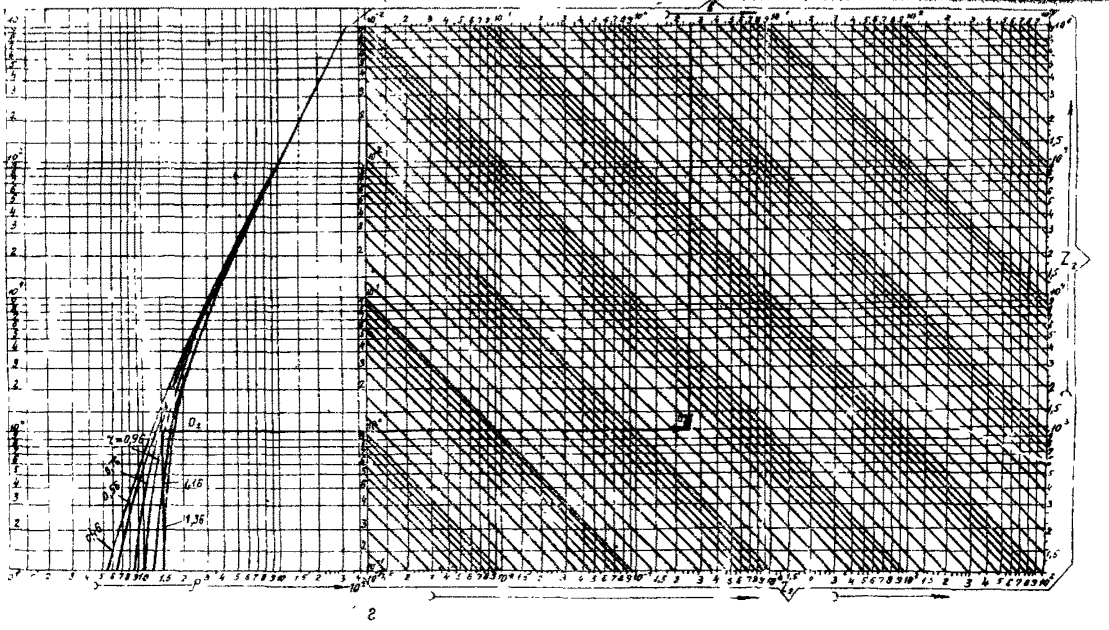


Рис.8. Номограммы для определения ореолов оттаивания-промерзания грунтов в основании подземных трубопроводов с теплоизоляцией:

а-номограмма для определения параметра α ; б-номограмма для определения значения функции z_1 ;
в-номограмма для определения параметра β ; г-номограмма для определения значения функции z_2

7) по формуле (37) определяем τ, которому соответствуют принятые значения ρ;

8) строим график зависимости τ от ρ (или H), по которому находим искомое значение глубины многолетнего оттаивания или промерзания грунта под трубой H на любой момент эксплуатации трубопровода.

4.16. Функцию θ теплообмена трубопровода с окружающей средой в зависимости от системы прокладки рассчитывают по следующим формулам:

а) для надземной прокладки:

$$\theta = 0;$$

б) для подземной и подводной прокладки в стоячей воде:

$$\theta = \begin{cases} 0 & \text{при } \rho_n = \frac{d_н}{2} \text{ и } \begin{cases} \xi_n = 0 \\ \xi_n > 0 \text{ и } \xi_{ecm} \le \xi_n \end{cases} \\ 2\arccos\left|\frac{h_т + \xi_{ecm}}{h_т + \xi_n}\right| & \text{при } \rho_n = \frac{d_н}{2},\ |h_т| \ge \xi_{ecm} \text{ и } \xi_n > 0,\ \xi_{ecm} \\ 2\pi - 2\arccos\left|\frac{h_т + \xi_{ecm}}{h_т + \xi_n}\right| & \text{при } \rho_n = \frac{d_н}{2},\ |h_т| < \xi_{ecm} \text{ и } \xi_n > 0,\ \xi_{ecm} \\ 2\pi & \text{при } \frac{d_н}{2} < \rho_н < |h_т + \xi_n|; \\ 2\arccos\left|\frac{h_т + \xi_{ecm}}{\rho_n}\right| & \text{при } |h_т| < \xi_{ecm} \text{ и } \rho_n \ge |h_т + \xi_n|; \\ 2\pi - 2\arccos\left|\frac{h_т + \xi_{ecm}}{\rho_n}\right| & \text{при } |h_т| \ge \xi_{ecm} \text{ и } \rho_n \ge |h_т + \xi_n|; \end{cases} \quad (38)$$

в) для наземного трубопровода в насыпи:

$$\theta = \begin{cases} 0 & \text{при } \begin{cases} \rho_н > \frac{d_н}{2},\ h_т \ge \frac{h_н}{2} \text{ и } \rho_н \ge |h_н - h_т - \\ \rho_н = \frac{d_н}{2} \text{ при } \begin{cases} \xi_n = 0 \\ \xi_n > 0 \text{ и } h_т < -\frac{d_н}{2} \text{ и } \xi_{ecm} \le |\xi_n \end{cases} \end{cases} \\ 2\arccos\left|\frac{h_т + \xi_{ecm}}{h_т - h_н - \xi_n}\right| & \text{при } \rho_н = \frac{d_н}{2},\ h_т < -\frac{d_н}{2},\ |h_т| \ge \xi_{ecm} \text{ и } \xi_n > 0 \text{ и } \xi_{ecm} \\ 2\pi - 2\arccos\left|\frac{h_т + \xi_{ecm}}{h_т - h_н - \xi_n}\right| & \text{при } \rho_н = \frac{d_н}{2},\ h_т < -\frac{d_н}{2},\ |h_т| < \xi_{ecm} \text{ и } \xi_n > 0 \text{ и } \xi_{ecm} \\ \beta & \text{при } \rho_н = \frac{d_н}{2},\ \xi_n > 0 \text{ и } -\frac{d_н}{2} \le h_т < \frac{h_н}{2} \end{cases}$$

$$\theta = \begin{cases} \pi & \text{при } \rho_н = \frac{d_н}{2},\ \xi_п > 0 \text{ и } h_т \geq \frac{h_н}{2} \\ 2\pi & \text{при } \frac{d_н}{2} < \rho_н < (h_н - h_т - \xi_п) \\ 2\arccos\frac{h_т}{h_н - h_т} & \text{при } \rho_н \geq (h_н - h_т - \xi_п) \text{ и } \frac{h_н}{2} > h_т \geq 0 \\ 2\arccos\frac{|h_т + \xi_{ест}|}{\rho_н} & \text{при } \rho_н \geq (h_н - h_т - \xi_п) \text{ и } h_т < 0, |h_т| < \xi_{ест} \\ 2\pi - 2\arccos\frac{|h_т + \xi_{ест}|}{\rho_н} & \text{при } \rho_н \geq (h_н - h_т - \xi_п) \text{ и } h_т < 0, |h_т| \geq \xi_{ест} \end{cases} \quad (39)$$

г) для наземного открытого трубопровода

$$\left.\begin{aligned} \theta = 2\arccos\frac{2h_т}{d_н} &, \text{ если } \rho_0 \geq \frac{d_н}{2} \text{ и } h_т > 0; \\ \theta = 2\pi - 2\arccos\frac{2|h_т|}{d_н} &, \text{если } \rho_0 \geq \frac{d_н}{2} \text{ и } h_т \leq 0; \end{aligned}\right\} \quad (40)$$

$\theta = 0$, если $\rho_0 = \frac{d_н}{2}$ и только в формулах (I5)–(I8);

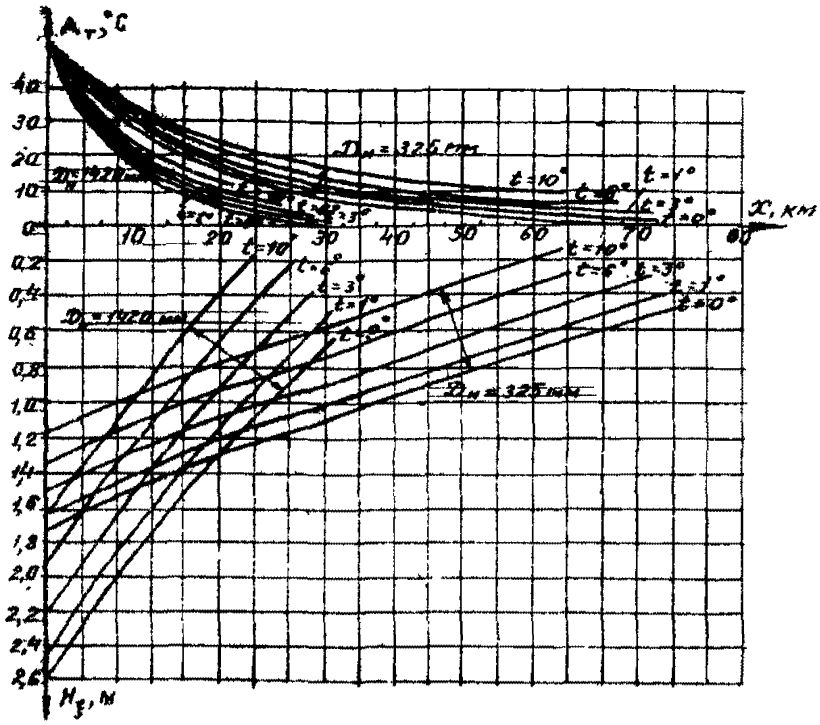
д) для подводного трубопровода в проточной воде:

$$\theta = 0, \quad \text{если} \quad \rho_п^в = \frac{d_н}{2}; \qquad \theta = 2\pi, \quad \text{если} \quad \rho_п^в > \frac{d_н}{2}, \quad (41)$$

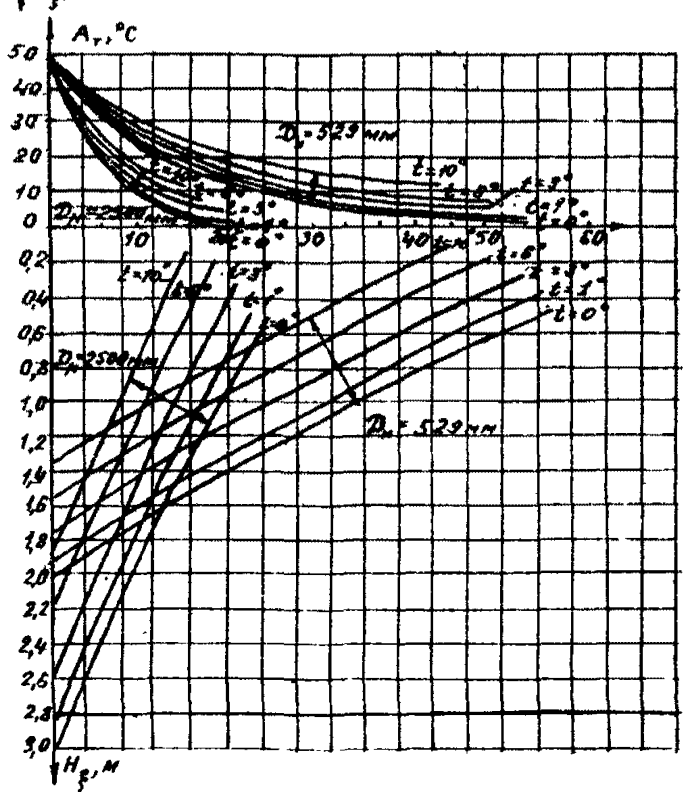
где $\xi_{ест}$, $\xi_п$ – глубины сезонного оттаивания или промерзания грунтов в естественных условиях (вне зоны теплового влияния трубопровода) и над трубопроводом соответственно определяют по п.3.4 настоящего Руководства.

4.I7. Для расчета глубины H_ξ сезонного оттаивания или промерзания грунта под подземными трубопроводами без теплоизоляции с учетом изменения его температурного режима во времени по длине трубы используют методику, учитывающую периодическое изменение температуры на внешней стенке трубы.

Расчет ведут по номограммам (рис.9), по которым при известной расчетной среднегодовой температуре t и амплитуде температур на начальном участке можно определить изменение амплитуды температур по поверхности трубопровода $A_т$ и рассчитать мощность сезонных ореолов оттаивания грунтов под трубопроводом.

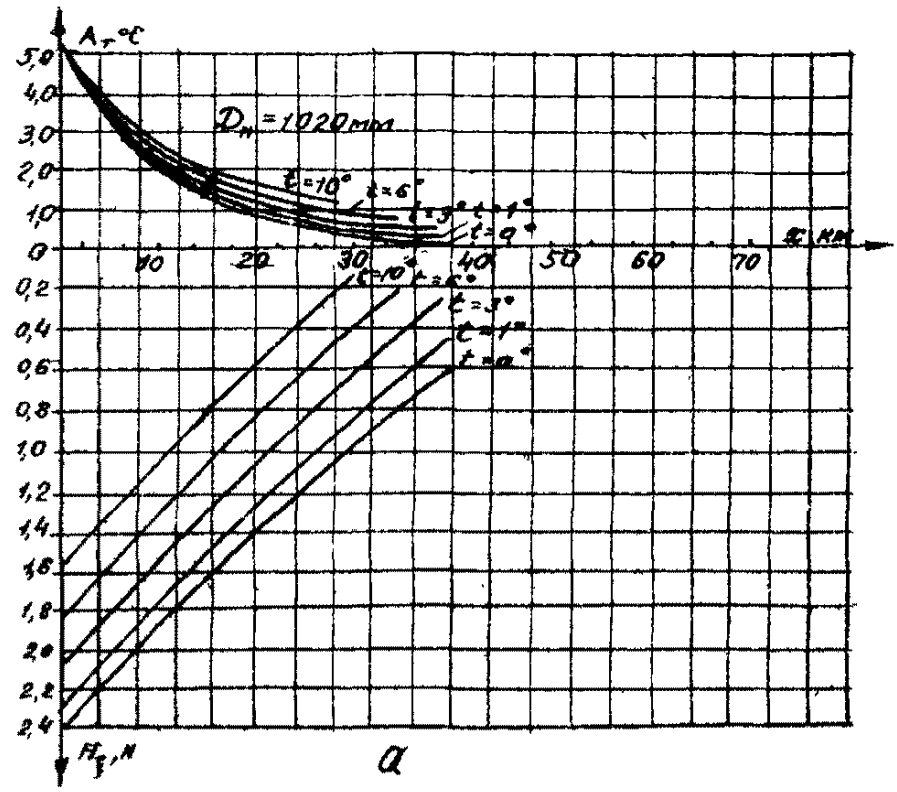


A_T, °C
D_H = 325 мм
D_H = 1420 мм
D_H = 325 мм
D_H = 1420 мм
x, км
H_ξ, м

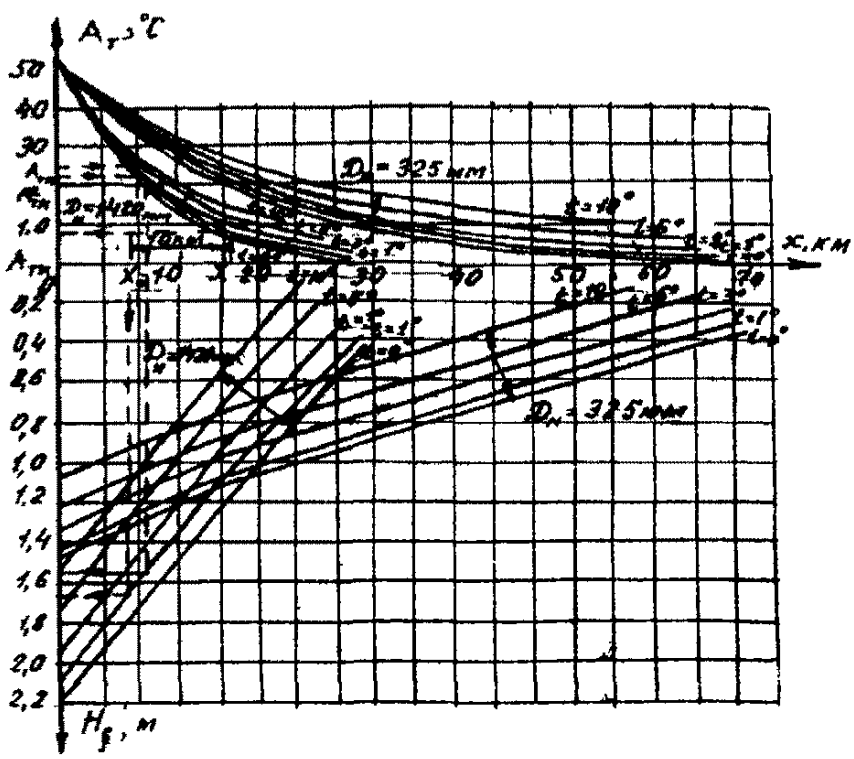


A_T, °C
D_H = 529 мм
D_H = 2500 мм
D_H = 2500 мм
D_H = 529 мм
H_ξ, м

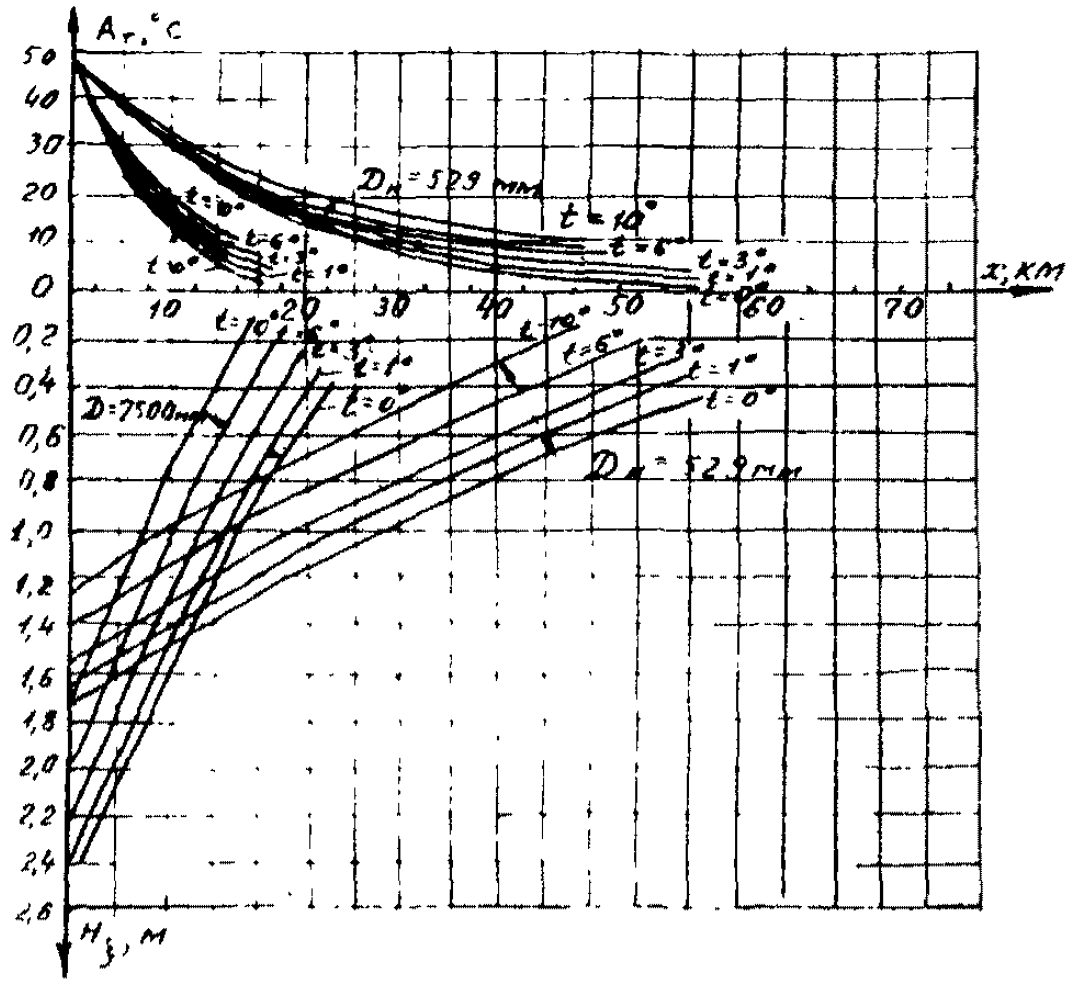
a

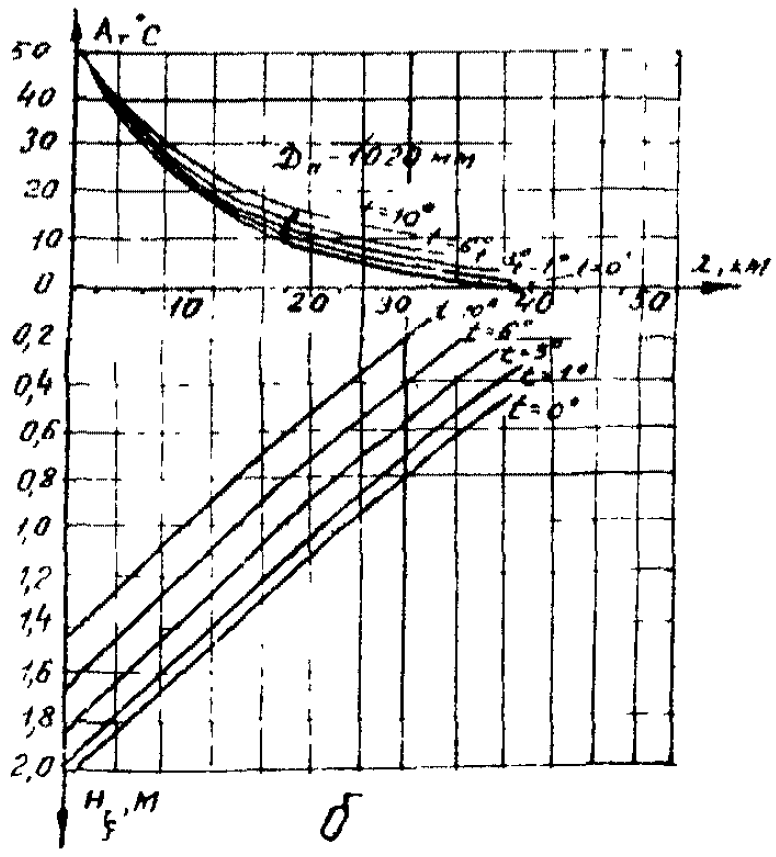

A_T, °C
$D_н$ = 1020 мм
t = 10°
t = 6°
t = 3°
t = 1°
t = 0°
t = -10°
t = -5°
t = -3°
t = -1°
t = 0°
x, км
H_g, м

а

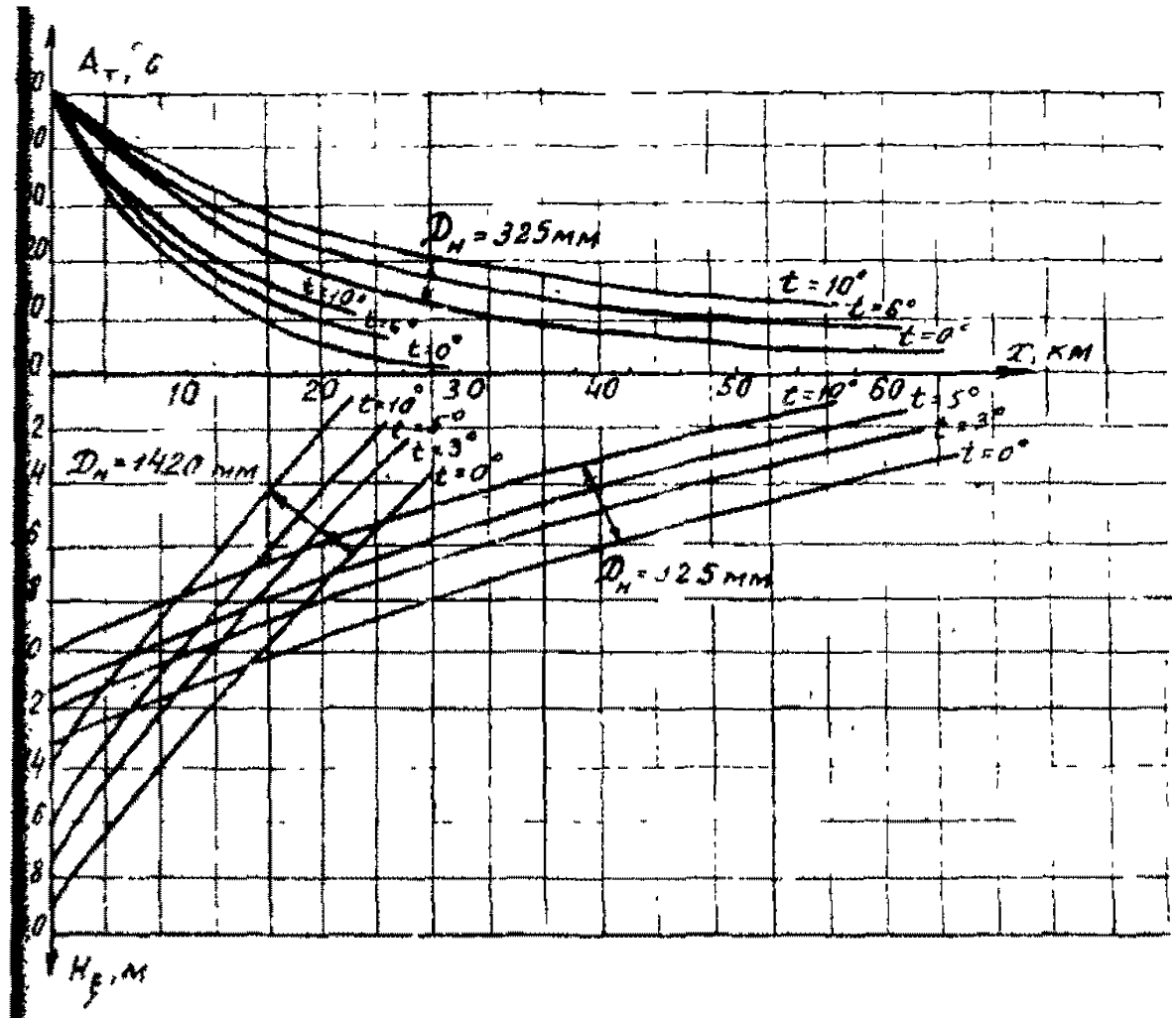

A_T, °C
$D_н$ = 325 мм
$D_н$ = 325 мм
x, км
H_g, м

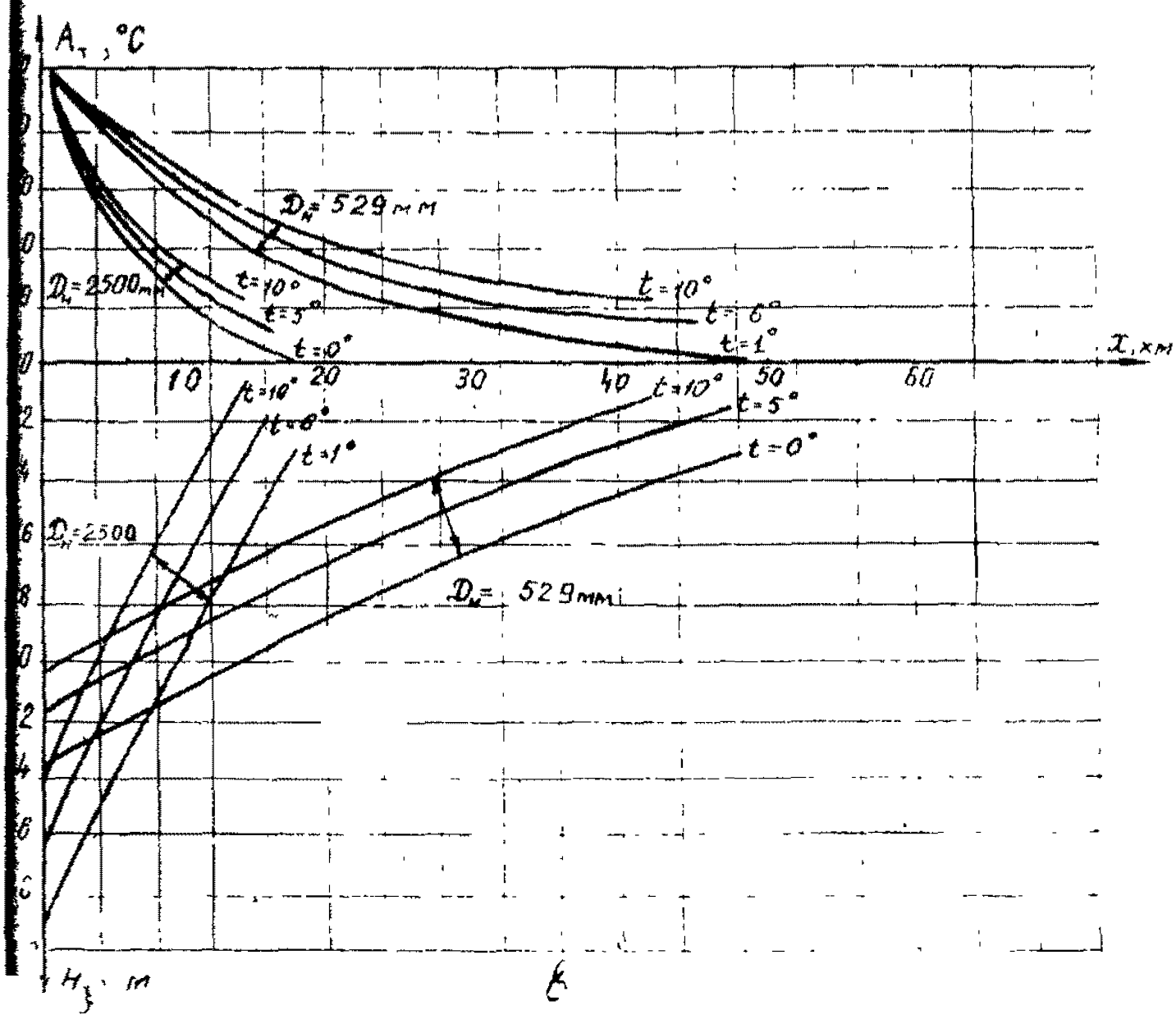
б

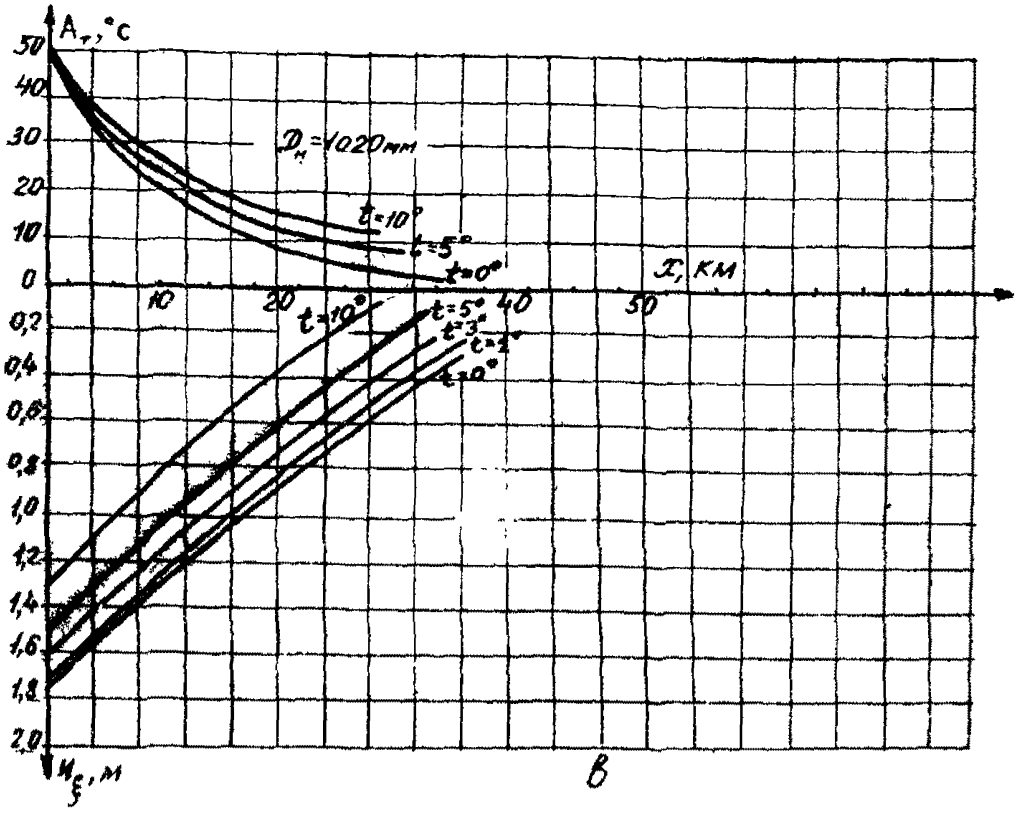

A_r, °C
50
40
30
20
10
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
2,2
2,4
2,6
$H_ф$, м
$D_н$ = 529 мм
t = 10°
t = 6°
t = 3°
t = 1°
t = 0°
10
20
30
40
50
60
70
x, км
D = 7500 мм
$D_н$ = 529 мм


A_r, °C
50
40
30
20
10
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
$H_ф$, м
$D_н$ = 1020 мм
t = 10°
t = 6°
t = 3°
t = 1°
t = 0°
10
20
30
40
50
2, км

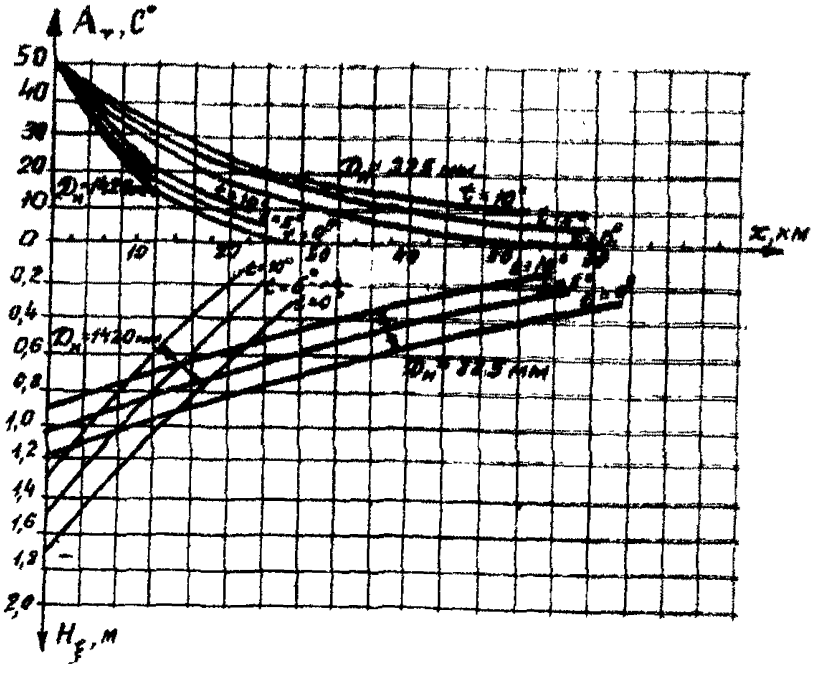
б


$A_т$, °C
$D_н$ = 325 мм
t = 10°
t = 5°
t = 0°
X, км
10
20
30
40
50
60
$D_н$ = 1420 мм
t = 10°
t = 5°
t = 3°
t = 0°
$D_н$ = 325 мм
$H_э$, м

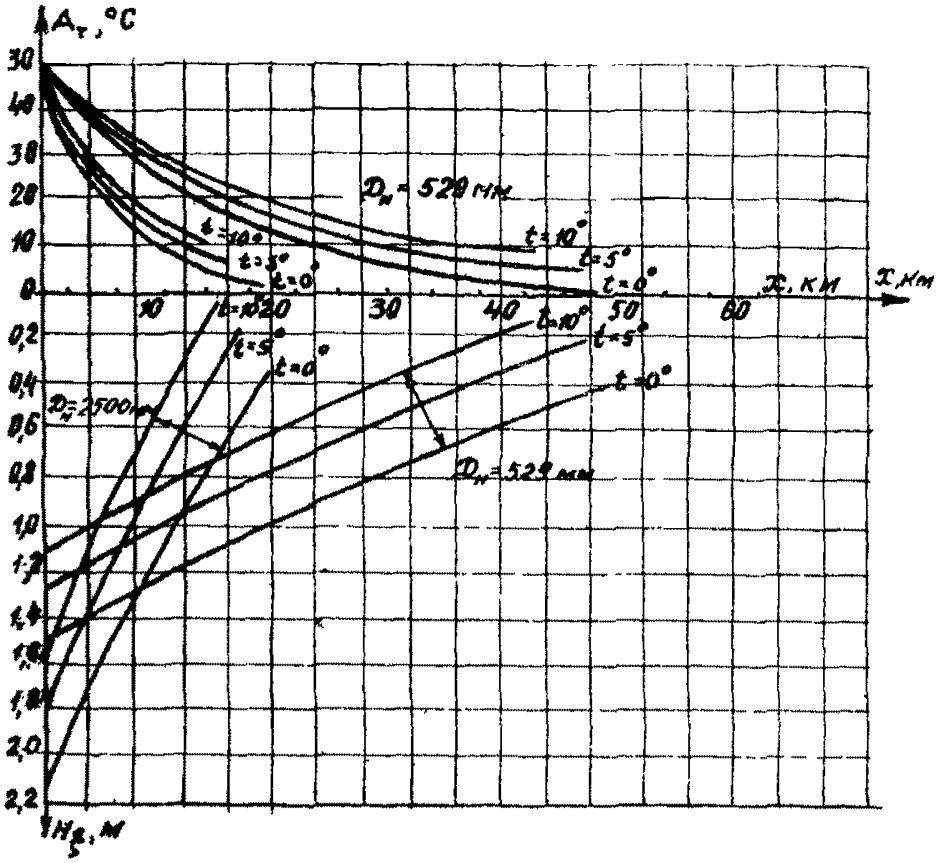

$A_т$, °C
$D_н$ = 529 мм
$D_н$ = 2500 мм
t = 10°
t = 5°
t = 0°
t = 1°
X, км
10
20
30
40
50
60
$D_н$ = 2500
t = 10°
t = 0°
t = 1°
t = 10°
t = 5°
t = 0°
$D_н$ = 529 мм
$H_э$, м

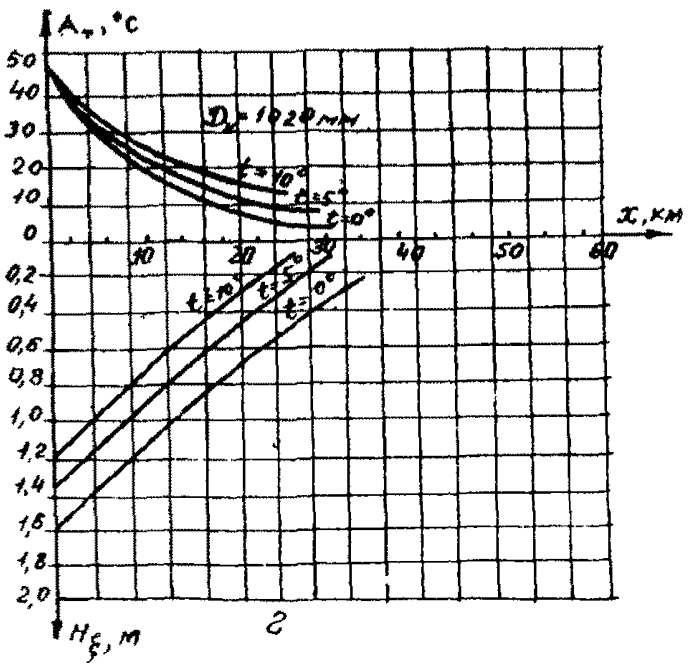

$A_т$, °C
$D_н$=1020мм
t=10°
t=5°
t=0°
x, км
t=10°
t=5°
t=3°
t=2°
t=0°
$H_ф$, м

в


$A_т$, C°
$D_н$=1420мм
$D_н$=325мм
x, км
$H_ф$, м

2


$A_т$, °C
$D_н$ = 529 мм
t=10°
t=5°
t=0°
x, км
$D_н$ = 1020 мм
$D_н$ = 529 мм
$H_ф$, м


$A_т$, °C
$D_н$ = 1020 мм
t=10°
t=5°
t=0°
x, км
$H_ф$, м

г

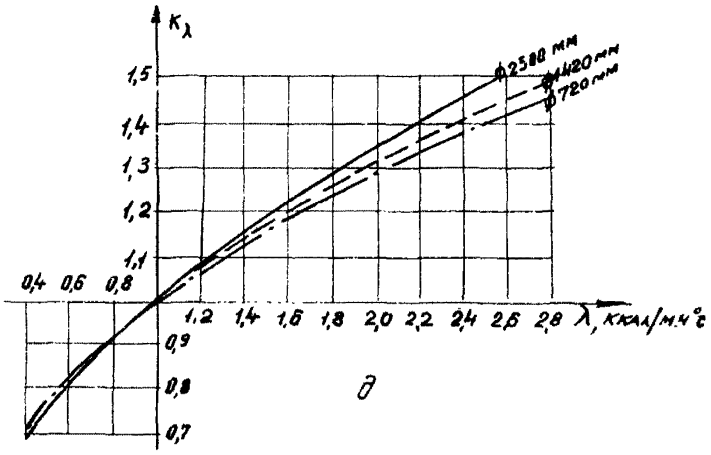


Рис.9. Номограмма для определения мощности сезонных ореолов оттаивания (промерзания) грунтов вокруг трубопроводов:

а- $Q_ф$=10000 ккал/м^3; б- $Q_ф$ = 20000 ккал/м^3;

в- $Q_ф$ =30000 ккал/м^3; г- $Q_ф$ = 40000 ккал/м^3;

д- K_λ поправочный коэффициент в зависимости от λ грунта

Номограммы построены для трубопроводов диаметром $D_н$ = 325, 529, 1020, 1420 и 2500 мм для следующих параметров:

расчетная среднегодовая температура поверхности трубопровода t принята равной 0; 1,0; 3,0; 6,0 и 10°С;

количество тепла $Q_ф$, затрачиваемое на фазовые переходы воды в грунте, изменяются от 10000 до 40000 ккал/м³;

коэффициент теплопроводности грунта λ = 1 ккал/м ч°С;

объемная теплоемкость грунта $C \leq$ 800 ккал/м³ °С;

расход газа G = 100000 кг/ч;

удельная теплоемкость газа C_p = 0,99 ккал/кг°С.

Номограммы позволяют определить мощность ореола оттаивания грунта, отсчитываемую от нижней образующей трубы на любом расстоянии от точки с известным температурным режимом.

Расчетную температуру поверхности трубопровода t, которую используют в формулах и номограммах, определяют в зависимости от сочетаний среднегодовых температур грунта и поверхности трубопровода, которые сведены к четырем основным случаям, приведенным в табл.4.

Таблица 4

Выбор расчетной температуры трубопровода

Область распространения	Характер развития процессов вокруг трубопровода	Соотношение среднегодовых температур трубопровода и грунта	Выбор расчетной температуры трубопровода t для определения мощности ореолов по номограммам рис.9
...голетнемерзлых пород ...й $t_h < t_f$	Сезонное оттаивание грунтов	$t_т < t_h$	$t = t_h$
		$t_т \geq t_h$	$t = t_т$
	Сезонное промерзание при многолетнем протаивании грунтов	Произвольное	$t = t_т$
Талых пород при $t_h > t_f$	Сезонное промерзание грунтов	$t_т \leq t_h$	$t = t_т$
		$t_т > t_h$	$t = t_h$
	Сезонное протаивание при многолетнем промерзании грунтов	Произвольное	$t = t_т$

Расчет мощности сезонных ореолов оттаивания (промерзания грунта под трубопроводом по номограмме (рис.9,а-г) ведут следующим образом:

I) по оси A_T, °С, соответствующей значению амплитуды колебаний среднемесячных температур на поверхности трубопровода, при исходных параметрах $Q_ф$ и $d_н$ (см.рис.9) откладывают значение амплитуды температур на поверхности трубопровода на начальном участке;

2) от полученной точки проводят горизонтальную линию до пересечения с соответствующей кривой t, значение которой определяют по табл.4;

3) из полученной точки опускают перпендикуляр на ось X. Продолжение этого перпендикуляра ниже оси X до пересечения ее с кривой, соответствующей выбранному t, дает на оси $H_ξ$ мощность ореола оттаивания грунта от нижней образующей трубопровода на начальном участке.

Расчет изменения сезонного ореола оттаивания грунтов по длине заглубленного трубопровода выполняют следующим образом:

I) от точки пересечения перпендикуляра, опущенного от значения t с осью X (точка X_0), по оси X откладывают расстояние, на котором необходимо определить изменение ореола оттаивания грунта под трубой;

2) из полученной точки опускают перпендикуляр до пересечения с соответствующей кривой t и по оси $H_ξ$ определяют значение ореола оттаивания грунта на конечном участке.

Поскольку номограммы построены для фиксированных значений параметров G, $C_ρ$, $λ$, то для получения истинных значений $H_ξ$ и $A_T^к$ при произвольных значениях исходных параметров G, $C_ρ$, $λ$ вводят соответствующие коэффициенты.

Для определения истинной величины $H_ξ$ ореола оттаивания (промерзания) грунта $H_ξ$ необходимо умножить величину $H_ξ^{ном}$ найденную по номограмме, на коэффициент $K_λ$, приведенный на рис.9,д.

Истинное значение амплитуды колебаний температуры трубопровода $A_T^к$ на определенном расстоянии (X-X_0) от начального участка можно рассчитать по формуле

$$A_T^к = A_T^н - (A_T^н - A_{T.ном}^к)\frac{2,04}{Δ \cdot C_ρ \cdot q}, \qquad (42)$$

A_T^K – амплитуда температур поверхности трубы на конечном участке $(X-X_0)$ при истинных значениях теплоемкости и расхода газа, °С;

$A_{T\,ном}^K$ – амплитуда температур поверхности трубопровода на конечном участке $(X-X_0)$ при фиксированных значениях теплоемкости и расхода газа, найденная по номограмме (рис.9,а–г), °С;

A_T^H – амплитуда температур поверхности трубопровода на начальном участке, °С.

4.18. Минимальную толщину теплоизоляции ($\delta_{из}$) подземного, подводного и наземного трубопроводов, которая полностью предотвращает образование ореолов оттаивания или промерзания грунтов (воды) вокруг трубопровода, рассчитывают с помощью следующего трансцендентного уравнения:

$$\frac{(t_f - t)}{\alpha_2(t_s - t_f)} = \frac{(r_T + \delta_{из})}{\lambda_{из}}\, r_п \left(1 + \frac{\delta_{из}}{r_T}\right). \quad (43)$$

4.19. Величину обледенения надземного трубопровода, имеющего отрицательную температуру поверхности, определяют сочетанием абсолютной влажности W (водности) атмосферы и размеров капель $r_к$.

Предельное значение абсолютной величины влажности (водности) в приземном слое воздуха находят на основе теоретического расчета конденсации воды при адиабатическом процессе теплообмена в зависимости от температуры.

Гололедную нагрузку P на трубопровод и максимальную толщину неосесимметричного обледенения $\delta_л$ надземного трубопровода (рис.10) рассчитывают по следующим формулам:

$$P_л = 3{,}6 \cdot U \cdot d_н \cdot W \cdot V \cdot \tau_л ; \quad (44)$$

$$\delta_л = \frac{3{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot W \cdot V \cdot \tau_л}{\varphi_{ул}} . \quad (45)$$

Коэффициент улавливания U и угол улавливания $\varphi_{ул}$ определяют по номограммам (рис.11), параметры Re_0 и Φ которых выражены следующими зависимостями:

$$Re_0 = \frac{2V \cdot r_к}{\nu_в} , \qquad \Phi = \frac{4{,}5 \cdot d_н \cdot \rho_в}{r_к \rho_{н_2 о}} .$$

4.20. Расчетную температуру максимального нагрева нару ной поверхности надземного трубопровода t_{max} за счет сол ной радиации находят из следующего трансцендентного уравнен

$$t_{max} = t_в^{max} + \frac{(1-A_т)\{Q_c(2-A_п) - R_{max}\} - J}{\pi \alpha_2^a}, \qquad (4$$

где

$$J = \frac{6}{\pi}\left\{(1-A_т)(t_{max}+273)^4 - (1-A_п)(t_п+273)^4\right\},$$

6 - постоянная Стефана-Больцмана, $6 = 4{,}9 \cdot 10^{-8}$ $\frac{ккал}{м^2 ч\ ^0C}$

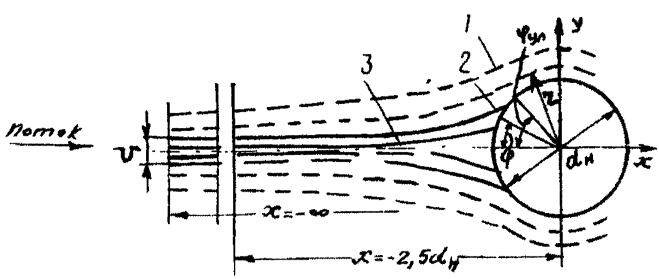


Рис.10. Расчетная схема обледенения надземного трубопровода:
1-линия тока воздуха; 2-касательная траектория; 3-промежуточная траектория

Расчетное уравнение (46) является трансцендентным, и е решают методом последовательных приближений при вычислении в первом приближении при вычислении J_1 принимают

$$t_{max} = t_п;$$

во втором приближении J_2 корректируют более реаль значением температуры трубопровода t_{max}, найденному из вого приближения.

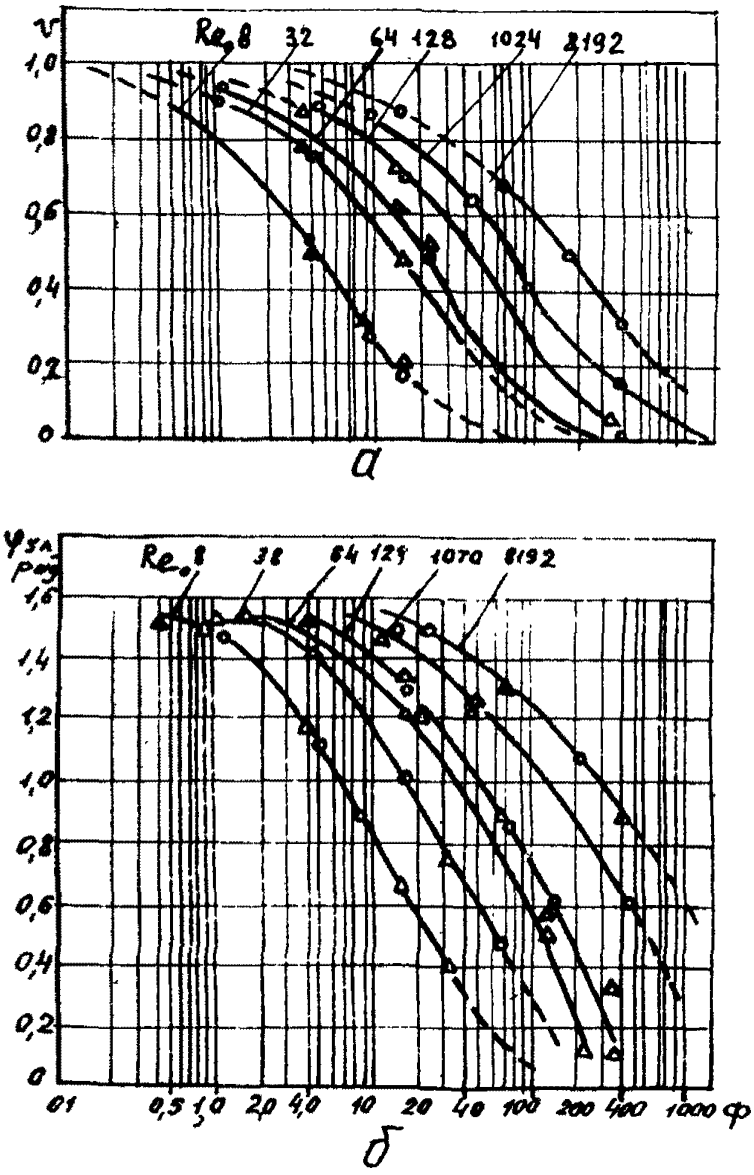


Рис. 11. Номограммы для определения коэффициента улав.. ания U (а) и угла улавливания $\varphi_{ул}$ (б) в зависимости от парам.ет]ов R_{e_0} и φ

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Приложение I
рекомендуемое

НЕОБХОДИМЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

В табл.I-6 и на рис.I-7,I0,II приведены параметры теплообмен подстилающей поверхности с атмосферой, которые необходимы для расчета теплового взаимодействия трубопроводов с природной средой.

В табл.7 и на рис.8,9,12,I3 приведены константы некоторых газов, транспортируемых по магистральным газопроводам, которые необходимы для расчета их тепловых режимов.

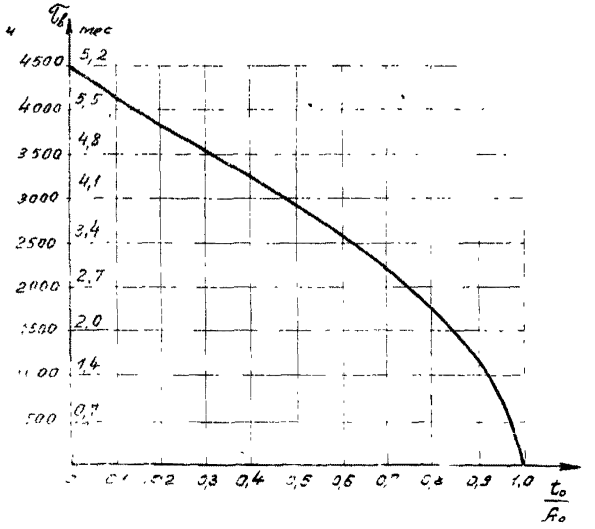


Рис.I. Продолжительность ($\tau_б$) периодов положительных ($\tau_{лет}$ при $t_0 > 0^oC$) и отрицательных ($\tau_{зим}$ при $t_0 < 0^oC$) температур поверхности грунта

Таблица I

Значения коэффициента $K_{сн}$, учитывающего сокращение амплитуды газовых колебаний температуры воздуха под снежным покровом

Объемная масса снежного покрова $\rho_{сн}$ г/см³	Значения $K_{сн}$ в зависимости от высоты снежного покрова, м									
	0,I	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7.	0,8	0,9	≥I,0
0,075	0,094	0,I8I	0,259	0,329	0,398	0,45I	0,503	0,55I	0,597	0,632
0,II0	0,08I	0,I55	0,224	0,288	0,345	0,400	0,447	0,49I	0,532	0,572
0,I50	0,070	0,I36	0,I97	0,253	0,306	0,355	0,400	0,442	0,482	0,5I8
0,I90	0,064	0,2I3	0,I78	0,230	0,279	0,324	0,367	0,407	0,445	0,480
0,225	0,058	0,II3	0,I64	0,2I3	0,259	0,302	0,343	0,38I	0,4I6	0,450
0,250	0,054	0,I05	0,I53	0,I98	0,242	0,282	0,32I	0,357	0,392	0,425
0,300	0,05I	0,098	0,I43	0,I86	0,227	0,267	0,303	0,338	0,37I	0,400
0,340	0,048	0,093	0,I36	0,I78	0,2I6	0,254	0,289	0,323	0,356	0,380
0,380	0,045	0,088	0,I30	0,I69	0,206	0,242	0,277	0,309	0,34I	0,370
0,4I5	0,043	0,08I	0,I24	0,I6I	0,I97	0,232	0,265	0,297	0,327	0,350

Таблица 2

Коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости покровов в талом состоянии

почвенный покров	$\gamma_{нп}$, кг/м³ сухого	$\gamma_{нп}$, кг/м³ влажного	$W_{нп}$, дол. ед.	$\lambda_{нп}$, ккал/м.ч.град	$a_{нп}$, 10^{-3} 10^{-3}м²/ч	$C_{нп}$, ккал/м³
I	2	3	4	5	6	7
[illegible]айник	70	I40	1,0I	0,I4	I,47	95,2
	80	280	2,58	0,3	I,28	234,4
	70	350	4,22	0,I2	0,375	320,0
[illegible]ох бурый	90	380	3,II	0,22	0,7I	3II,4
	40	370	9,37	0,I6	0,4I	388,8
	50	350	6,48	0,I3	0,38	34I,5
	I70	290	0,7	0,I6	0,90	I78,5
	I50	250	0,7I	0,I2	0,75	I59,0
	240	340	0,4I	0,26	I,42	I82,4
	200	320	0,62	0,3I	I,60	I94,0
[illegible]ох сфагнум	270	440	0,62	0,28	I,07	26I,9
	270	420	0,58	0,I6	0,64	25I,I
	I80	470	I,62	0,34	0,96	354,6
	I50	290	0,92	0,I2	0,63	I90,5
	I00	200	I,03	0,32	2,32	I38,0
Торф	480	I080	I,25	0,52	0,68	768,0
	I00	4I0	2,98	0,I7	0,5I	335,0
	250	840	I,35	0,43	I,0I	425,0
	230	770	2,38	0,43	0,68	627,9
	370	8I0	I,97	0,40	0,46	858,4
	580	I060	0,83	0,65	0,95	684,4
	I20	460	2,96	0,3I	0,78	397,2
	570	II20	0,97	0,46	0,6I	752,4
	390	960	I,24	0,44	0,7I	620,I
	I80	760	3,2	0,3I	0,48	639,0
	230	900	2,93	0,43	0,57	754,4
	2I0	820	2,95	0,45	0,65	693,0
	2I0	800	2,84	0,47	0,70	670,0
	230	9I0	3,02	0,49	0,63	775,I
	240	8I0	2,43	0,38	0,57	667,2
	480	680	0,4I	0,5I	I,4	364,8

Окончание та

I	2	3	4	5	6	7
Торф	200	790	2,92	0,55	0,84	654
	I50	750	3,99	0,54	0,83	651
	250	850	2,36	0,29	0,43	677
	560	II50	I,03	0,64	0,83	772
	530	I280	I,24	0,66	0,78	842
	630	II70	0,86	0,55	0,72	762
	500	I060	I,I0	0,6I	0,84	725

Примечание. В таблице приняты следующие усл обозначения: $\gamma_{нп}$ – объемная масса напочвенного покрова; влажность напочвенного покрова; $\lambda_{нп}$, $a_{нп}$, $C_{нп}$ – коэффициен теплопроводности, температуропроводности и объемной теплое сти напочвенных покровов соответственно.

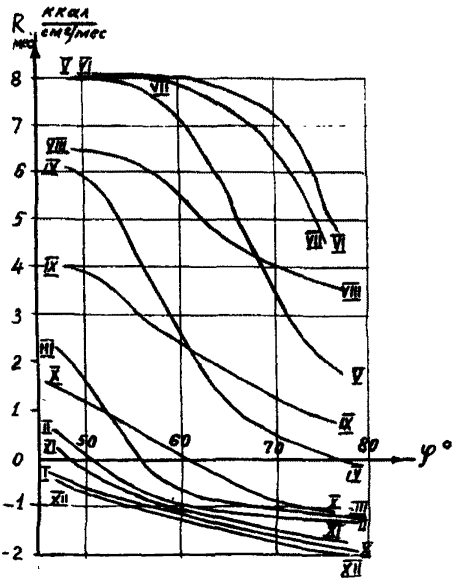


Рис.2. Рациональный баланс подстилающей поверхности $R_{мес}$

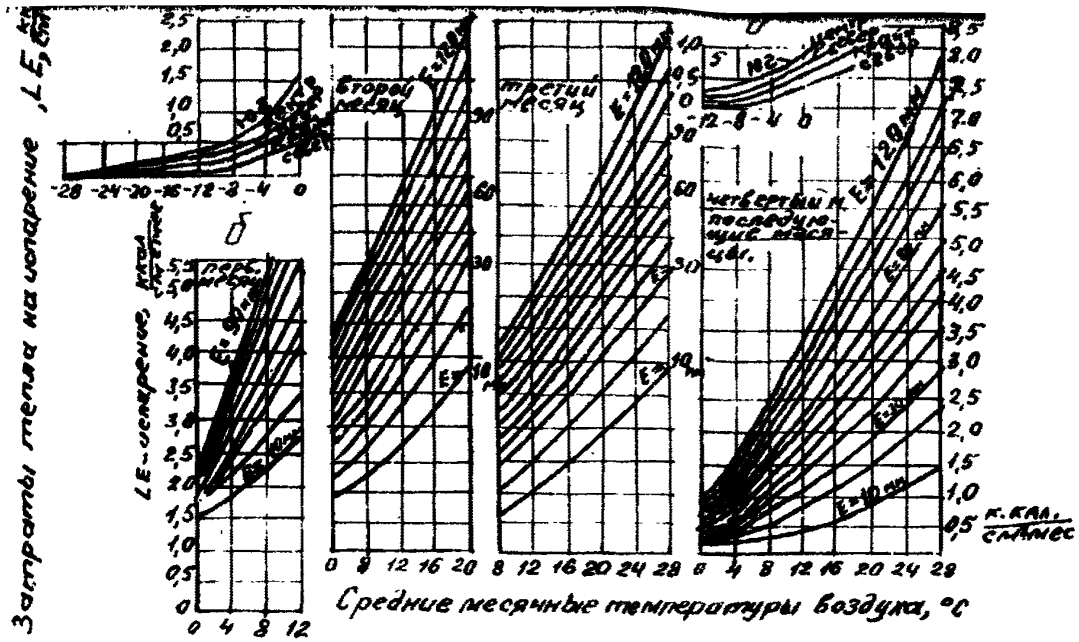


Рис.3. Месячные затраты тепла при испарении с поверхности суши (LE) в зависимости от температуры воздуха ($t_в$) и количества осадков (E) по Б.В.Полякову; графики а–е применяются в следующем порядке: а – для зимнего периода года после I-го января, $t_в < 0^{\circ}C$; б–для I-го месяца с $t_в > 0^{\circ}C$; в–для 2-го месяца с $t_в > 0^{\circ}C$, г – для 3-го месяца с $t_в > 0^{\circ}C$; д–для всех последующих месяцев $t_в > 0^{\circ}C$; е–для начала зимы до I-го января $t_в < 0^{\circ}C$

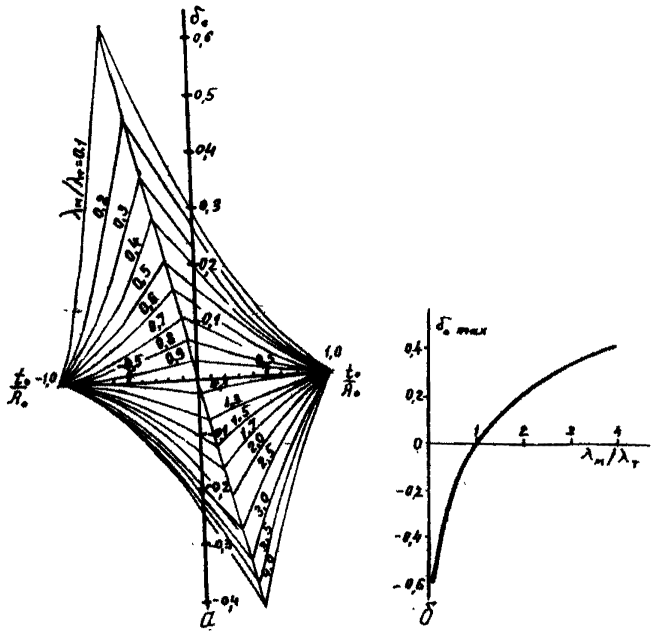


Рис.4. Номограммы для определения влияния (Δt_λ) неравенства коэффициентов теплопроводности грунтов в талом и мерзлом состоянии ($\lambda_м \neq \lambda_т$) на t_ξ :
а-номограмма для определения коэффициента δ_0 ; б-график для определения экстремальных значений коэффициента δ_{0max}

Таблица

Водность тумана $W_в$

Вид тумана	Горизонтальная видимость, м	Водность, г/м³
Густой туман	~50	~I,5
Слабый туман	~I000	~0,I
Дымка	~2000	~0,05

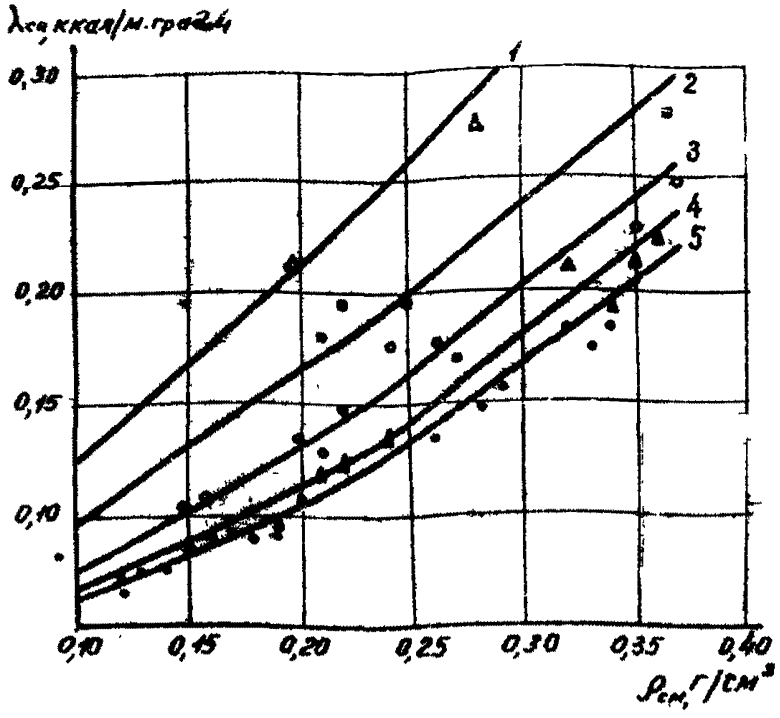


Рис.5. Номограмма для определения коэффициента теплопроводности снега $\lambda_{сн}$ в зависимости от его плотности $\rho_{сн}$ и температуры воздуха $t_в$:
I– $t_в > -2,5^{o}C$; 2– $t_в$ от $-2,5$ до $-7,5^{o}C$; 3– $t_в$ от $-7,5$ до $-15^{o}C$; 4– $t_в$ от -15 до $-25^{o}C$; 5– $t_в < -25^{o}C$

Таблица 4

Радиусы атмосферных капель $r_к$

Типы осадков	$r_к$, мкм
Слабый туман	От 5 до 20
Густой туман	От 20 до 40
Изморось	От 40 до500
Дождь	Более 500

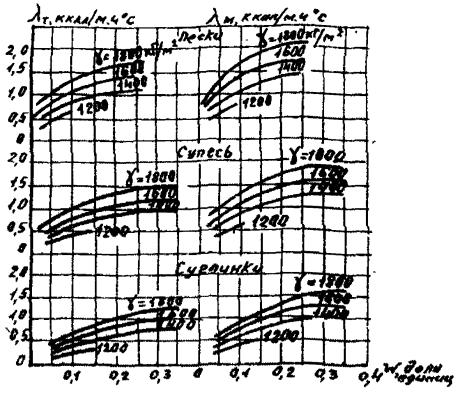


Рис.6. Значение коэффициентов теплопроводности талого ($\lambda_т$) и мерзлого ($\lambda_м$) грунтов

Таблица 5

Кинематическая вязкость воздуха

Температура воздуха, °С	$\nu_в$, м²/с.10⁶	Температура воздуха, °С	$\nu_в$, м²/с.10⁶
-63	8,30	-13	12,28
-53	9,05	-8	12,70
-43	9,83	-3	13,14
-33	10,60	+2	13,57
-23	11,40	+7	14,02
-18	11,83	+12	14,47

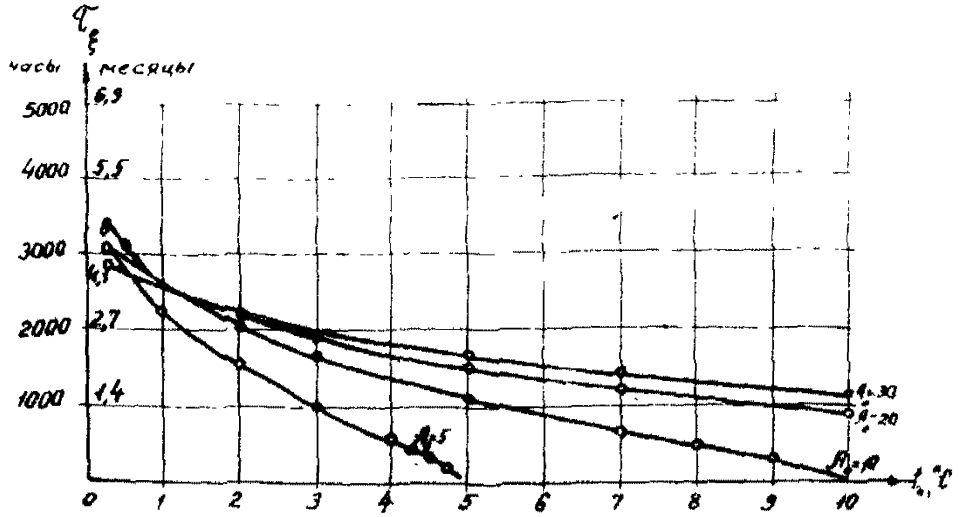
Таблица 6

Альбедо различных поверхностей $A_п$

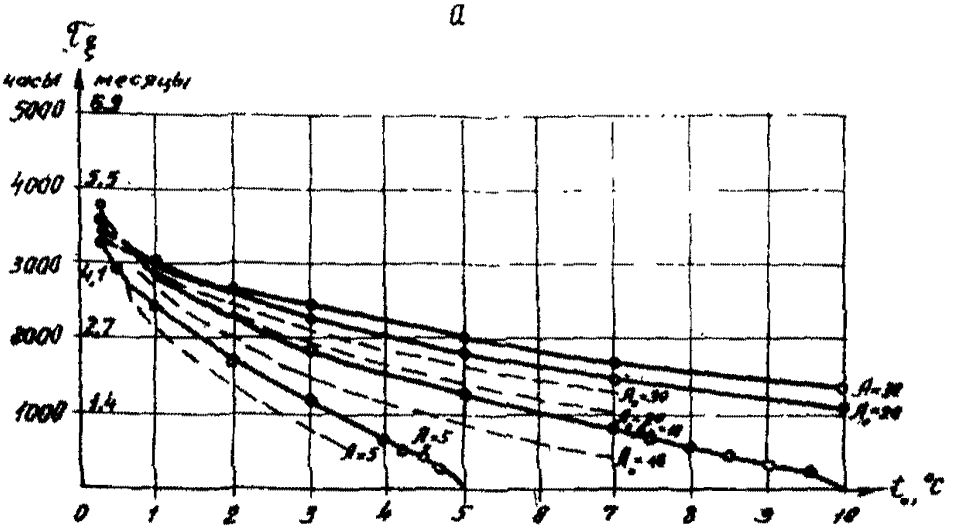
Характеристика поверхности	Альбедо
Алюминий тщательно полированный	0,86
Бетон шероховатый	0,12-0,27
Войлок черный	0,18

Продолжение табл.6

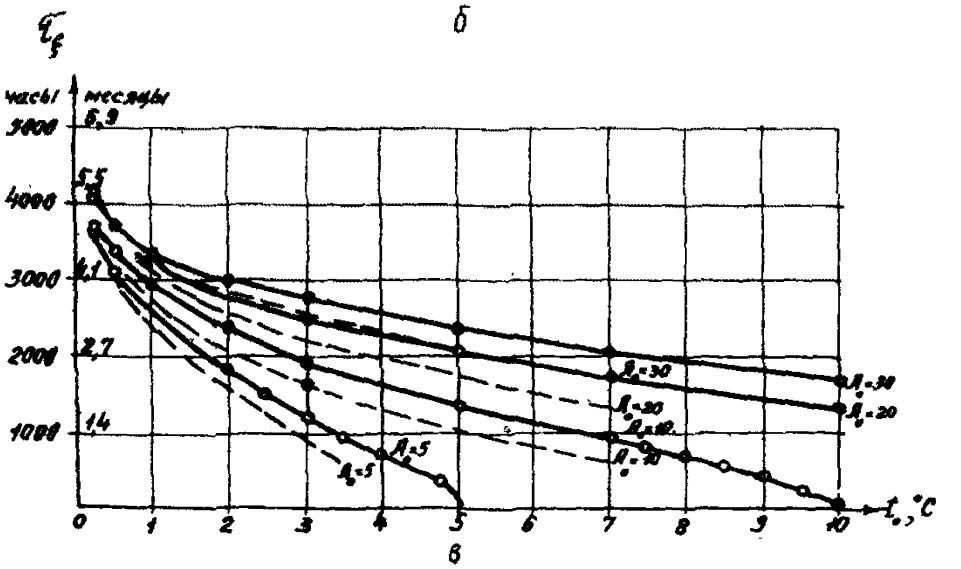
Характеристика поверхности	Альбедо
Вода	0,03–0,09
Гипс	0,5
Грунт:	
песчаный	0,I5–0,4
чернозем подзолистый (вспаханное поле)	0,07–0,I
глина	0,6
гравий	0,7
Железо:	
окисленное	0,I8–0,26
листовое, покрытое красной ржавчиной после травления кислотой	0,2–0,4
свежеобработанное наждаком	0,6–0,75
оцинкованное	0,62
Кирпич красный	0,25
Мрамор белый	0,56
Краски:	
алюминиевые различной давности	0,3–0,7
масляные цинковые, белые	0,7
масляные светло-зеленые	0,5
масляные светло-серые	0,25
масляные черные на оцинкованном железе	0,I
Лак:	
белый	0,4–0,6
черный матовый	0,02–0,05
черный блестящий, распыленный на железной пластине	0,I25
Леса	0,02–0,5
Луга	0,I–0,3
Песчаные дюны	0,3–0,6
Поля	0,I2–0,3
Районы плотной застройки	0,I5–0,25
Снежный покров:	
свежевыпавший	0,75–0,95


τ_ξ
часы
месяцы
5000
4000
3000
2000
1000
6,9
5,5
4,1
2,7
1,4
R_0=30
R_0=20
R_0=10
R_0=5
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
t_0, °C

а


τ_ξ
часы
месяцы
5000
4000
3000
2000
1000
6,9
5,5
4,1
2,7
1,4
R_0=30
R_0=20
R_0=10
R_0=5
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
t_0, °C

б


τ_ξ
часы
месяцы
5000
4000
3000
2000
1000
6,9
5,5
4,1
2,7
1,4
R_0=30
R_0=20
R_0=10
R_0=5
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
t_0, °C

в

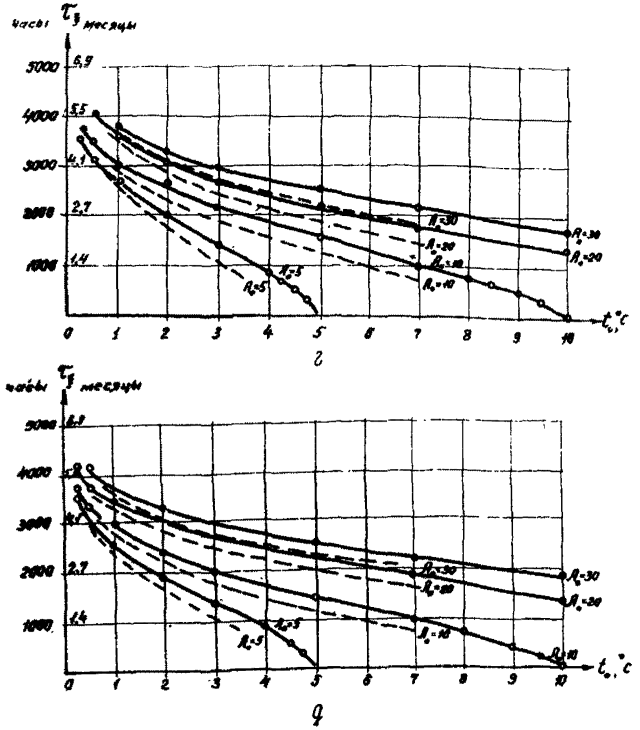


Рис. 7. Номограммы для определения продолжительности промерзания грунта слоя сезонного протаивания (τ_ξ):
а– Q_ϕ = 5000 ккал/м^3; б– Q_ϕ = 10000 ккал/м^3; в– Q_ϕ = 20000 ккал/м^3; г– Q_ϕ = 30000 ккал/м^3; д– Q_ϕ =40000 ккал/м^3;
——— ($\tau_{\xi m}$) продолжительность промерзания грунта сезонноталого слоя без учета промерзания со стороны многолетнемерзлой толщи; – – – (τ_ξ) с учетом промерзания со стороны многолетнемерзлой толщи

Окончание табл.6

Характеристика поверхности	Альбедо
Сталь:	
нержавеющая полированная	0,63
листовая с плотным блестящим слоем окиси	0,2–0,4
Штукатурка шероховатая известковая	0,2

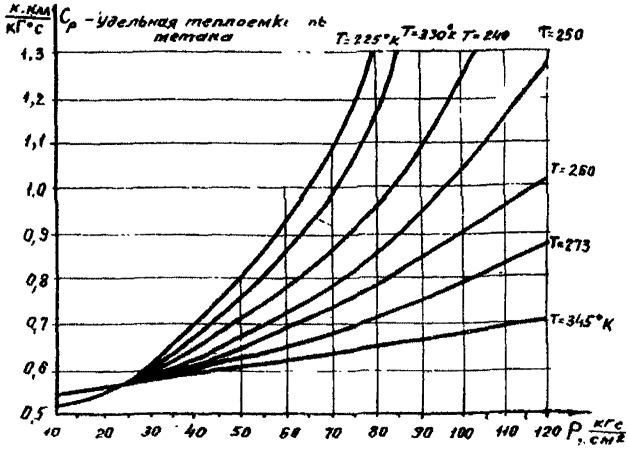


Рис.8. Номограмма для определения удельной теплоемкости C_p

Таблица 7

Константы некоторых газов

Наименование	M	Δ	T_c, K	P_c, кг/см²
Метан	I6,04	0,55	I90,9	47,3
Этан	30,07	I,05	305,3	49,8
Пропан	44,09	I,55	369,8	43,4

Окончание табл.7

Наименование	M	Δ	T_c, K	P_c, кг/см²
Изо-бутан	58,12	2,06	407,9	37,2
Изо-пентан	72,14	2,49	460,8	34,0
Водяной пар	18,02	0,59	647,15	225,6
Азот	28,02	0,97	126,0	34,6
Воздух (сухой)	28,96	1,0	132,3	38,4
Сероводород	34,08	1,19	373,4	91,8
Двуокись углерода	44,01	1,53	304,0	75,3
Аммиак	17,03	0,70	405,3	115,0
Ацетилен	26,04	0,91	308,7	63,7

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: M -молекулярный вес; Δ -относительная плотность газа по воздуху; T_c, P_c -критические параметры газа.

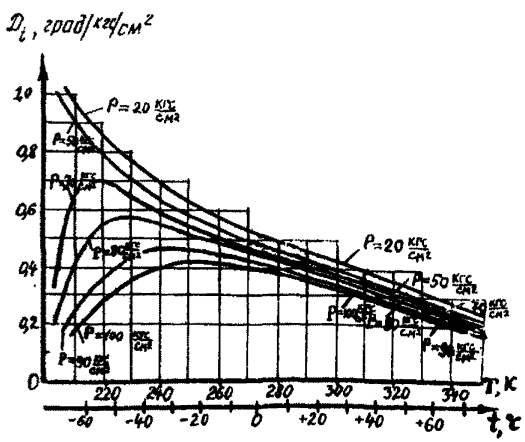


Рис.9. Номограмма для определения коэффициента Джоуля-Том сона метана D_i.

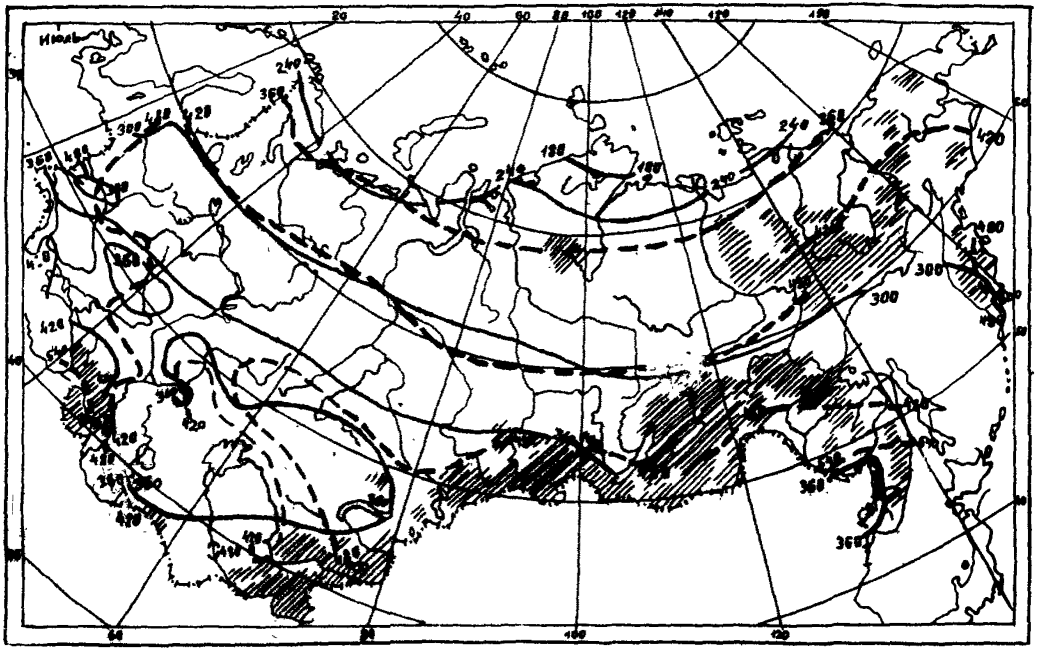


Рис.IO. Интенсивность радиационного баланса в полдень R_{max}, ккал/м^{2}ч:
—— при действительных условиях облачности; - - - при безоблачном небе; ▨ – горные районы

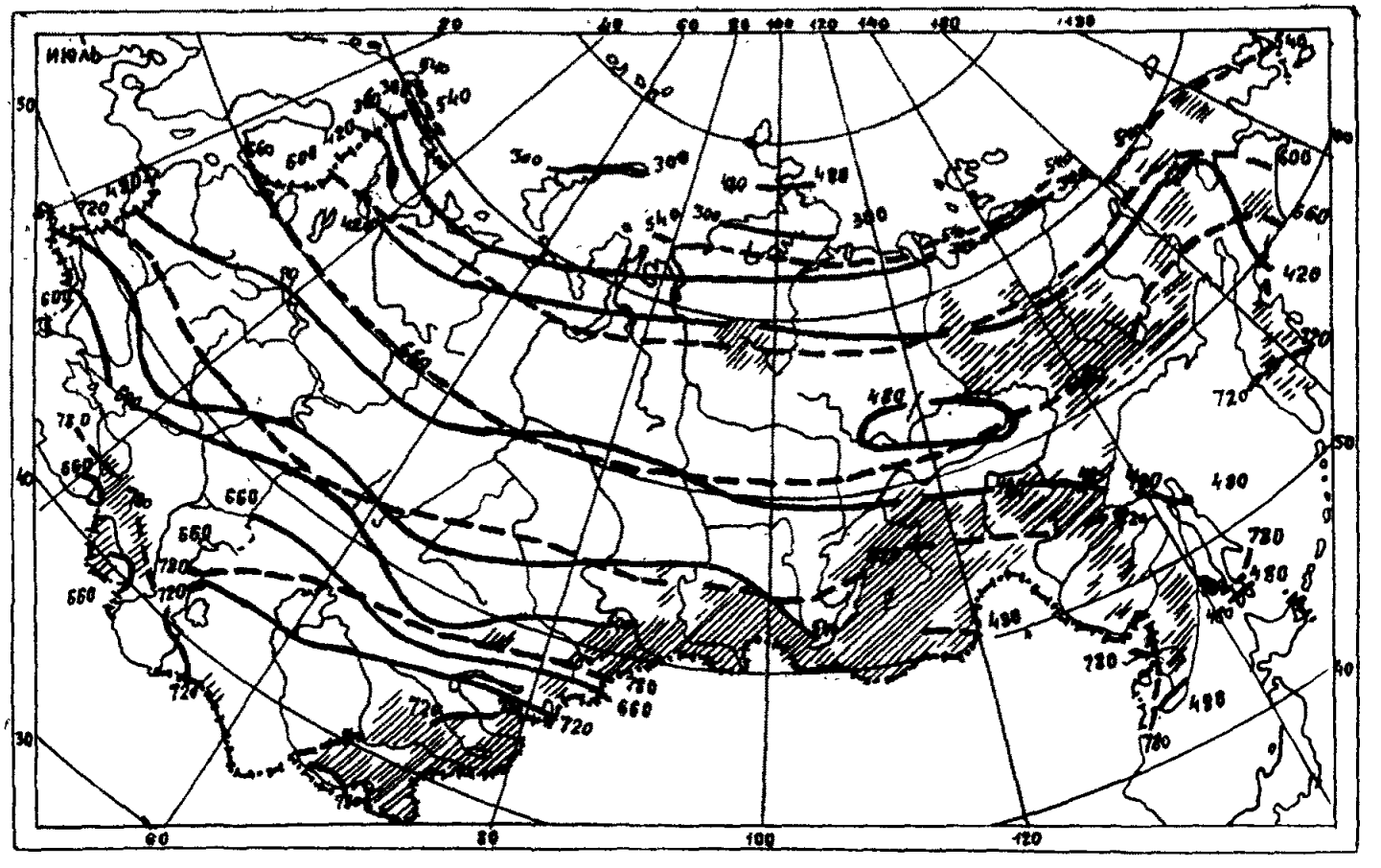


Рис.II. Интенсивность суммарной радиации в полдень Q_c , ккал/м^{2}ч:
——— при действительных условиях облачности; - - - при безоблачном небе; ▨ - горные районы

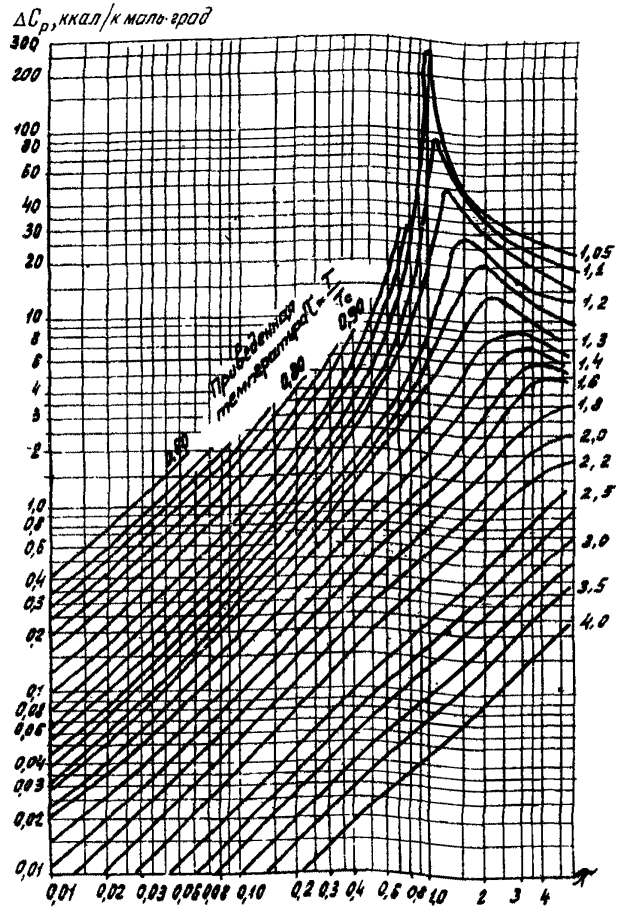


Рис.12. Номограмма для определения ΔC_p от приведенных параметров π и τ (приведенное давление $\pi = P/P_c$, приведенная температура $\tau = T/T_c$; P_c и T_c – соответственно критическое давление и температура газа;

$$\Delta C_p \left[\frac{ккал}{кг \cdot град}\right] = \frac{\Delta C_p \left[\frac{ккал}{к моль \cdot град}\right]}{M}$$; M – молекулярный вес газа)

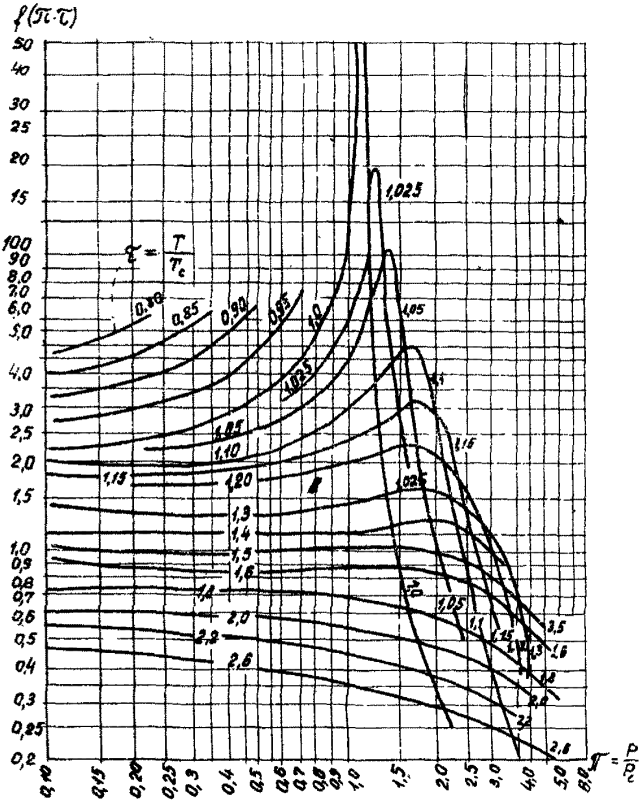


Рис.I3. Номограмма для определения коэффициента Джоуля-Томсона D_i от приведенных параметров π и τ (константы P_c и T_c некоторых газов приведены в табл.7 приложения I рекомендуемого)

Приложение 2
Рекомендуемое

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Пример I

Требуется рассчитать влияние радиационного тепла на температуру поверхности грунта, лишенного растительного покрова летом и имеющего снежный покров зимой.

Исходные данные:

среднегодовая температура воздуха $t_в^{ср} = 0,3^{\circ}C$;

амплитуда колебаний температур воздуха $A_в = 35^{\circ}C$;

месячное количество атмосферных осадков E = 20 мм:

коэффициент теплоотдачи подстилающей поверхности в атмосферу α_F и скорость ветра v даны в табл.I;

результаты расчета радиационной поправки Δt_R на температуру поверхности приведены в табл.I.

Из данных табл.I видно, что среднемесячные температуры на поверхности почвы и снега изменяются в зависимости от радиационного баланса и коэффициента конвективного теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой.

В данном случае поверхность, лишенная растительного покрова летом и сохраняющая снежный покров зимой, имеет среднегодовую температуру $t_{в\,мес} = 2,5^{\circ}C$, т.е. на $2,2^{\circ}C$ выше среднегодовой температуры воздуха, и амплитуда годовых колебаний температуры $43,3^{\circ}C$, т.е. на $8,3^{\circ}C$ больше амплитуды температур воздуха.

Расчет радиационной поправки на температуру поверхности необходимо выполнять для оценки влияния изменения альбедо поверхности, экспозиции и крутизны склонов, а также различных искусственных покрытий.

Пример 2

Требуется определить отепляющее влияние снежного покрова высотой 0,5 м и объемной массой 0,I9 г/см^3 на температуру поверхности почвы.

Таблица I

Пример расчета радиационной поправки

Исходные и расчетные данные	Климатические данные и величины радиационной поправки по месяцам												Средне-годовые значения параметров	Амплитуда годовых колебаний, °С
	I	II	III	IУ	У	УI	УII	УIII	IX	X	XI	XII		
$t_{вмес}$, °С	-I6,8	-I5,0	-8,2	0,7	8,4	I8,3	I5,2	9,0	9,0	-0,9	-8,9	-I5,6	0,3	35,0
R, ккал/см^{2}мес	-0,6	-I,0	I,I	4,3	7,8	9,5	8,4	6,0	3,6	0,7	-0,8	-0,8	3,2	-
R; ккал/м^{2}ч	-8,2	-I3,7	I5,I	58,9	I06,8	I30,I	II5,I	82,2	49,3	9,6	-II,0	-II,0	-	-
V, м/с	2,5	3,0	3,5	4,3	5,0	5,5	4,6	4,0	3,6	3,0	2,8	2,0	3,65	-
α_F, ккал/м^{2}ч °С	9,0	I0,0	I2,0	I2,6	I4,0	20,5	I3,2	I2,0	II,2	I0,0	9,6	8,0	-	-
LE, ккал/см^2 мес	0,I	0,I5	0,2	I,7	I,8	I,9	I,4	I,0	0,7	0,2	0,I5	0,I	0,78	-
LE, ккал/м^{2}ч	I,4	2,0	2,7	23,3	24,7	26,0	I9,2	I3,7	9,6	2,7	2,0	I,4	-	-
$\Delta t_R = \frac{R-LE}{\alpha_F}$ °С	-I,0	-I,6	I,I	2,8	5,9	5,I	7,3	5,7	3,5	0,7	-I,3	-I,2	-	-
$t_{0.мес}$, °С	-I7,8	-I6,6	-7,I	3,5	I4,3	20,6	25,5	20,9	I2,5	I,6	-I0,2	-I6,8	2,5	43,3

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: $t_{вмес}$ - среднемесячная температура воздуха; R - радиационный баланс; V - скорость ветра; α_F - коэффициент теплоотдачи подстилающей поверхности в атмосферу; LE - затраты тепла на испарение; Δt_R - радиационная поправка; $t_{0мес}$ - среднемесячная температура дневной поверхности.

Исходные данные:

$t_в^{ср} = -10{,}6^{\circ}C$; $A_в = 21{,}5^{\circ}C$.

Решение.

По табл.I приложения I рекомендуемого находим, что для снежного покрова высотой 0,5 м и объемной массой 0,19 г/см^3 значение $K_{сн} = 0{,}279$.

Следовательно, $\Delta t_{сн} = \Delta A_{сн} = 21{,}5 \cdot 0{,}279 = 6{,}0^{\circ}C$.

Отсюда находим, что под снегом:

$$t_р = t_в + \Delta t_{сн} = -10{,}6 + 6{,}0 = -4{,}7^{\circ}C;$$

$$A_р = A_в - \Delta A_{сн} = 21{,}5 - 6{,}0 = 15{,}5^{\circ}C.$$

Пример 3

Требуется рассчитать тепловое влияние мохового покрытия высотой 0,I м на температурный режим поверхности почвы на участке озерно-аллювиальной равнины в районе пос.Тенкели.

Исходные данные:

среднегодовая температура воздуха $t_в^{ср} = -15{,}4^{\circ}C$;

годовая амплитуда $A_в$ достигает $26{,}6^{\circ}C$;

высота снежного покрова $z_{сн} = 0{,}5$ м;

объемная масса $\rho_{сн} = 0{,}19$ г/см^3.

Кроме того, во время полевых съемочных работ получены следующие данные (табл.2), характеризующие уменьшение суточной амплитуды температур за счет мохового покрова в летнее время.

Продолжительность периода с положительными среднесуточными температурами составляет $\tau_в^{лет} = 3{,}5$ мес, с отрицательными $\tau_в^{зим} = 8{,}5$ мес.

Решение

I.Согласно п.3.3в настоящего Руководства сначала рассчитываем коэффициент температуропроводности талого мха по формуле (4)

$$a_м^р = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}01}{24(\ln 89 - \ln 0{,}25)} = \frac{0{,}0314}{24(3{,}572)^2} = 0{,}0003 \text{ м}^2/\text{ч};$$

$a_м^р$ - по данным аналогичных наблюдений равен 0,0005 м^2/ч.

Таблица 2

Исходные данные температурного режима дневной поверхности для примера 3

Место закладки термометров	Термометр	Показания термометров (°С) по срокам			Среднее из трех значений амплитуды, °С
		23.УП 10ч. 50мин	24.УП 11ч 05мин	25.УП 11ч 10 мин	
На поверхности мха	*max*	22,5	18,1	18,9	$A_в^с$ =8,9
	min	0,8	2,4	2,9	
Под мхом, на поверхности почвы. Высота мха $\delta_р$ =0,1 м	*max*	6,3	5,8	6,0	$A_р^с$ =0,25
	min	5,7	5,4	5,5	

2. Рассчитываем тепловое влияние снега так же, как и в примере 2.

$$\Delta t_{сн} = A_в \cdot K_{сн} = 26,6 \cdot 0,271 = 7,2^{\circ}С.$$

3. Определяем температурный режим на поверхности мохового покрова под снегом по формулам:

$$t_р = t_в + \Delta t_{сн} = -15,4 + 7,2 = -8,2^{\circ}С;$$

$$A_р = A_в - \Delta A_{сн} = 26,6 - 7,2 = 19,4^{\circ}С.$$

4. Рассчитываем $\Delta A_р^з$ и $\Delta A_р^л$ по формуле (3);

$$A_з = 26,6 - 2 \cdot 7,2 + 8,2 = 27,6^{\circ}С;$$

$$A_л = 26,6 - 15,4 = 11,2^{\circ}С;$$

$$\tau_в^з = 8,5 \text{ мес} = 8,5 \cdot 30 \cdot 24 = 6120 \text{ ч};$$

$$\tau_в^л = 3,5 \text{ мес} = 3,5 \cdot 30 \cdot 24 = 2640 \text{ ч};$$

$$\Delta A_р^з = 27,6 \left(1 - e^{-0,1\sqrt{\frac{3,14}{0,0005 \cdot 2,6120}}}\right) =$$

$$= 27,6 \left(1 - e^{-0,07}\right) = 1,93;$$

$$\Delta A_р^л = 11,2 \left(1 - e^{-0,1\sqrt{\frac{3,14}{0,0001 \cdot 2,2640}}}\right) =$$

$$= 11,2 \cdot 0,22 = 2,46^{\circ}С.$$

5. Находим искомые значения $\Delta A_р$ и $\Delta t_р$ по формуле (2) п.3.3б

$$\Delta A_p = \frac{1{,}93 \cdot 6120 + 2{,}46 \cdot 2640}{8760} \approx 2{,}1^{\circ}C;$$

$$\Delta t_p = \frac{2}{3{,}14} = \frac{1{,}93 \cdot 6120 - 2{,}46 \cdot 2640}{8760} \approx 0{,}4^{\circ}C.$$

Таким образом, моховый растительный покров высотой 0,1 м сокращает годовую амплитуду температурных колебаний на поверхности почвы на 2,1°С и повышает среднегодовую температуру на 0,4°С.

С учетом влияния снежного и растительного покровов температурный режим на поверхности почвы определяем по формуле (1) п.3.3 настоящего Руководства:

$$t_0 = t_в + \Delta t_{сн} + \Delta t_р = -15{,}4 + 7{,}2 + 0{,}4 = -7{,}8^{\circ}C;$$
$$A_0 = A_в - \Delta A_{сн} - \Delta A_р = 26{,}6 - 7{,}2 - 2{,}1 = 17{,}3^{\circ}C.$$

Пример 4

Требуется рассчитать температурный режим и глубину сезонного протаивания песчаных отложений на участке первой надпойменной террасы.

Исходные данные:

$\gamma_{сн} = 1500$ кг/м^3; $C_{уд} = 0{,}18$ ккал/кг°С; $W = 0{,}12$;
$W_{из} = 0$; $\lambda_м = \lambda_т = 1{,}5$ ккал/м·ч °С;
$t_в = -6{,}8^{\circ}C$; $A_в = 20^{\circ}C$;
$z_{сн} = 0{,}3$ м; $\rho_{сн} = 0{,}19$ г/см^3.

Данные об атмосферных осадках приведены в табл.3.

Данные для расчета примера 4 Таблица 3

Параметры	Значения параметров по месяцам				
	У	УI	УП	УШ	IX
Количество осадков E, мм	II	20	75	65	30
Среднемесячная температура воздуха $t_в$, °С	0,3	I0,0	I7,0	9,3	3,5

Решение

I. Определяем температурный режим на поверхности почвы с учетом влияния снежного покрова:

$$\Delta t_{CH} = 20 \cdot 0,178 = 3,6^{\circ}C$$

и рациональной поправки при $\Delta t_R = 0,8$ и $\Delta A_R = 2,3^{\circ}C$.

Получаем по формуле (I) п.3.3а

$$t_0 = t_B + \Delta t_R + \Delta t_{CH} = -6,8 + 0,8 + 3,6 = -2,4^{\circ}C;$$
$$A_0 = A_B + \Delta A_R - \Delta A_{CH} = 20 + 2,3 - 3,6 = 18,7^{\circ}C.$$

2. Определяем теплофизические свойства песка:

$C_T = 0,18 \cdot 1500 + 1 \cdot 0,0 \cdot 12 \cdot 1500 = 450$ ккал/м^3.$^{\circ}$С;

$Q_\Phi = 80,0 \cdot 12 \cdot 1500 = 14400$ ккал/м^3.

3. Определяем суммарный теплопоток, поступающий в слой с осадками, в соответствии с данными (см.табл.3 данного приложения):

$$Q_{OC} = C_B \sum P_i t = 1,0(11,0 \cdot 3 + 20,10 \cdot 0 + 75,17 \cdot 0 + 65,9 \cdot 3 + 30,3 \cdot 5) = 2188 \text{ ккал/м}^2.$$

Теплоемкость воды принята равной $C_B = 1,0$ ккал/кг.$^{\circ}$С.

4. Расчетное уравнение (6) п.3.3д настоящего Руководства для определения отепляющего влияния инфильтрации (применимо только для области сезонного протаивания пород) является трансцендентным, так как содержит два взаимосвязанных неизвестных: Δt_{OC} и ξ. В связи с этим решаем уравнение методом подбора, для чего задаем некоторое значение Δt_{OC}, например:

а) $\Delta t_{OC} = 0,3^{\circ}C$;

б) $\Delta t_{OC} = 0,5^{\circ}C$.

В соответствии с этими значениями Δt_{OC} находим t_ξ и ξ по номограммам (см.рис.I, пп.3.3д и 3.5);

а) для I-го случая при $\Delta t_{OC} = 0,3^{\circ}C$ получаем:

$$t_\xi = t_0 + \Delta t_{OC} = -2,4 + 0,3 = -2,1^{\circ}C.$$

При следующих исходных данных находим:

$C_T = 450$; $Q_\Phi = 14400$;

$\lambda_T = 1,5$; $A_0 = 18,7$; $t_\xi = -2,1$,

получаем:

$$\xi_{HOM} = 2,15 \text{ м}$$
$$\xi_{\lambda=1,5} = 2,15 \sqrt{1,5} = 2,6 \text{ м};$$

б) для 2-го случая при $\Delta t_{OC} = 0,5^{\circ}C$ получаем:

$$t_\xi = -2,4 + 0,5 = -1,9^{\circ}C.$$

ξ находим для данного значения t_ξ, остальные исходные параметры те же, что и в I-м случае:

$\xi_{HOM} = 2,2$ м; $\xi_{\lambda=1,5} = 2,2 \sqrt{1,5} = 2,7$ м.

Для I-го и 2-го случаев находим правую часть уравнения (8) п.3.4:

а) $\frac{Q_{oc} \cdot \xi}{\lambda_{пр} \cdot T} = \frac{2188 \cdot 2,6}{I,5.8760} = 0,43^{o}C;$

б) $\frac{Q_{oc} \cdot \xi}{\lambda_{пр} T} = \frac{2188 \cdot 2,7}{I,5 \cdot 8760} = 0,45^{o}C.$

Для определения Δt_{oc} строим график, в котором прямая $y = \Delta t_{oc}$ пересекается с линией $y = \frac{Q_{oc} \cdot \xi}{\lambda_{пр} \cdot T}$ (рис.I). Точка

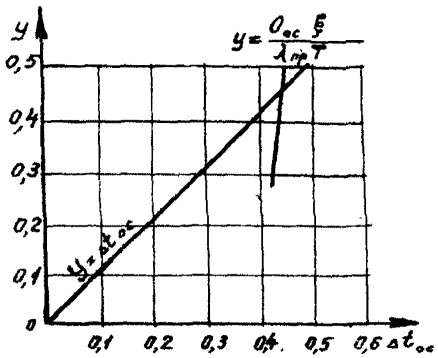


Рис.I. График расчета Δt_{oc} (в примере № 4)

пересечения дает искомое значение Δt_{oc} (по оси абсцисс), равное примерно 0,44°С.

Таким образом, температурный режим в слое ξ, представленном песчаными отложениями, характеризуется повышением среднегодовой температуры на подошве ξ по отношению к среднегодовой температуре на поверхности почвы на 0,44° за счет отепляющего действия инфильтрации атмосферных осадков.

Пример 5

Требуется определить среднемесячные температуры грунта на глубине ξ, равной I,2 м.

Исходные данные:

грунт представлен суглинком;

количество тепла, затрачиваемое на фазовые переходы воды $Q_ф$ = 20000 ккал/м^3;

коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунтов $\lambda_т = \lambda_м$ = I,I ккал/м ч^{0}С;

объемная теплоемкость С = 500 ккал/м^3 ^{0}С;

среднегодовая температура на поверхности пород и на глубине ξ равны $t_0 = t_\xi$ = -3,0^{0}С;

физическая амплитуда температур на поверхности пород A_0 = 20^{0}С.

По климатическим справочникам промерзание грунта слоя сезонного оттаивания начинается с I октября.

В табл.4 по месяцам приведена интенсивность сезонного оттаивания грунта по данным ближайшей метеостанции.

Таблица 4

Исходные данные для примера 5

Месяц	У	УI	УП	УШ	IX	X
Интенсивность сезонного протаивания грунта $n\xi$, %	I0	26	44	68	87	I00

Решение

I. Определяем (см.рис.I, п.3.5) мощность слоя сезонного оттаивания грунта при $Q_ф$ = 20000 ккал/м^3; t_ξ = -3^{0}С; A_0 = 20^{0}С;

$$\xi = \xi_{нам}\sqrt{\lambda_т} = I,90\sqrt{I,I} \approx 2,0 \text{ м}.$$

2. По рис.7 приложения I рекомендуемого при $Q_ф$ = 20000 ккал/м^3; t_0 = -3^{0}С и A_0 = 20^{0}С определяем время промерзания сезонноталого грунта τ_ξ без учета промерзания снизу (сплошная линия на рис.7) и с учетом промерзания снизу (пунктирная линия на рис.7), которые соответственно составляют:

$\tau_{\xi т}$ = 2500 ч, τ_ξ = 2200 ч.

3. Продолжительность летнего и зимнего периодов определяют из рис.I приложения I рекомендуемого:

$\tau_{лет}$ = 3950 ч $\approx$ 5 мес;

$\tau_{зим}$ = 8760 – 3950 = 4810 ч $\approx$ 7 мес.

4. По табл.3 п.3.6 определяем среднемесячную температуру поверхности почвы $t_{0\,мес}$, а также по рис.3 – среднемесячную температуру грунта t_{∞} на глубине ξ, полученные данные сведены в табл.5.

Таблица 5

Результаты расчетов к примеру 5

Среднемесячная температура, °С	Месяцы (в скобках указан номер месяца с начала промерзания грунта											
	X (I)	XI (2)	XII (3)	I (4)	II (5)	III (6)	IV (7)	V (8)	VI (9)	VII (I0)	VIII (II)	IX (I2)
Поверхности пород t_0 мес	-5	-I5	-2I	-23	-I9	-II	-2	+9	+I5	+I7	+I4	+6
Грунта t_{∞} на глубине ξ, °С	0	0	0	-3	-8	-8	-5	-4	-3	-2	-I	0
Грунта $t_{z\,мес}$ на глубине °С	0	-I	-6	-II	-I2	-9	-4	-2	-I	-I	2	2

5. В соответствии с п.3.6 настоящего Руководства определяем продолжительность периода, в течение которого температура грунта на глубине z равна t_f

$$\tau_z - \tau_0 = \left(\frac{z}{\xi}\right)^2 \frac{\tau_{\xi m}}{K_2} = \left(\frac{I,2}{2,0}\right)^2 \frac{2500}{730} \approx I \text{ мес.}$$

6. Рассчитываем в соответствии с п.3.6 среднемесячные температуры грунта в период времени после того, как фронт промерзания достиг глубины z до полного промерзания грунта слоя сезонного протаивания от τ_z до τ_ξ ($\tau_z < \tau < \tau_\xi$).

В I-й месяц (ноябрь, поскольку начало промерзания соответствует началу октября) после того как глубина промерзания грунта превысила заданную глубину z, $t_{z\,мес}$ 5-го равна:

$n = I$

$$\tau - \tau_0 = [(\tau_z - \tau_0) + 0,5] + n - 1 = I + 0,5 + I - I = I,5 \text{ мес.}$$

$$t^*_{z\,мес2} = t_{0\,мес2}\left(1 - \frac{z}{\xi}\sqrt{\frac{\tau_{\xi m}}{730(\tau - \tau_0)}}\right) = -I,5\left(I - \frac{I,2}{2,0}\sqrt{\frac{2500}{730 \cdot I,5}}\right) =$$

$$= -I,4\,^{\circ}C.$$

Аналогично определяем среднедекабрьскую температуру на глубине z :

$$n = 2 \quad \tau_z - \tau_0 = 1 + 0{,}5 + 2 - 1 = 2{,}5 \text{ мес};$$

$$t^{*}_{z\,мес\,3} = -2{,}1\left(1 - \frac{1{,}2}{2{,}0}\sqrt{\frac{2500}{730 \cdot 2{,}5}}\right) = -6{,}3^{\circ} \approx -6^{\circ}C.$$

7. С начала января до начала сезонного оттаивания грунта ($\tau_\xi < \tau < \tau_{зим}$ после смыкания фронта промерзания с вечномерзлой толщей) $t_z(\tau)$ рассчитываем в соответствии с п.3.6 следующим образом

$$t_{z(\tau)} = t_{0мес} + (t_\infty - t_{0мес})\frac{z}{\xi} = -23 + \frac{1{,}2}{2{,}0}\left[(-3) - (-2{,}3)\right] = -11\ ^{\circ}C.$$

Аналогично определяем среднемесячные температуры в феврале-апреле (5-й - 7-й месяцы):*)

$$t_{z\,мес\,5} = -19 - \frac{1{,}2}{2{,}0}\left[-19 - (-8)\right] = -12{,}0^{\circ}C;$$

$$t_{z\,мес\,6} = -9^{\circ}; \qquad t^{**}_{z\,мес\,7} = -4^{\circ}C.$$

8. В соответствии с п.3.6 сначала определяем динамику сезонного оттаивания грунта в летний период:

в середине мая мощность сезонноталого слоя согласно табл.4 исходных данных равна:

$$\xi^{V}_{\tau} = \frac{\xi^{V}_{\tau_0} \cdot \xi}{100} = \frac{10 \cdot 2{,}0}{100} = 0{,}2 \text{ м};$$

в последующие летние месяцы ξ_τ равна

$$\xi^{VI}_{\tau} = \frac{26 \cdot 2}{100} = 0{,}52 \text{ м}; \qquad \xi^{VII}_{\tau} = 0{,}88 \text{ м};$$

$$\xi^{VIII}_{\tau} = 1{,}36 \text{ м}; \qquad \xi^{IX}_{\tau} = 1{,}74 \text{ м}.$$

9. Поскольку до конца УП месяца глубина сезонного оттаивания грунтов не превышает глубины $z\,(z \geq \xi_\tau)$, то среднемесячную температуру грунтов до этого времени определяем $z(\tau)$

---

*) Цифра в индексе $t_{z\,мес}$ и $t_{\xi\,мес}$ здесь и дальше означает порядковый номер месяца от начала промерзания сезонноталого грунта (например, $t_{z\,мес\,5}$, где 5 - пятый месяц с начала промерзания).

**) Цифры в верхнем индексе ξ^{V}_{τ} означают номер месяца.

$$t_{z\,мес\,8} = t_6 + t_{\xi 8}\left(\frac{z - \xi_{\tau}^{\bar{x}}}{\xi - \xi_{\tau}^{\bar{x}}}\right) = -4\,\frac{1{,}2 - 0{,}2}{2{,}0 - 0{,}2} \approx -2^{0};$$

$$t_{z\,мес\,9} = -3\,\frac{1{,}2 - 0{,}52}{2{,}0 - 0{,}52} \approx -1^{0}; \qquad t_{z\,мес\,10} \approx -1^{0}.$$

Начиная с УШ месяца, когда $\xi_{\tau} > Z$, определяем $t_z(\tau)$ следующим образом:

$$t_{z\,мес.11} = t_{0.мес.11}\left(\frac{\xi_{\tau}^{\overline{VIII}} - z}{\xi_{\tau}^{\overline{VIII}}}\right) = 14\,\frac{1{,}36 - 1{,}20}{1{,}36} \approx 2^{0}C;$$

$$t_{z\,мес\,12} = 6\,\frac{1{,}74 - 1{,}20}{1{,}74} \approx 2^{0}C.$$

Полученные среднемесячные температуры грунта на глубине приведены на рис.2.

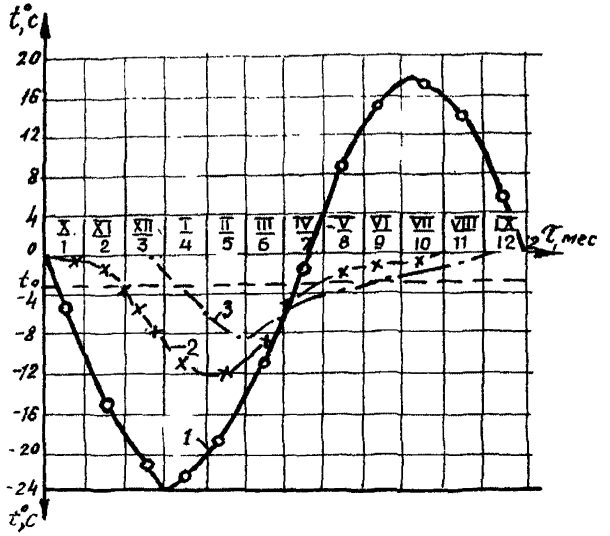


Рис.2. Результаты расчета (пример 5) динамики температур грунта по месяцам:
1-температура поверхности почвы; 2-температура грунтов на глубине $\bar{x}$ =1,2 м; 3-температура грунтов на глубине ξ =2,0 м; I-I2-порядковые номера месяцев от начала промерзания; соответствующие месяцы года указаны сверху римскими цифрами; I-XII-месяцы года

Пример 6

Требуется рассчитать температурный режим данных отложений термокарстового озера, определить, на какой глубине его проходит граница распространения многолетнемерзлой толщи.

Исходные данные:

максимальная глубина озера I,0 м;

донные отложения представлены суглинками $\gamma_{ск}$ = II00 кг/м^3; W = 0,4; $\lambda_т$ = I,0; $\lambda_м$ = I,3 ккал/м ч ^{0}C;

$t_в$ = -8,5^{0}C; $A_в$ = 23^{0}C; $Z_{см}$ = 0,3 м; $\rho_{см}$ =0,25 г/см^3.

Мощность ледяного покрова $H_л$ на глубоких водоемах, формирующаяся зимой в условиях данного района, составляет I,6 м.

Решение

I. Определяем среднегодовую температуру $t_{вод}$ и амплитуду температур $A_{вод}$ на поверхности воды (льда) в водоеме. Отепляющее влияние снега согласно табл.I приложения I равно:

$$\Delta t_{см} = 23 \cdot 0,153 = 3,5^0C;$$

тогда

$$t_{вод} = -8,5 + 3,5 = -5,0^0C;$$
$$A_{вод} = 23 - 3,5 = 19,5^0C.$$

2. В соответствии с п.3.7 определяем глубину озера, на которой среднегодовая температура на поверхности донных отложений равна 0^{0}C. При t_0 = 0^{0}C из формулы (I0) получим

$$h_{в(t_0=0)} = H_л \left(1 + \frac{t_{max.вод}}{t_{min.вод}}\right);$$

$t_{max.вод} = A_{вод} + t_{вод}$ = I9,5 - 5,0 = I4,5^{0}C;

$t_{min.вод} = t_{вод} - A_{вод}$ = -5,0 - I9,5 = -24,5^{0}C;

тогда

$$h_{в(t=0)} = 1,6 \left(1 + \frac{14,5}{-24,5}\right) = 1,6 \ (1-0,59) = 0,66 \text{ м}.$$

Итак, под водоемом глубиной 0,7 м проходит нулевая изотерма среднегодовой температуры на поверхности донных отложений, с которой совпадает граница распространения многолетнемерзлой толщи под озером.

3. Рассчитываем температурный режим на поверхности донных отложений в пределах талика, где глубина озера составляет I,0 м;

$$t_{0(h_в=1)} = \frac{t_{max\ вод}}{2} + \frac{t_{min\ вод}}{2}\left(1 - \frac{h_л}{h_в}\right) =$$

$$= \frac{\frac{1,6-1,0}{1,6}\,(-24,5) + 15,4}{2} = 2,6^{0}C.$$

Так как максимальная температура летом на поверхности воды равна максимальной температуре на поверхности донных отложений (вследствие конвективного перемешивания в мелком водоеме), то, зная среднегодовую температуру, можно легко определить амплитуду годовых колебаний температуры на поверхности донных отложений на глубине 1,0 м

$$A_{0(h_в=0)} = t_{max\ вод} - t_{0(h_в=1)} = 14,5 - 2,6 = 11,9^{0}C.$$

Пример 7

Требуется рассчитать мощность ореола оттаивания грунта под трубопроводом на начальном участке и на расстоянии 10 км от начального участка.

Исходные данные:

трубопровод диаметром $D_н$ = 1420 мм;

грунт многолетнемерзлый;

среднегодовая температура поверхности трубопровода на начальном участке $t_т$ = -1,5°С;

амплитуда годовых колебаний среднемесячных температур поверхности трубы на этом участке $A_{тн}$ = 25°С;

расход газа G = 800000 кг/ч;

теплоемкость газа C_p = 0,5 ккал/кг°С;

многолетнемерзлый грунт представлен песком;

количество тепла, затрачиваемое на фазовые переходы $Q_ф$ = 20000 ккал/м^3;

коэффициент теплопроводности талого грунта $\lambda_т$ = 1,4 $\frac{ккал}{м\ ч°С}$;

среднегодовая температура мерзлого грунта t_h составляет -1,0°С.

Решение

I. Согласно п.4.I7 определяем по табл.4 расчетную температуру при $t_h < 0^0C$, $t_T < 0^0C$, $t_T < t_h$;

$$t = t_h = -I,0^0C.$$

2. Из рис.9б п.4.I7 получаем, что при Q_ϕ =20000 ккал/м^3; $t = -I,0^0C$; $A_{TH} = 25^0$; мощность ореола оттаивания на начальном участке равна I,64 м ($H_{\xi ном}$= I,64 м).

3. Учитывая, что $\lambda_T \neq I$, из рис.9д п.4.I7 находим, что при $\lambda_T = I,40$, $K_\lambda = I,I4$, следовательно, мощность ореола оттаивания на начальном участке равна:

$$H_\xi^H = H_{\xi ном} K_{\lambda=1,40} = I,64 \cdot I,I4 = I,87 \text{ м}.$$

4. Определяем амплитуду температур поверхности трубопровода на расстоянии I0 км при величинах расхода и теплоемкости газа, принятых на номограммах (считая, что $t = t_h$). Из рис.9б п.4.I7 находим, что при ($X = X_0$) = I0 км $A_{T ном}^K$=8,5^{0}C.

5. Рассчитываем амплитуду температур на конечном участке по формуле (42) при C_p = 0,5 ккал/кг^{0}C и G =800000 кг/ч:

$$A_T^K = A_T^H - \left(A_{TH}^H - A_{T ном}^K\right) \frac{99000}{C_p G} =$$

$$= 25 - (25 - 8,5) = \frac{99000}{0,5 \cdot 800000} = 20,9^0C.$$

6. При найденном значении A_T^K и t определяем мощность ореола оттаивания грунта на конечном участке:

$$H_{\xi ном} = I,54 \text{ м}; \qquad H_{\xi ном}^K \cdot K_{\lambda=1,40} = I,75 \text{ м}.$$

Пример 8

Требуется определить мощность ореола оттаивания грунта под трубопроводом. Ореолы оттаивания наибольшей мощности будут формироваться в нашем примере в песчаных отложениях.

Исходные данные:

среднегодовая температура трубопровода $t_T = -1^\circ C$

амплитуда колебаний температур в трубопроводе A_T = 25^{0}C;

среднегодовая температура грунта t_h = -I,5^{0}C;

грунт представлен легким суглинком от нижней образующей трубы до глубины Z_1 , равной I,0 м;

$W^1 = 0,4$; $W_{нз}^1 = 0,08$;
$\gamma_{ск}^1 = 1200$ кг/м^3; $\lambda_т^1 = 1,2$ ккал/м ч^{0}С;
ниже до глубины 5 м залегает песок среднезернистый:
$W^2 = 0,16$; $W_{нз}^2 = 0$;
$\gamma_{ск}^2 = 1560$ кг/м^3; $\lambda_т^2 = 1,4$ ккал/м ч^{0}С.

Решение

1. Рассчитываем величины t, $Q_ф$, необходимые для определения мощности ореола оттаивания в слое песка.

По табл.4 п.4.17 имеем $t_л < 0^0$С; $t < 0^0$С; $t_л < t_т$, следовательно, $t = t_т$;

$$Q_ф = 80 \cdot (W^2 - W_{нз}^2)\gamma_{ск}^2 = 80 \cdot 0,16 \cdot 1560 = 20000 \text{ ккал/м}^3.$$

2. По номограммам (см.рис.9б п.4.17) получаем при соответствующих значениях $Q_ф$, t, $A_т$ мощность ореола оттаивания $H_{ξ ном} = 1,64$ м;

$$H_ξ = H_{ξ ном} \cdot K_{л=140} = 1,64 \cdot 1,14 = 1,87 \text{ м}.$$

3. Определяем средневзвешенные значения W, $\gamma_{ск}$, $\lambda_т$ в слое мощностью 1,87 м.

Определение средневзвешенных значений свойств пород при многослойном строении геологического разреза затруднено тем, что мощность ореолов оттаивания грунтов неизвестна.

Для этого случая мощность ореолов оттаивания рассчитываем путем последовательных приближений.

Вначале определяем мощность сезонноталого грунта для слоя, характеристики которого способствуют формированию наибольших ореолов оттаивания, т.е. для слоя с наименьшей объемной влажностью и объемной теплоемкостью и наибольшим коэффициентом теплопроводности.

Затем для рассчитанного ореола оттаивания определяем средние значения объемной влажности, теплоемкости и теплопроводности и при полученных значениях находим мощность ореола оттаивания грунта, принимая во внимание, что мощность слоя песка Z_2, которая используется при расчете, равна:

$$Z_2 = H_ξ - Z_1 = 1,87 - 1,0 = 0,87 \text{ м};$$

$$W_{ср} = \frac{W^1 Z_1 + W^2 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{0,4 \cdot 1,0 + 0,16 \cdot 0,87}{1,0 + 0,87} = 0,288;$$

$$\gamma_{ск\,ср} = \frac{\gamma'_{ск} Z_1 + \gamma^2_{ск} Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1200 \cdot 1,0 + 1560 \cdot 0,87}{1 + 0,87} = 1370 \text{ кг/м}^3;$$

$$\lambda_{ср} = \frac{\lambda'_т Z + \lambda^2_т Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1,2 \cdot 1,0 + 1,4 \cdot 0,87}{1,0 + 0,87} = 1,29 \text{ ккал/м ч}^\circ\text{C};$$

$$W_{нз.ср.} = \frac{W'_{нз} Z_1 + W^2_{нз} Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{0,08 \cdot 1,0}{1,87} = 0,043.$$

4. Рассчитываем значение $Q_ф^{ср}$ по средневзвешенным показателям $W_{ср}$, $W_{нз.ср}$, $\gamma_{ск.ср}$ и определяем мощность ореола оттаивания грунта под трубопроводом при $\lambda_{ср}$ и $Q_ф^{ср}$;

$$Q_ф^{ср} = 80 (W_{ср} - W_{нз.ср}) \gamma_{ск.ср} = 27000 \text{ ккал/м}^3;$$

$H_{ξ\,ном} = 1,50$; $H_ξ = H_{ξ\,ном} K_{λ=1,29} = 1,50 \cdot 1,10 = 1,65$ м.

5. Определяем значения средневзвешенных показателей свойств грунта слоя мощностью 1,65 м аналогично п.3 данного примера:

$$W^2_{ср} = \frac{0,4 \cdot 1,0 + 0,16 \cdot 0,65}{1,65} = 0,305;$$

$$\gamma^2_{ср} = \frac{1200 \cdot 1,0 + 1560 \cdot 0,65}{1,65} = 1340 \text{ кг/м}^3;$$

$$\lambda^2_{ср} = \frac{1,2 \cdot 1,0 + 1,4 \cdot 0,65}{1,65} = 1,28 \text{ ккал/м ч}^\circ\text{C};$$

$$W^2_{нз\,ср} = \frac{0,08 \cdot 1,0}{1,65} = 0,048;$$

$$Q_ф^{ср} = 27800 \text{ ккал/м}^3.$$

6. По полученному значению $Q_ф^{ср}$, $\lambda^2_{ср}$ при заданной температуре и амплитуде температур определяем $H_ξ$:

$H_{ξ\,ном} = 1,48$ м; $H_ξ = H_{ξ\,ном} K_{λ=1,28} = 1,63$ м.

Так как последние два определения $H_ξ$ незначительно отличаются один от другого, получаем, что мощность ореола оттаивания грунтов под трубопроводом в нашем примере равна примерно 1,6 м.

Пример 9

Требуется определить мощность многолетнего ореола оттаивания грунта под трубопроводом на 3-й и 8-й годы с начала эксплуатации.

Исходные данные:

Трубопровод диаметром $D_н$ = 1420 мм;

грунт многолетнемерзлый;

среднегодовая температура $t_ф$ = -5,9°С;

среднегодовая температура поверхности трубопровода $t_т$=5° С;

амплитуда колебания температур поверхности трубопровода $A_т$= = 20°С;

грунт представлен суглинком $Q_ф$ = 10 000 ккал/м³; $\lambda_т = \lambda_м$ = = 1,0 ккал/м ч °С.

Решение

1. В соответствии с п.4.15 по номограмме рис.7а определяем мощность многолетнего ореола оттаивания грунта под трубопроводом:

$$H_{\tau=3лет} = 3,3 - 0,7 = 2,6 \text{ м};$$

$$H_{\tau=8лет} = 4,3 - 0,7 = 3,6 \text{ м}.$$

2. По номограмме рис.7б п.4.15 находим поправочный коэффициент для $t_{\infty} = t_{\xi} = -5,9°С$, m = 0,78.

3. Находим истинные значения ореолов оттаивания под трубопроводом:

$$H^{уст}_{\tau=3лет} = 2,6 \cdot 0,78 = 2,0 \text{ м}$$

$$H^{уст}_{\tau=8лет} = 3,6 \cdot 0,78 = 2,8 \text{ м}.$$

Пример 10

Требуется определить мощность слоя оттаивания грунта спустя 3, 5 и 10 лет с начала эксплуатации трубопровода.

Исходные данные:

температура поверхности трубы $t_т$ = 10°С;

теплоизоляция трубопровода толщиной $\delta_{из}$ = 0,1 м, теплопроводностью $\lambda_{из}$ = 0,05 ккал/м ч°С;

трубопровод диаметром $D_н$ = 1420 мм уложен подземно;

грунт суглинистый, естественная влажность грунта W = 0,38, объемная масса скелета грунта $\gamma_{ск}$ = 1200 кг/м³;

количество незамерзающей воды в грунте, по данным лабораторных определений, $W_{из}$ = 0,05;

коэффициент теплопроводности талого грунта $\lambda_т$ = 1,15 ккал/м ч °С.

Решение

1. Определяем сначала неизвестные параметры $Q_ф$ и z, необходимые для пользования номограммами:

$Q_ф = \omega\,(W - W_{из})\,\gamma_{ск}$ =80.(0,38 – 0,I5) I200=32000 ккал/м^3;

$$z = z_т + \delta_{из} = 0{,}77 + 0{,}I = 0{,}8I \text{ м.}$$

2. В соответствии с п.4.I5 рассчитываем величину a по номограмме (см.рис.8а) в следующем порядке:

а) на шкале $Q_ф$ (теплота фазовых переходов воды в грунте) от точки со значением $Q_ф$ = 32000 ккал/м^3 восстанавливаем перпендикуляр до пересечения его с линией заданной теплопроводности грунта к ($\lambda_т$ = I,I5) в точке 0_I;

б) через точку 0_I проводим горизонтальную линию до пересечения ее со шкалой температур $t_т$ в точке 0_2;

в) от точки 0_2 линия идет под углом 45^0 по обозначенным направляющим прямым до пересечения в точке 0_3 с горизонтальной линией, проведенной от заданного значения температуры ($t_т$ = I0^{0}C);

г) точку 0_3 проектируем вверх на шкалу a, на которой отсчитываем значение a = I390.

3. Постоянную величину b находим по номограмме (см. рис.8в, п.4.I5) следующим образом:

а) на шкале $\lambda_{из}$ (теплопроводности теплоизоляции) от точки $\lambda_{из}$ = 0,05 ккал/м ч ^{0}C восстанавливаем перпендикуляр до пересечения его с линией заданной теплопроводности грунта ($\lambda_т$ = I,I5 м) в точке 0_I;

б) на шкале z (внешнего радиуса теплоизолированного трубопровода) с определенным значением z = 0,8I м проводим горизонталь до пересечения с кривой заданного радиуса трубопровода (z = 0,7I м) в точке 0_2;

в) через точки 0_I и 0_2 проводим ортогональные между собой прямые до пересечения их в точке 0_3;

г) от точки 0_3 ведем линию параллельно направляющим прямым до пересечения ее со шкалой b, где и получим b =2,4.

4. Функции Z_1 и Z_2 определяем по номограммам (см. рис.8б, п.4.I5 и 8г) методом подбора, поскольку в номограммы входит неизвестная величина H (глубина оттаивания под трубой).

Порядок определения Z_1 и Z_2 следующий:

а) зададим произвольное значение H (например, H =0,6м), тогда параметр ρ будет равен

$$\rho = z_т + H + \delta_{из} = 0{,}7I + 0{,}6 + 0{,}I = I{,}4I \text{ м;}$$

б) по номограмме (см.рис.8б, п.4.I5) от точки ρ =I,4I м на шкале ρ проводим линию, параллельную оси Z_1 до пересечения с кривой ℓ = 0,8I м и справа на шкале Z_1 берем отсчет Z_1 = I,I0;

в) по номограмме (см.рис.8г, п.4.I5) от точки ρ =I,4I м на шкале ρ проводим вертикаль до пересечения с кривой ℓ = 0,8I м в точке 0_I;

г) на шкале b от точки со значением b = 2,4 восстанавливаем перпендикуляр до пересечения его в точке 0_2 с линией, параллельной шкале ρ и проходящей через точку 0_I;

д) через точку 0_2 провод[illegible] линию под углом 45° по обозначенным направляющим прямым д шкалы Z_2, где берем отсчет Z_2 = 2,6;

е) по формуле (37) находим Z:

$$Z = I,I0 + 2,6 = 3,7.$$

Необходимо иметь в виду, что сумма Z_1 и Z_2 (37) п.4.I5 является алгебраической, так как функция Z_2 может принимать как положительные, так и отрицательные значения, определяемые знаком параметра b.

5. Определив значение Z, по формуле (37) находим время протаивания грунта τ на заданную глубину H =0,6 м:

$$\tau = a \cdot Z = I390 \cdot 3,7 = 5I40 \text{ ч}$$

или

$$\tau_{лет} = \frac{5I40}{8760} = 0,587 \text{ лет}.$$

Таким образом, задаваясь рядом значений H, можно получить ход протаивания грунтами во времени под заглубленным трубопроводом, как показано в табл.6.

6. По рассчитанным значениям $\tau = f(H)$ следует построить график зависимости $H = f(\tau)$ (см.рис.3), по которому с достаточной точностью легко определить размер ореола оттаивания под заглубленным трубопроводом на любой момент времени.

7. В случае, когда трубопровод уложен наземно в насыпи или открыто, величину ореола оттаивания, рассчитанную для подземного трубопровода, следует определить согласно формулам (35), (36) п.4.I5.

Для данного примера примем, что ось наземного открытого трубопровода залегает на поверхности грунта h_τ = 0, а наземного трубопровода в насыпи на глубине 0,3 м, т.е. h_τ = -0,3 м.

Таблица 6

Результаты расчета примера I0 при параметре Q = 1390 г/м² и безразмерном параметре b = 2,4

$H_п$	$\rho_п$	Z_1	Z_2	Z	τ, ч	τ, лет
0,2	I,0I	0,I9	0,7	0,89	I240	0,I4
0,4	I,2I	0,52	I,4	I,92	2670	0,3I
0,6	I,4I	I,I	2,6	3,7	5I40	0,59
0,8	I,6I	I,7	5,0	6,7	9320	I,06
I,0	I,8I	2,6	6,5	9,I	I2640	I,44
I,5	2,3I	5,I	I2,0	I7,0	23800	2,72
2,0	2,8I	9,4	20,0	29,4	40800	4,66
2,5	3,3I	I5,0	29,0	44,0	6II00	6,98
3,0	3,8I	22,0	35,0	57,0	79300	9,05
4,0	4,8I	40,0	50,0	90,0	I25000	I4,27

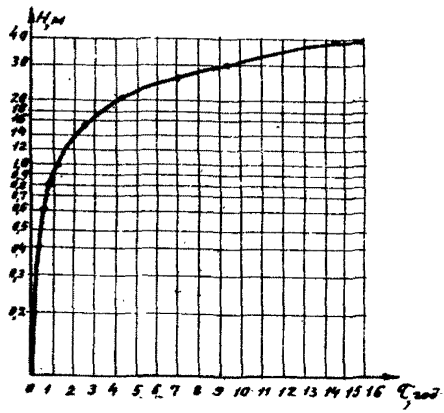


Рис.3. Результаты расчета (пример № I0) динамики многолетнего оттаивания вечномерзлого грунта под трубопроводом с теплоизоляцией

Тогда согласно формулам (35) и (36) п.4.I5 получим следующие зависимости:

$$\rho_0 = 0{,}71 + (\rho_п - 0{,}71)\cdot 0{,}6;$$
$$\rho_н = 0{,}71 + (\rho_п - 0{,}71)\cdot 0{,}92.$$

В табл.7 приведены значения H для τ = 3, 5 и I0 лет при прокладках: подземной $H_п$, в насыпи $H_н$ и открытой $H_о$.

Таблица 7

Результаты расчета ореола оттаивания примера I0

Продолжительность оттаивания, годы	Расчетные значения ореолов оттаивания (H) при различных способах прокладки		
	$H_п$, м	$H_н$, м	$H_о$, м
3-й	I,62	0,92 . I,62=I,48	0,6.I,62=0,97
5-й	2,I	0,92 . 2,I0 = I,94	0,6.2,I=I,26
I0-й	3,I	0,92 . 3,I= 2,85	0.6·3,I=I,86

Пример II

Требуется рассчитать максимальный нагрев газопровода Мессояха–Норильск диаметром $D_н$ = 720 мм в результате солнечной радиации в самое теплое время года, в полдень июля, при различной окраске поверхности трубопровода.

Исходные данные:

$A_т$ = { 0,5 – алюминиевых покрытий различной давности;
0,I – для черных матовых лаковых и масляных покрытий;

$A_{пп}$ = 0,I для летнего периода года, когда $t_в > 0^oC$;

Q_c = 600 ккал/м^{2}ч, R_{max} = 240 ккал/м^2/ч } в полдень в июле, см.рис.I0, II приложения I рекомендуемого

$t_в^{max}$ = +28°C;

ϑ = { = I м/с – безветренная погода или слабый ветер;
6,3 м/с – обычная погода;

α_2^a = { 4,5 ккал/м^{2}ч град – при безветренной погоде или слабом ветре, определяют согласно п.4.I4;
I5,9 ккал/м^{2}ч град – обычная погода, определяют согласно п.4.I4.

Расчетную температуру максимального нагрева наружной поверхности надземного трубопровода t_{max} от солнечной ради-

ации определяем в соответствии с п.4.20 по формуле (46). Результаты расчетов приведены в табл.8.

Таблица 8

Результаты расчетов примера II

Погода	A_T=0,5 (светлая окраска поверхности трубопровода)				A_T = 0,I (темная окраска поверхности трубопровода)			
	I приближение		II приближение		I приближение		II приближение	
	J_1	t_{max}	J_2	t_{max}	J_1	t_{max}	J_2	t_{max}
Обычная	2I,2	36,3	9,4	36,7	37,9	4I,7	23,4	42,7
Безветренная или слабый ветер	74,8	57,2	33,2	58,7	I33,9	76,8	82,7	80,0

Из табл.8 видно, что солнечная радиация существенным образом влияет на температуру надземного газопровода в зависимости от типа покрытия, его наружной поверхности и погоды.

Пример I2

Требуется определить возможную гололедную нагрузку P и максимальную толщину гололеда при неосесимметричном обледенении надземного трубопровода.

Исходные данные:

диаметр трубопровода $D_н$ = I020 мм, имеющего отрицательную температуру при стравливании давления газа в течение 3 ч во время густого тумана;

скорость ветра v = I5 м/с;

температура воздуха $t_б$ = -I,0°С.

Решение

I. Расчет осуществляем в соответствии с п.4.I9 настоящего Руководства:

а) определяем недостающие необходимые для расчета исходные параметры из таб[illegible] 4, 5 приложения I рекомендуемого:

$W = 1{,}5$ г/м^3; $r_к = 30\,\mu = 3 \cdot 10^{-5}$м; $v_в = 13{,}4 \cdot 10^{-6}$м/с;
$\rho_в = 1{,}29$ кг/м^3; $\rho_{н_2O} = 1000$ кг/м^3;

б) определяем значение критического радиуса капель $r_{кр}$:

$$r_{кр} = \frac{3}{4}\sqrt{\frac{13{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}02 \cdot 1{,}29}{2 \cdot 15 \cdot 10^3}} = 1{,}82 \cdot 10^{-5}\text{м} = 18{,}2\mu.$$

Поскольку $r_{кр} = 18{,}2\,\mu$ и меньше $r_к = 30\,\mu$ ($r_к > r_{кр}$), то будет происходить обледенение надземного газопровода при данных погодных условиях;

в) Находим параметры Re_0 и Φ:

$$Re_0 = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 15}{13{,}4 \cdot 10^{-6}} = 67{,}2; \qquad \Phi = \frac{4{,}5 \cdot 1{,}02 \cdot 1{,}29}{3 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3} = 197{,}4;$$

г) По номограмме (рис.11, п.4.19) определяем при данных значениях параметров Re_0 и Φ, коэффициент улавливания U и угол улавливания $\varphi_{ул}$: $U = 0{,}05$; $\varphi_{ул} = 0{,}2 = 11{,}5^0$;

По формулам (44) и (45) п.4.19 находим гололедную нагрузку $P_л$ и максимальную толщину обледенения $\delta_л$

$$P_л = 3{,}6 \cdot 0{,}05 \cdot 1{,}02 \cdot 1{,}5 \cdot 15 \cdot 3 = 12{,}4 \text{ кг/м};$$

$$\delta_л = \frac{3{,}6 \cdot 0{,}05 \cdot 1{,}5 \cdot 15 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{0{,}2} = 0{,}061 \text{ м} = 6{,}1 \text{ см}.$$

2. Как следует из расчета, для трубопроводов большого диаметра ($d_н > 1000$ мм) гололедная нагрузка крайне незначительна и ее можно практически не учитывать.

Однако для магистральных трубопроводов небольших диаметров гололедная нагрузка может иметь существенное значение. Для иллюстрации этого определим обледенение трубопровода диаметром $D_н = 219$ мм в тех же погодных условиях:

3. Безразмерные параметры Re_0 и Φ будут соответственно равны:

$$Re_0 = 67{,}2$$

$$\Phi = \frac{4{,}5 \cdot 0{,}219 \cdot 1{,}29}{3 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3} = 42{,}38.$$

4. Коэффициент улавливания U и угол улавливания $\varphi_{ул}$ будут соответственно равны: $U = 0{,}38$; $\varphi_{ул} = 0{,}99 = 56{,}8^0$.

Гололедная нагрузка $P_л$ и максимальная толщина обледенения δ соответственно составят:

$P_л$ = 3,6 . 0,38 . 0,219 , I,5 . I5 . 3 = 20,2 кг/м;

$$\delta_л = \frac{3,6 \cdot 0,38 \cdot I,5 \cdot I5 \cdot 3 \cdot I0^{-3}}{0,99} = 0,093 \approx 9,3 \text{ см}$$

Таким образом из расчетов следует, что при одних и тех же погодных условиях гололедная нагрузка на надземный трубопровод зависит от диаметра трубы и возрастает по мере уменьшения этого диаметра.

Пример I3

Требуется рассчитать температурный режим газопровода диаметром $D_н$ = I420 мм на участке длиной I00 км между компрессорными станциями на конец I-го и 5-го года эксплуатации трубопровода.

Исходные данные:

начальная температура газа $t_н$ после выхода из первой компрессорной станции постоянная, $t_н$ = 60°С;

начальное давление $P_н$ = 75 кгс/см^2;

пропускная способность трубопровода q = 92,5 млн.м^3;

коэффициент гидравлического сопротивления газопровода ρ = 0,0I;

относительная плотность газа по воздуху Δ = 0,6;

альбедо поверхности трубопровода $A_т$ = 0,2;

климатические характеристики района (температуры воздуха, радиационный баланс и др.) те же, что и в примере I.

Для трубопровода без теплоизоляции допускается пренебречь толщиной стенки трубы и считать, что $d_0 = d_н$ = I420 мм.

Исходные данные для расчета температурного режима газопровода приведены в табл.9 с пояснительной схемой прокладки трубопровода на рис.4. данного приложения.

Решение

I. Расчет изменения температуры газа по длине газопровода выполняют следующим образом:

а) определяем среднемесячную и среднегодовую температуры окружающей среды I-го расчетного участка газопровода согласно

Таблица 9

Исходные данные для примера I3

Показатели	Значения показателей для участков (I–IУ) по типу прокладки (по рис.4)			
	I	II	III	IУ
Длина участка, км	I0	30	20	40
Система прокладки трубопроводов	Наземная	Наземная открытая	Наземная в насыпи	Подземная
Индекс выделенного микрорайона (по рис.4)	L_1	L_2	L_3	L_4
Протяженность микрорайона, км	I0	30	25	35
Вид грунта	Суглинок тяжелый	Суглинок легкий	Песок	Супесь
Влажность грунта	0,5–0,8	0,2I	0,I	0,I75
Объемная масса скелета грунта $\gamma_{ск}$, кг/м^3	–	I300	I350	I350
Количество незамерзающей воды в грунте	–	0,065	0	0,03
Теплота фазовых переходов в грунте Q_φ, ккал/м^3	–	I5000	I0800	I9000
Коэффициент теплопроводности грунта в ореоле оттаивания $\lambda_{т}$, ккал/м ч°С	–	I,3	I,4	I,2
Среднегодовая температура грунта на глубине сезонного протаивания t_β, °С	–	–3,0	–2,5	–I,5
Среднегодовая температура воздуха t_ξ, °С	–	+0,3	+0,3	+0,3
Среднегодовая скорость ветра $v_б$, м/с	I,8	I,8	I,8	–
Расстояние от поверхности почвы до оси трубопровода $h_т$, м	–	0	0,7I	–I,5I
Высота насыпи $h_н$, м	–	–	2,22	–

п.4.I2, причем предварительно определим значения α_2^a согласно п.4.I4 и по номограмме (см.рис.4) найдем соответственно среднегодовое и среднемесячное (декабрьское) значение

$$\alpha_2^a \; ; \; \alpha_{2\,год}^a = 7{,}7 \text{ ккал/м}^2\text{ч.град}$$
$$\alpha_{2\,дек}^a = 5{,}6 \text{ ккал/м}^2\text{ч град};$$



Рис.4. Схема прокладки трубопровода в примере расчета № I3:

I-IУ – номера участков; $L_1 - L_4$ – индексы выделенных микрорайонов (см.табл.I3)

б) по формуле (20) п.4.I2 рассчитываем соответственно:

$$t_{6\,год}^a = +0{,}3 + \frac{8{,}72 \cdot 3{,}2\,(I-0{,}2)}{7{,}7} = 3{,}2^0\text{C};$$

$$t_{6\,дек}^a = -I5{,}6 + \frac{8{,}72 \cdot (-0{,}8)\cdot(I-0{,}2)}{5{,}6} = -I6{,}6^0\text{C};$$

в) определяем коэффициент теплопередачи трубопровода в окружающую среду для I-го расчетного участка согласно п.4.I3:

$$K_{ср.год}^a = \alpha_{г.ср.год}^a \; ; \qquad K_{дек}^a = \alpha_{2\,дек}^a .$$

г) по формуле (I4) п.4.6 рассчитываем в I-м приближении давление $P_{1к}$ в конце I-го расчетного участка газопровода, определив сначала параметры Z, C_p при $T_{ср} = T_н$; $P_{ср} = P_н$;

$$Z = I + \frac{9 \cdot I90 \cdot 75}{I28 \cdot 47{,}5 \cdot 333}\left[I-6\,\left(\frac{I90}{333}\right)^2\right] = 0{,}94;$$

$C_p = 0{,}64$ по номограмме рис.8 приложения I рекомендуемого

$$B = \frac{0{,}0I \cdot 0{,}94 \cdot 92{,}5^2 \cdot 0{,}6 \cdot 333}{I06 \cdot I{,}42^5} = 26{,}3;$$

$$P_{1к} = \sqrt{(75)^2 - 26{,}3 \cdot I0} = 73{,}2;$$

$$P_{1cp} = \frac{2}{3}\left(75 + \frac{73,2}{75 + 73,2}\right) = 74,1;$$

д) по формуле (17) п.4.9 в 1- м приближении рассчитываем среднюю температуру газа на 1-м расчетном участке, определив сначала D_i и M_r при $T_{cp} = T_н$ и $P_{cp} = 74,1$;

$$M_r = 48,58 \cdot 92,5 \cdot 0,64 \cdot 0,6 = 1725,6;$$

$$N = \pi d_н K = \begin{cases} N_{ср.год} = 34,35 \\ N_{ср.дек} = 25,0 \end{cases}$$

$D_i = 0,3$ по номограмме рис.9 приложения 1 рекомендуемого:

$$\delta_{t_{D\,год}} = \frac{0,3 \cdot 26,3 \cdot 10}{12}\left(\frac{1}{73,2} + \frac{4e^{\frac{34 \cdot 10}{2 \cdot 1725,6}}}{\sqrt{75^2 - \frac{26,3 \cdot 10}{2}}}\right) = 0,4;$$

$$\delta_{t_{D\,дек}} = \frac{0,3 \cdot 26,3 \cdot 10}{12}\left(\frac{1}{73,2} + \frac{4e^{\frac{25,10}{2 \cdot 1725,6}}}{\sqrt{75^2 - \frac{26,3 \cdot 10}{2}}}\right) = 0,42;$$

$$T_{1cp\,год} = 276,2 + \frac{1725,6}{34,35 \cdot 10} = (333 - 276,2)\left(1 - e^{\frac{34,35 \cdot 10}{1725,6}}\right) -$$

$$- 0,4 = 327,2 \text{ К};$$

$$T_{1cp\,дек} = 256,4 + \frac{1725,6}{25 \cdot 10}(333 - 256,4)\left(1 - e^{\frac{25,10}{1725,6}}\right) - 0,42 =$$

$$= 327,3 \text{ К};$$

е) по найденной средней температуре газа во 2- м приближении определяем параметры газа: C_p, D_i, t и в соответствии с п.4.7 и 4.6 по формулам (15) и (14) окончательно рассчитываем температуру и давление газа в конце 1-го расчетного участка:

$C_p = 0,63$; $D_i = 0,32$

$$Z = 1 + \frac{9 \cdot 190 \cdot 74,1}{128 \cdot 47,5 \cdot 327,3}\left[1 - 6\left(\frac{190}{327,3}\right)^2\right] = 0,93;$$

$$M = 48,58 \cdot 92,5 \cdot 0,63 \cdot 0,6 = 1725,5;$$

$$B = \frac{0,01 \cdot 0,93 \cdot 92,5^2 \cdot 0,6 \cdot 327,3}{106 \cdot 1,425} = 25,5;$$

$$P_к^{I} = \sqrt{75^2 - 25,5 \cdot 10} = 73,3;$$

$$\Delta t_{Iгод} = \frac{0,32 \cdot 25,5 \cdot 10}{12}\left[\frac{1}{73,3} + \frac{4\theta^{\frac{34,35 \cdot 10}{2 \cdot 1725,5}}}{\sqrt{75^2 - \frac{25,5 \cdot 10}{2}}}\right] = 0,43;$$

$$\Delta t_{Iдек} = \frac{0,32 \cdot 25,5 \cdot 10}{12}\left[\frac{1}{73,3} + \frac{4\theta^{\frac{-25,10}{2,1725,5}}}{\sqrt{75^2 - \frac{25,5 \cdot 10}{2}}}\right] = 0,43;$$

$$T_{Iгод} = 276,2 + (333 - 276,4)\ \theta^{-\frac{34,35 \cdot 10}{1725,5}} \cdot 0,43 = 322,3\ К = 49,3^{\circ}С.$$

$$T_{Iдек} = 256,4 + (333 - 256,4)\ \theta^{\frac{25,10}{1725,5}} - 0,43 = 322,2\ К = 49,2^{\circ}С.$$

2. Полученные конечные температуры газа $T_{Iгод}$ и $T_{Iдек}$ на первом надземном расчетном участке L_I являются начальными для последующего второго наземного участка L_2. Далее расчет проводим в аналогичной последовательности:

а) определяем среднемесячную и среднегодовую температуру окружающей среды 2-го расчетного участка газопровода согласно п.4.12, предварительно определив значения α_2^a согласно п.4.14 и θ согласно п.4.16.

Поскольку температуры газа и грунта имеют противоположные знаки по шкале Цельсия, то будут образовываться ореолы оттаивания в основании трубопровода ($\rho_0 > \frac{d_н}{2}$), тогда: при $h_0 = 0$ $\theta = T$;

$$\alpha_{2год}^a = 7,7; \qquad \alpha_{2дек}^a = 5,6$$

как уже было определено ранее для I-го расчетного участка;
α_2^n находим по номограмме п.4.14 и рис.5;
при значении $h_0 = 0$ и $\lambda = 1,3$; $\alpha_2^n = 1,1$;

$$\alpha_{2год}^o = \left(1 - \frac{T}{2\bar{T}}\right) \cdot 7,7 + \frac{T}{2\bar{T}} \cdot 1,1 = 4,4;$$

$$\alpha_{2дек}^o = \left(1 - \frac{T}{2\bar{T}}\right) \cdot 5,6 + \frac{T}{2\bar{T}} 1,1 = 3,3;$$

по формуле (2I) п.4.I2 определяем:

$$t^{o}_{s\,год} = \frac{0,3 + \frac{7,5 \cdot 3,2}{4,4}}{I + \frac{7,7}{4,4}} = 2,I^{o}C;$$

$$t^{o}_{s\,дек} = \frac{-I5,6 + \frac{5,6}{3,3}(-I6,6)}{I + \frac{5,6}{3,3}} = -I6,2^{o}C;$$

б) находим коэффициент теплопередачи трубопровода в окружающую среду для 2-го расчетного участка согласно п.4.I3:

$$K^{o}_{год} = \alpha^{o}_{2\,год}; \qquad K^{o}_{дек} = \alpha^{o}_{2\,дек};$$

в) по формуле (I4) п.4.6 рассчитываем в первом приближении давление P_{2K} в конце 2-го расчетного участка газопровода, определив сначала параметры Z, C_p при $T_{cp} = T_{1\,год}$ и $P_{cp} = P_{1K}$;

$$Z = I + \frac{9,I90,73,3}{I28-47,5 \cdot 322,3}\left[I-6\left(\frac{I90}{322,3}\right)^{2}\right] = 0,93;$$

$$C_p = 0,63.$$

$$B = \frac{0,0I \cdot 0,93 \cdot 92,5^{2} \cdot 0,6 \cdot 322,3}{I06 \cdot I,425} = 25,I;$$

$$P_{2K} = \sqrt{73,3^{2} - 25,I \cdot 30} = 68,0;$$

$$P_{2cp} = \frac{2}{3}\left(73,3 + \frac{68^{2}}{73,3+68}\right) = 70,7;$$

г) по формуле (I7) п.4.9 в первом приближении рассчитываем среднюю температуру газа на 2-м расчетном участке, определив сначала D_i и $M_г$ при $T_{cp} = T_{1\,год} = 322,3$ и $P_{2cp} = 70,7$; $D_i = 0,35$; $M_г = 45,58 \cdot 92,5 \cdot 0,63 \cdot 0,6 = I725,5$:

$$N = \pi d_н K^{o} = \begin{cases} N_{год} = 19,6; \\ N_{дек} = 14,7; \end{cases}$$

$$\delta_{t\,D_{год}} = \frac{0{,}35\cdot 25{,}1\cdot 30}{12}\left(\frac{1}{68} + \frac{4\,e^{-\frac{19{,}6\cdot 30}{2\cdot 1725{,}5}}}{\sqrt{73{,}3^2 - \frac{25{,}1\cdot 30}{2}}}\right) = 1{,}38;$$

$$\delta_{t\,D_{дек}} = \frac{0{,}35\cdot 25{,}1\cdot 30}{12}\left(\frac{1}{68} + \frac{4\,e^{-\frac{14{,}7\cdot 30}{2\cdot 1725{,}5}}}{\sqrt{73{,}3^2 - \frac{25{,}1\cdot 30}{2}}}\right) = 1{,}33;$$

$$T_{2ср\,год} = 275{,}1 + \frac{1725{,}5}{19{,}6\cdot 30}(322{,}3 - 275{,}1)\left(1 - e^{-\frac{19{,}6\cdot 30}{1725{,}5}}\right) - 1{,}38 = 313{,}7\ \text{К}$$

$$T_{2ср\,дек} = 256{,}8 + \frac{1725{,}5}{14{,}7\cdot 30}(322{,}2 - 256{,}8)\left(1 - e^{-\frac{14{,}7\cdot 30}{1725{,}5}}\right) - 1{,}33 = 313{,}0\ \text{К};$$

4) по найденной средней температуре газа во 2-м приближении корректируем параметры газа: C_p; Z; D_i и согласно п.4.7 и 4.6 по формулам (15) и (17) окончательно вычисляем температуру и давление газа в конце 2-го расчетного участка.

$$C_p = 0{,}65; \quad D_i = 0{,}36;$$

$$Z = 1 + \frac{9\cdot 190\cdot 70{,}7}{128\cdot 47{,}5\cdot 314}\left[1 - 6\left(\frac{190}{314}\right)^2\right] = 0{,}92;$$

$$M = 48{,}58 \cdot 92{,}5 \cdot 0{,}65 \cdot 0{,}6 = 1752{,}5;$$

$$B = \frac{0{,}01 \cdot 0{,}92 \cdot 92{,}5^2 \cdot 0{,}6 \cdot 314}{106 \cdot 1{,}45^5} = 24{,}2;$$

$$P_{2к} = \sqrt{73{,}3^2 - 24{,}2 \cdot 30} = 68{,}2.$$

3. Для расчета изменения температуры газа по длине необходимо определить функцию $F(\theta)$. В соответствии с пп.4.15–4.16 сначала находим ореолы оттаивания на конец 1-го и 5-го года эксплуатации. По номограмме рис.7а,б,п.4.15 при значении исходных параметров: Q_ϕ = 15000, λ_T = 1,3, t_T = +40,0°С находим:
τ = 1 год, ρ_1 = 6,6 м для t_ξ = 0, H_1 = 6,6–0,71 = 5,9 м;
τ = 5 лет, ρ_5 = 12 м для t_ξ = 0, H_5 = 12–0,71 = 11,3 м.

Для t_ξ = –3,0°С и Q_ϕ = 15000 ккал/м³ согласно рис.7б (m = 0,9), поэтому для подземного трубопровода

$$H_1^{подз} = H_1 \cdot m = 5{,}3\ \text{м};$$

$$H_5^{подз} = H_5 \cdot m = 10{,}2 \text{ м}.$$

4. Для наземного трубопровода по формуле (35) для $h_T = 0$ окончательно находим ореолы оттаивания:

если τ = 1 год, то $\rho_0 = 0{,}71 + 5{,}3(1-0{,}4) = 3{,}9$ м;

если τ = 5 лет, то $\rho_0 = 0{,}71 + 10{,}2(1-0{,}4) = 6{,}8$ м.

5. Для $\theta = T$ находим F по формуле:

$$F = \frac{\lambda_0 \theta \cdot t_{ср}}{\ln \frac{2\rho}{d_н}},$$

если τ = 1 год, то $F_1 = -\frac{1{,}3 \cdot \pi \cdot 42{,}1}{\ln \frac{2 \cdot 3{,}9}{1{,}42}} = -100{,}9;$

если τ = 5 лет, то $F_5 = -\frac{1{,}3 \cdot \pi \cdot 42{,}1}{\ln \frac{2 \cdot 6{,}8}{1{,}42}} = -76{,}1.$

6. По формуле (15) в соответствии с п.4.7 определяем конечную температуру газа на 2-м расчетном участке:

$$\Delta t_{под} = \frac{0{,}36 \cdot 24{,}2 \cdot 30}{12}\left(\frac{1}{68{,}2} + \frac{4e^{-\frac{19{,}6 \cdot 30}{2 \cdot 1752{,}5}}}{\sqrt{73{,}3^2 - \frac{24{,}2 \cdot 30}{2}}}\right) = 1{,}35;$$

$$\Delta t_{дек} = \frac{0{,}36 \cdot 24{,}2 \cdot 30}{12}\left(\frac{1}{68{,}2} + \frac{4e^{-\frac{14{,}7 \cdot 30}{2 \cdot 1752{,}5}}}{\sqrt{73{,}3 - \frac{24{,}2 \cdot 30}{2}}}\right) = 1{,}3;$$

для 1-го года эксплуатации:

$$\begin{cases} T_{2\,год} = 275{,}1 - \frac{100{,}9}{19{,}6} + (322{,}3 - 275{,}1 + \frac{100{,}9}{14{,}7})\, e^{-\frac{19{,}6 \cdot 30}{1752{,}5}} - 1{,}35 = \\ \quad = 306 \text{ К} = 33^0\text{С}; \\ T_{2\,дек} = 256{,}8 - \frac{100{,}9}{14{,}7} + (322{,}2 - 256{,}8 + \frac{100{,}9}{14{,}7})\, e^{-\frac{14{,}7 \cdot 30}{1752{,}5}} - 1{,}3 = \\ \quad = 304{,}6 \text{ К} = 31{,}6^0\text{С}; \end{cases}$$

для 5-го года эксплуатации:

$$T_{2\,год} = 275{,}1 - \frac{76{,}1}{19{,}6} + (322{,}3 - 275{,}1 + \frac{76{,}1}{19{,}6})\, e^{-\frac{19{,}6 \cdot 30}{1752{,}5}} - 1{,}35 = 306{,}4$$

К = 33,4°С;

$$T_{2\,дек} = 256{,}8 - \frac{76{,}1}{14{,}7} + (322{,}2 - 256{,}8 + \frac{76{,}1}{14{,}7})\,e^{-\frac{14{,}7 \cdot 30}{1752{,}5}} - 1{,}3 = 305{,}1$$

$$K = 32{,}1\,^{\circ}C.$$

7. Полученные конечные температуры T_2 на 2-м расчетном участке L_2 являются начальными для последующего 3-го подземного участка L_3, для которого выполняют аналогичный расчет в той же последовательности и т.д.

8. Результаты расчета температурного режима газопровода по всем 4-м расчетным участкам сведены в табл.10, в которой приведены конечные температуры, соответствующие 1-му и 5-му годам эксплуатации трубопровода.

Таблица 10

Таблица результатов расчета к примеру 13

Параметры	Срок эксплуатации							
	Конец 1-го года				Конец 5-го года			
№ участка (по рис.4)	I	II	III	IУ	I	II	III	IУ
Индекс участка (по рис.4)	L_1	L_2	L_3	L_4	L_1	L_2	L_3	L_4
Исходные параметры участка:								
X, км	10	30	25	35	10	30	25	35
$P_н$, кгс/см^2	75	73,3	68,2	63,8	75	73,3	68,2	63,8
B	25,5	24,2	23,3	23,0	25,5	24,2	23,3	23,0
$P_к$, кгс/см^2	73,3	68,2	63,8	57,2	73,3	68,2	63,8	57,2
K, ккал/м^{2}град	7,7	4,4	2,03	0,9	7,7	4,4	2,03	0,9
t_s, °C	3,2	2,1	0,3	0,3	3,2	2,1	0,3	0,3
$t_н$, °C	60	49,3	33,0	28,2	60	49,3	33,0	28,2
Расчетные среднегодовые параметры участка:								
M	1725	1752	1750	1347	1725	1752	1750	1347
N	34,4	19,6	5,85	1,3	34,4	19,6	5,85	1,65
$t_{ср}$, °C	54,2	40,7	30,5	23,4	54,2	40,7	30,7	25,2
δ, см	–	–	–	–	–	–	–	–
ρ	–	3,9	3,0	2,9	–	6,8	5,8	5,6
b	0		2,16	4,2	0		2,16	3,7
F	0	-109	-66,1	-93,1	0	-76	-41,7	-60,6

Окончание табл. I0

Параметры	Срок эксплуатации							
	Конец I-го года				Конец 5-го года			
t_x, °С	49,3	33,0	28,2	I6,3	49,3	33,4	28,5	20,I
K, ккал/м^{2}град	5,6	3,3	I,96	0,9	5,6	3,3	I,96	0,9
t_s, °С	-I6,6	-I6,2	-I5,6	-I5,6	-I6,6	-I6,2	-I5,6	-I5,6
Расчетные среднедекабрьские параметры участка								
M	I725	I752	I750	I347	I725	I752	I750	I347
N	25,0	I4,7	5,8	I,6	25,0	I4,7	5,8	I,8
ξ, м	–	–	–	0,I	–	–	–	0,I
ρ, м	–	3,9	4,5	4,3	–	6,8	8,7	8,4
θ	0	π	2,I6	3,8	0	π	2,I6	3,5
F	0	-I09	-5I,7	-65,3	0	-76,0	-36,2	-47,6
$t_п$, °С	60	49,2	3I,6	25,8	60,0	49,2	3I,6	25,8
T_x, °С	49,2	3I,6	25,8	I7,2	49,2	32,I	26,8	I8,9

Пример I4

Требуется рассчитать для наиболее холодного месяца года тепловой и гидравлический режимы работы надземного нефтепровода диаметром $D_н$ = I420 мм на участке длиной I00 км, расположенном в тех же природных условиях, что и газопровод в примере I3.

Исходные данные:

начальная температура нефти $t_н$ = +50°С;

начальное давление $P_н$ = 55 кгс/см^2;

весовой расход нефтепровода G = I тыс.т/ч;

удельный вес нефти $\gamma_н$ = 0,85 т/м^3;

удельная теплоемкость нефти $C_н$ = 0,45 ккал/кг град;

содержание парафина в нефти $\mathcal{E}$ = I,I;

температура начала и конца парафинизации соответственно равны: $t_{нп}$ = 0°С; $t_{кп}$ = -20°С;

минимальная допустимая температура эксплуатации нефтепровода (температура застывания нефти t''_{min} = -I0°;

альбедо поверхности нефтепровода A_T = 0,I;

геодезические высоты начала и конца расчетного участка нефтепровода соответственно равны z_1 = 530 м, z_2 =720 м.

Данные о кинематической вязкости нефти приведены в табл.II.

Таблица II

Зависимость кинематической вязкости нефти $\nu(t)$ от температуры

t, °C	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+35	+50
$\nu_{(t)}$ Ст	1,12	0,65	0,42	0,35	0,25	0,19	0,13	0,1	0,07	0,06

Решение.

1. Определяем согласно п.4.12 температуру окружающей среды наиболее холодного месяца -января.

а) определяем значения α_2^a согласно п.4.14;

б) по номограмме рис.4 находим соответственно для ϑ^a = 2,5 м/с и t_β = -16,8°С:

$$\alpha_2^a = 6{,}5 \text{ ккал/м}^2\text{·ч·град};$$

в) по формуле (20) п.4.12 определяем температуру окружающей среды:

$$t_S^a = -16{,}8 + \frac{8{,}72(-0{,}6)\ (1-0{,}1)}{6{,}5} = -17{,}5^\circ\text{С}.$$

2. Определяем коэффициент теплоотдачи нефтепровода в окружающую среду согласно п.4.13:

$$K^a = \alpha_2^a = 6{,}5 \text{ ккал/м}^2\text{·ч·град}.$$

3. Определяем гидравлический режим течения нефти в трубопроводе. Для этого находим

$$\overline{Re} = 1{,}525 \cdot \frac{1}{1{,}42 \cdot 0{,}06 \cdot 0{,}85} \simeq 21{,}0;$$

так как $\overline{Re} > 1$, то наблюдается турбулентный режим течения нефти.

4. Рассчитываем по формуле (16) согласно п.4.8 конечную температуру нефти в трубопроводе:

а) сначала находим параметры N, F, R, S, M_H.

$\beta = 0$; $F = 0$; $N = \pi d_H K^a = 3{,}14 \cdot 1{,}42 \cdot 6{,}5 = 29{,}0$;

$$M_H = 10^3 \cdot 0{,}45 = 450;$$

Приняв:

$$\begin{cases} \nu_1 = 0{,}42 \text{ Ст при } t_1 = 0^\circ\text{С}; \\ \nu_2 = 0{,}19 \text{ Ст при } t_2 = 15^\circ\text{С}; \end{cases}$$

б) можно найти R и δ :

$$R = 0{,}6I\,\frac{I^{2{,}75}\cdot 0{,}42^{0{,}25}}{0{,}85^{-I{,}75}\cdot I{,}42^{4{,}75}} = \frac{0{,}6I\cdot 0{,}805}{0{,}752\cdot 5{,}29} = 0{,}I23;$$

$$\delta = 0{,}6I\,\frac{I^{2{,}75}\left(\frac{0{,}42^{0{,}25}-0{,}I9^{0{,}25}}{I5}\right)}{0{,}85^{I{,}75}\;\;I{,}42^{4{,}75}} = \frac{0{,}6I(0{,}805-0{,}46)}{I5\cdot 0{,}752\cdot 5{,}29} =$$

$$= I{,}48\cdot I0^{-3};$$

в) окончательно по формуле (I6) определяем конечную температуру нефти:

$$t = \frac{-I7{,}5\cdot 29+0{,}I23}{29{,}0+I{,}48\cdot I0^{-3}} + \left[50 - \frac{-I7{,}5\cdot 29+0{,}I23}{29{,}0+I{,}48\cdot I0^{-3}}\right] e^{-\frac{(29+I{,}48\cdot I0^{3})I00}{450}} =$$

$$= -I7{,}4^{0}C.$$

Поскольку $t < t^{н}_{min}$, то эксплуатация надземного нефтепровода без теплоизоляции при таком расстоянии (x = I00 км) между насосными станциями практически неосуществимо.

Найдем расстояние $x_з$, на котором возможна эксплуатация надземного нефтепровода без теплоизоляции.

Определим критическую температуру нефти $t_{кр}$ (определяющую смену режима течения турбулентного на ламинарный из условия $Re = I$).

$$\nu(t_{кр}) = \frac{I{,}525\theta}{d_0\gamma_н} = \frac{I{,}525}{I{,}42\cdot 0{,}85} = I{,}26\ Ст,$$

следовательно $t_{кр} < -I0^{0}C$.

Приняв, что конечная температура в нефтепроводе должна быть по крайней мере не ниже $t^{н}_{min}$, т.е. $t_{кон} = -I0^{0}C$, можно приближенно определить расстояние $X_з$, на котором нефть остывает до заданной температуры $t_з = -I0^{0}C$.

$$X_з = \frac{M}{\pi\cdot K\cdot d_н}\,\ell n\,\frac{t_н - t_s^{a}}{t_з - t_s^{a}} =$$

$$= \frac{450}{3{,}I4\cdot 6{,}45\cdot I{,}42}\,\ell n\,\frac{+50+I7{,}5}{-I0+I7{,}5} = 34{,}I\ км.$$

Рассчитаем потерю напора в нефтепроводе по формуле (I9) п.4.II при конечном значении вязкости нефти при $t^{н}_{min} = -I0^{0}C$, $\nu = I{,}I2\ Ст$.

$$\Delta P = 0,1 \cdot 0,85\ (720-530)+34,1(1+0,52.10\ \frac{-21^{1,75}.1,12^{0,25}}{1,42^{4,75}.0,85^{1,75}}\ )\ x$$

$$x\ 0,0261\ \frac{1^{1,75}.1,12^{0,25}}{1,42^{4,75}.0,85^{1,75}} = 16,15+34,1(1+0,52.10^{-2}.0,26)\ x$$

$$x\ 0,0261 \cdot 0,26 = 16,4 \text{ кгс/см}^2.$$

Таким образом, конечное давление:

$$P_к = P_н - \Delta P = 55 - 16,4 = 38,6 \text{ кгс/см}^2.$$

СОДЕРЖАНИЕ

I. Общие положения 3

2. Основные принципы прогнозирования теплового взаимодействия трубопроводов с окружающей средой I9

3. Методика прогнозирования температурного режима грунтов трассы в полосе строительства трубопровода вне зоны его теплового влияния 22

4. Методика расчета тепловых режимов трубопроводов, взаимодействующих с окружающей средой 40

5. Приложения 73

Руководство
по прогнозированию теплового
взаимодействия трубопроводов
с окружающей средой

Р 486-83

Издание ВНИИСТа

Редактор Т.Я.Разумовская

Корректор Г.Ф.Меликова

Технический редактор Т.В.Беремева

Подписано в печать II/VI 1984 г. Формат 60x84/I6

Печ.л. 8,25 Уч.-изд.л. 7,0 Бум.л. 4,I25

Тираж 350 экз. Цена 70 коп. Заказ 89

Ротапринт ВНИИСТа

gost.e-ecolog.ru