Министерство строительства предприятий тяжелой индустрии СССР

Проектный и научно-исследовательский институт
"КРАСНОЯРСКИЙ ПРОМСТРОЙНИИПРОЕКТ"

ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ПРОИЗВОДСТВУ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ОСНОВАНИЙ В РАЙОНАХ С ВЕЧНОМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ

Красноярск
1976

gost.e-ecolog.ru

Министерство строительства предприятий тяжелой индустрии СССР

Проектный и научно-исследовательский институт
"КРАСНОЯРСКИЙ ПРОМСТРОЙНИИПРОЕКТ

ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ПРОИЗВОДСТВУ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ОСНОВАНИЙ В РАЙОНАХ С ВЕЧНОМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ

Красноярск
1976

В Руководстве освещаются практические методы определения температурных полей оснований, а также обуславливающих их составляющих внешнего теплообмена и теплофизических характеристик. Знание этих величин необходимо для проектирования фундаментов в соответствии с главой СНиП П-Б. 6-66 "Основания и фундаменты зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах".

Руководство предназначается для изыскателей и проектировщиков, связанных с работой в районах с вечномерзлыми грунтами и глубоким сезонным промерзанием.

Руководство написано канд.геогр.наук А.А.Коноваловым. В составлении П раздела принимали участие канд.физ.-мат.наук А.Г.Конюшенко и инж. Л.А.Наумова.

Редакционная коллегия:
канд.техн.наук Ш.Ф.Акбулатов (отв.редактор),
канд.физ.-мат.наук А.Г.Конюшенко,
К.В.Богданович

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных этапов проектно-изыскательских работ в районах с вечномерзлыми грунтами или глубоким сезонным промерзанием (южная граница этих районов проходит примерно по изолинии среднегодовой температуры воздуха минус $1^{\circ}C$) является производство тепловых расчетов, связанных с определением температурных полей грунта или обуславливающих его величин - составляющих внешнего теплообмена и теплофизических характеристик грунта. Методика большей части этих расчетов изложена в соответствующих нормативных документах.

Однако практика и дальнейшее развитие теории ставят перед проектировщиками новые задачи в области тепловых расчетов, прикладное решение которых раньше не являлось первой необходимостью. Например, для расчета несущей способности грунтового основания по существующей главе СНиПа II-Б.6-66 достаточно знать его стационарное (предельное, при стремлении времени к бесконечности) температурное поле. В то же время известно, что предельно-длительные сопротивления мерзлого грунта зависят от температуры, изменяющейся во времени. Но поскольку не было известно, как учитывать при определении сопротивлений изменение температуры во времени, не возникало потребности в расчете нестационарных температурных полей в основаниях зданий и сооружений. В настоящее же время, когда получено [1] уравнение для предельно-длительных сопротивлений, в которое температура входит как функция времени, появилась необходимость в разработке методов расчета нестационарных температурных полей.

Представляется также важным на базе существующих решений создать унифицированную, максимально приспособленную для практического применения методику расчета температурных полей грунта под естественными и искусственными тепловыми источниками (или стоками) наиболее типичных геометрических форм и режимов теплообмена. В настоящем Руководстве предпринята попытка отработки такой методики.

Руководство состоит из 6 разделов с приложениями. В I разделе приводится перечень исходных и искомых величин, их услов -

ных обозначений. Для искомых величин указывается номер пункта, в котором излагается способ их определения. Следует отметить, что одни и те же переменные могут быть как исходными, так и искомыми величинами, это зависит от условий конкретной задачи. Поэтому в перечне не проводится грани между исходными и искомыми величинами.

Методика определения стационарных и нестационарных температурных полей грунта (в том числе с учетом фазовых превращений грунтовой влаги, возбуждаемых тепловыми источниками различной конфигурации) освещается во 2 и 3 разделах Руководства.

Необходимость в определении стационарных полей возникает при установлении расчетных (наихудших) условий проектирования фундаментов на мерзлых грунтах, используемых по принципу 1 (СНиП П-Б. 6-66); при вычислении предельной глубины оттаивания; при расчете температур под естественными источниками (водоемами, различными типами местности и т.д.).

Стационарные (предельные) температуры кроме того, в любом случае, определяются в качестве исходных величин при расчете нестационарных температурных полей.

Нестационарные температурные поля определяются для расчета предельно-длительных сопротивлений мерзлого грунта с учетом меняющейся во времени температуры, определения осадок оттаивающих оснований при расчете фундаментов по принципу П, прогнозирования изменения температурного режима грунтов на осваиваемой территории и т.п.

Инженерные сооружения, водоемы, участки с измененными условиями теплообмена на поверхности и др., в дальнейшем для краткости именуемые тепловыми источниками, обычно имеют правильную (симметричную относительно центральной оси) геометрическую форму. Если исключить некоторые частности, то все разнообразие встречающихся конфигураций таких источников можно разбить на три группы:

а) наземные (поверхностные) источники в форме бесконечной полосы, прямоугольников с различными соотношениями длины и ширины, круга;

б) их заглубленные или приподнятые над общей поверхностью грунта аналоги в форме, соответственно, горизонтального бруса

бесконечной длины, три грани которого находятся в грунте, - для заглубленного аналога, или - лежат выше общей поверхности грунта - для приподнятого аналога(к таким сооружениям относятся, например, здания на подсыпках, дорожные насыпи и т.п.); такого же бруса, но конечной длины (параллелепипеда); вертикальной трубы конечной длины;

в) источники в форме горизонтальной трубы или бруса квадратного сечения, полностью находящиеся в грунте.

Учитывая относительно небольшие сроки возведения сооружений по сравнению с продолжительностью их службы, процесс установления граничных условий на поверхности контакта сооружения с грунтом (ограничивающей поверхности) можно считать практически мгновенным. При этом обычные для систем "атмосфера-грунт" или "инженерные сооружения-грунт" граничные условия третьего рода (когда задается температура теплоносителя) удается заменить на граничные условия первого рода (когда известной величиной является температура ограничивающей поверхности), обеспечивающие более простое решение.

Исследования института "Красноярский промстройниипроект" показали, что под центрами источников перечисленных конфигураций нестационарные температурные поля удовлетворительно подчиняются уравнению, выведенному Лахенбрухом [2] для центра круглого поверхностного источника.

$$\Theta = erfc\frac{1}{2\sqrt{Fo}} - \left(1-\Theta_{пр}\right) erfc\frac{1}{2\sqrt{Fo}\left(1-\Theta_{пр}\right)} \quad (1)$$

где Θ и $\Theta_{пр}$ - относительные (избыточные) температуры, соответственно нестационарная и стационарная;

$Fo = \frac{a\cdot\tau}{y^2}$ - число Фурье;

a - коэффициент температуропроводности;

y - глубина, считая от низа источника;

τ - время.

Это видно из табл. 1, в которой приведены значения Θ для двух крайних из рассматриваемых случаев, когда верхнее граничное

условие - температура $\vartheta = 1$ - задана на части поверхности, имеющей форму круга и полосы. В первом случае температуры рассчитывались по формуле (1), во втором - по опубликованной в [3].

Таблица I

Значения Q в зависимости от $Q_{пр}$ и F_o для центров полосы (числитель) и круга (знаменатель)

$\vartheta_{пр}$ \ F_o	0	0,2	0,4	1	2	6	9
0,8	0	0,12	0,26	0,48	0,61	0,72	0,74
	0	0,12	0,26	0,48	0,61	0,75	0,76
0,5	0	0,11	0,23	0,36	0,43	0,49	0,50
	0	0,11	0,25	0,40	0,46	0,50	0,50
0,2	0	0,05	0,10	0,15	0,16	0,19	0,20
	0	0,08	0,14	0,18	0,19	0,20	0,20

Однотипность нестационарных температурных полей под центрами источников различной формы и сравнительная простота описывающего их уравнения открывают большие возможности для решения задач с более сложными условиями однозначности. В частности, на основе уравнения (1) получено приближенное решение задачи типа Стефана для двух - и трехмерного случаев [4] (см.п.п.3,6-3.7 Руководства), при единственном допущении, заключающемся в следующем: при отыскании производной глубины промерзания (оттаивания) по времени принято, аналогично [5] и по расчетам, что предельное температурное состояние в промерзающем (оттаивающем) грунте наступает практически мгновенно.

Основной исходной величиной в уравнении (I), отражающей влияние формы источника и нуждающейся в определении, является безразмерная стационарная температура $\vartheta_{пр}$.

Решение стационарных температурных полей в Руководстве даны для поверхностных источников и горизонтальной трубы в грунте.

Стационарные температурные поля заглубленных и приподнятых источников определяются по формулам и графикам для поверхностных источников, только вместо координат реальной плоскости x, y подставляются координаты вспомогательной полуплоскости ξ, ζ, на которой прямоугольные поперечные сечения заглубленных и приподнятых источников - бесконечного бруса, параллелепипеда и вертикальной трубы - конформно отображаются на поперечные сечения (линия на полуплоскости) своих поверхностных аналогов - полосы прямоугольника и круга.

Решения представлены в окончательном, удобном для практического использования виде (графиков, таблиц), с промежуточными выкладками можно ознакомиться в [2-6]. Основные расчетные формулы даны в приложении 1. Графики для стационарных температурных полей в системе "термосвая-грунт" (конвективный теплообмен жидкого теплоносителя в термосвае учитывается методом эквивалентной теплопроводности) и нестационарных температурных полей получены путем обобщения результатов расчетов на электро- и гидроинтеграторе.

Графики для определения положения фазовой изотермы во времени (рис.7-11) построены при допущении $a_2/a_1 = 1$ и $\sqrt{\frac{\lambda_2 c_2}{\lambda_1 c_1}} = 1$ (λ_1, a_1, c_1 - коэффициенты тепло- и температуропроводности и теплоемкость в верхней зоне; λ_2, a_2, c_2 - то же в нижней зоне), что близко к действительности. Уравнение для общего случая дано в приложении 1.

В 4-6 разделах Руководства изложена методика определения исходных величин для расчета температурных полей грунта - составляющих внешнего теплообмена и теплофизических характеристик грунта (и коэффициента эквивалентной теплопроводности жидкого теплоносителя в термосвае). При составлении этих разделов ставилась цель - свести к минимуму количество исходных данных, определяемых в полевых и лабораторных условиях, т.е. упор делался на более доступные проектировщикам косвенные (расчетные) методы определения, основывающиеся на данных метеостанции и справочном материале. Методика определения некоторых вспомогательных данных вынесена в приложение. В приложении приводятся также примеры расчета, помогающие лучшему пониманию излагаемой методики.

1. ИСХОДНЫЕ И ИСКОМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ИХ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Координаты, параметры (размеры в м, время в час)

x, и y - соответственно, горизонтальная и вертикальная координаты пространства, отсчитываемые от центра координат, расположенного под краем теплового источника (или под его центром - в задачах раздела 3 и в решении для горизонтальной трубы в грунте в разделе 2, а также в формулах приложения 1);

r - радиальное расстояние от центра источника (для круга и цилиндра) до точки, в которой определяется температура;

$y_ц$ - глубина под центром источника, отсчитываемая от его низа (за вычетом мощности слоя сезонного промерзания и оттаивания - для поверхностных источников);

ξ - глубина промерзания или для бесконечного цилиндра - радиус промерзания;

b и ℓ - ширина и длина источника;

r_0 - радиус круга или цилиндра;

$r_{тр}$ - радиус горизонтальной трубы;

$r_{из}$ - внешний радиус теплоизоляционного покрытия;

$h_{из}$ - толщина теплоизоляции;

h и $h_{тр}$ - расстояние по оси y, соответственно, до низа заглубленного источника или до центра горизонтальной трубы;

$h_{тер}$ общая длина термосваи;

$h_п, h_н$ - длина подземной и надземной частей термосваи;

d_1, d_i - диаметры большей и меньшей труб, образующих круглую щель;

τ - время;

$\tau_г$ - годовой отрезок времени, 8760 час.

Показатели температуры (^oC)

t_0 - температура грунта за пределами источника (началь-

ная температура - при расчете нестационарных температурных полей), устанавливаемая по наблюдениям за пределами зоны (или до начала) теплового влияния источника;

$t_{пр}$ - предельная (стационарная) температура грунта в точке с заданными или искомыми координатами;

$t_{пр}'$ - предельная температура с учетом геотермического градиента;

t_τ - нестационарная температура грунта в точке с заданными или искомыми координатами;

$t_{сг}$ - среднегодовая температура в естественных условиях, определяемая разовым замером на глубине 10 м;

t_{max} - максимальная за год температура грунта;

$t_п$ - температура ограничивающей поверхности (температура на контакте источника с грунтом), устанавливается согласно п.п. 4.1-4.6.

Климатические показатели

$t_в$ - температура воздуха, град. (5.2)[x];

$A_м$ - годовая амплитуда колебаний температуры воздуха, град. (5.2);

B - радиационный баланс, ккал/м^{2}мес. (5.3);

LE - затраты тепла на испарение, ккал/м^{2}мес. (5.5);

$Q_с = S + D$ - суммарная солнечная радиация, ккал/м^{2}мес. (5.3);

$S_и D$ - прямая и рассеянная солнечная радиация, ккал/м^{2}мес. (5.4);

A - альбедо поверхности, доли единицы (прил.III);

$\alpha_к$ - коэффициент конвективного (турбулентного) теплообмена, ккал/м^{2}час.град. (5.6);

E - интенсивность испарения, мм/сутки, (5.5);

$Поб$ - общая облачность, доли единицы, по данным метеостанций;

P - количество осадков, мм/декада, по данным метеостанций;

х) Здесь и далее в скобках указан номер пункта, в котором изложена методика определения данного показателя.

$V_в$ - скорость ветра на высоте флюгера, м/сек, по данным метеостанций;

$h_{см}, \gamma_{сн}$ - высота и плотность снежного покрова, м, по данным метеостанций с учетом п.5.7.

Физические и теплофизические константы

$\lambda, a, \nu_к$ и С - коэффициенты теплопроводности (ккал/м.час.град), температуропроводности ($м^2$/час), кинематической вязкости ($м^2$/час) и объемная теплоемкость; для грунтов, определяемые согласно п.п. 6.1-6.4, для прочих веществ и материалов - по справочникам;

$C_{ук}, C_{уз}, C_{ув}$ - удельные теплоемкости частиц грунта, льда и воды (ккал/кг·град) (6.4);

$\gamma_{ск}$ - объемный вес скелета грунта, кг/$м^3$;

$\gamma_у$ и γ - удельный и объемный вес грунта, кг/$м^3$;

$W_с$ и $W_н$ - суммарная влажность и влажность за счет незамерзшей воды, доли единицы (6.3);

q - степень заторфованности (отношение веса торфа к весу всего грунта), доли единицы (6.4);

V - скорость движения хладоносителя, м/час;

G - степень водонасыщения, доли единицы (6.1);

$\gamma_в$ и $\gamma_л$ - плотность воды и льда, кг/$м^3$, (6.4);

$W_п$ - полная влагоемкость, доли единицы, (6.4);

$\lambda_э$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности хладоносителя в термосвае, ккал/м·час·град, (6.5);

$\lambda_{из}, R_{из}$ - коэффициент теплопроводности, ккал/м·час·град и термическое сопротивление изоляции, $м^2$час·град/ккал, определяемые по справочному материалу;

$\lambda_{сн}$ - коэффициент теплопроводности снега, ккал/м·час·град (5.7);

$R_{сн}$ - термическое сопротивление снега, $м^2$час·град·ккал (5.7);

$G_г$ - геотермический градиент, принимаемый по наблюдениям, или приближенно 0,03 град/м;

ρ - скрытая теплота фазовых превращений воды, 80 **ккал/кг,**
α - коэффициент теплоотдачи, ккал/м^2·час·град (4.6).

Безразмерные обобщенные величины

$\Theta_{пр} = \frac{t_{пр} - t_0}{t_п - t_0}$ - предельная (стационарная) относительная температура, зависящая от формы источника;

$\Theta = \frac{t_\tau - t_0}{t_п - t_0}$ - нестационарная относительная температура;

$F = \frac{\alpha \tau}{\gamma z}$ - число Фурье для источника любой формы, **кроме** бесконечного цилиндра;

$Fo = \frac{a \cdot \tau}{r_0^2}$ - число Фурье для бесконечного цилиндра (рис.12);

$Fo = \frac{\alpha \tau}{\gamma^2}$ - число Фурье на графике рис.7-11 (при $Ko = 0$; $Fo = \frac{a\tau}{\gamma^2}$),

$Nu = \frac{\alpha \cdot 2r_0}{\lambda}$ - критерий Нуссельта для цилиндра;

$Nu_к = \frac{\alpha (d_2 - d_1)}{\lambda}$ - то же, для кольцевой щели;

$P_r = \frac{\nu_к}{a_1}$ - критерий Прандтля;

$Re = \frac{V \cdot 2r_0}{\nu_к}$ - критерий Рейнольдса;

$Re_к = \frac{V \cdot (d_2 - d_1)}{\nu_к}$ то же, для кольцевой щели; $H = \frac{y}{h}$; $f = \frac{h}{r_0}$;

$\Gamma = \frac{x}{h}$; $\eta = \frac{z}{r_0}$; $Ko = \frac{80 \cdot \gamma_{ск} \cdot (W_с - W_н)}{c_1 \cdot (t_п - t_0)}$ — критерий Коссовича;

$Ka = \frac{a_2}{a_1}$; $K_э = \sqrt{\frac{\lambda_2 \cdot c_2}{\lambda_1 \cdot c_1}}$

Индексами "М" и "Т" в тексте обозначены теплофизические константы и температуры соответственно мерзлого и талого грунтов.

Индексами "МИН" и "ОР" - удельные теплоемкости соответственно минеральных и органических частиц грунта.

Цифрами 1 и 2 помечены теплофизические константы и температура в мерзлой и талой зонах в случае промерзания и, наоборот, - в случае оттаивания.

2. ПРЕДЕЛЬНЫЕ (СТАЦИОНАРНЫЕ) ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ ГРУНТА

2.1. Предельные температурные поля рассчитываются по формулам;

- для теплофизически однородного (мерзлого или талого) грунта

$$t'_{пр} = t_0 + \Theta_{пр} \cdot (t_п - t_0) + G_z \, y_п \qquad (2)$$

- для двухслойной среды из мерзлого и талого грунта; в верхней (ближайшей к источнику) зоне

$$t'_{пр_1} = t_0 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \Theta_{пр} \left(t_п - t_0 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) + G_z \cdot y_п \qquad (3)$$

- в нижней зоне

$$t'_{пр_2} = t_0 + \Theta_{пр} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} t_п - t_0 \right) + G_z \cdot y_п \qquad (3')$$

здесь и далее $y_п$ - глубина, отсчитываемая от поверхности грунта.

2.2. Величина $\Theta_{пр}$ в выражениях (1) - (3') определяется с помощью формул в приложении 1 графиков на рис.1-7 и в соответствии с указаниями п.п. 2.3-2.7.

2.3. Для поверхностных источников (полосы прямоугольника круга), а также бесконечной горизонтальной трубы в грунте, изолинии температурных полей которых являются дугами окружностей (или по форме близки к ним), графики (рис.1) даны только для осей симметрии (центров источника). Определение положения искомой изотермы в других точках плоскости x, y производится в таком порядке;

- по формуле (4) вычисляется радиус изотермы z_{um}

$$z_{um} = 0{,}5 \, y_ц (1 + \delta) \qquad (4)$$

где δ - параметр равный:

$\left(\frac{0{,}5\,b}{y_ц}\right)^2$ - для полосы и прямоугольника;

$\left(\frac{z_0}{y_ц}\right)^2$ - для круга;

$\frac{h_{тр}^2 - z_{тр}^2}{y_y^2}$ для горизонтальной трубы

- описывается окружность радиусом $z_{изт}$ (искомая изотерма) из точки на оси симметрии, отстоящей от y_u в сторону источника на величину $z_{изт}$.

2.4. При действии нескольких (n) источников с одинаковой температурой ограничивающей поверхности $\theta_{пр}$ вычисляется по формуле

$$\theta_{пр} = \theta_{пр(1)} + \theta_{пр(2)} + \dots \theta_{пр(n)} \qquad (5)$$

Величины $\theta_{пр(1)} - \theta_{пр(n)}$, в уравнении (5) определяются по формулам приложения 1 или согласно п.2.3.

Аналогично рассчитываются температурные поля под источниками сложной формы, если их удается представить совокупностью простых тел (прямоугольников, полос, секторов круга).

2.5. Если длина источника в два или более раз превышает ширину, а отношение ширины к глубине, на которой определяется температура, больше некоторой критической величины $\frac{b}{z}_{кр}$, зависящей от температурного перепада $t_п - t_о$ (табл.2), величину $\theta_{пр}$ под центром источника с практической точностью можно принимать равной 1.

Таблица 2

Значение величины $\frac{b}{z}_{кр}$

$t_п - t_о$	0,38	0,5	1	1,5	2	3	4	5
$\frac{b}{z}_{кр}$	4	2,5	0,9	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15

Около границ таких источников $\theta_{пр}$ определяется по формуле (6)

$$\theta_{пр} = 0{,}5 \pm \frac{1}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{x}{y} \qquad (6)$$

или графику на рис.1 как для полосы, но при $\delta = (\frac{x}{y})^2$ (x - отсчитывается от контакта между участками с отрицательной и положительной температурой). Знаки перед вторым слагаемым подбираются так, чтобы под источником (участком с температурой $t_п$) $\Theta_{пр}$ лежала в пределах: $0,5 < \Theta_{пр} < 1$; вне его $0 < \Theta_{пр} < 0,5$.

В углах - величина $\Theta_{пр}$ рассчитывается по формуле 3 прил.1 как для сектора круга с центральным углом $\beta = 0,5\pi$.

2.6. Предельные температурные поля заглубленных и приподнятых источников в форме бесконечного бруса, параллелепипеда, вертикальной трубы определяются также как и наземных (см. п.п. 2.2-2.5), только вместо X, Y и $0,5\,b$ в соответствующие формулы и графики подставляются координаты вспомогательной полуплоскости $1 + z_\vartheta$, ϑ и $1 + z_b$, найденные в зависимости от Г и Н с помощью графика на рис.3, при этом величина z_b, определяется при $Г = 0,5\,b/h$ и $Н = 0$. При расчете температурных полей заглубленных источников используется нижняя часть графика рис.2 ($\vartheta > 0$), приподнятых - верхняя ($\vartheta < 0$).

Центр координат размещается под низом левого края источника.

2.7 На рис.4-6 приведены графики для нахождения предельных температурных полей в системе "термосвая-грунт" для трех значений $\varepsilon = \lambda_э/\lambda_м$ на конец холодного периода.

Величины ε могут изменяться от 1 до ∞. При $\varepsilon = 1$ величина $\Theta_{пр} = 0,63\,\Theta_{пр.кр.}$ ($\Theta_{пр.кр.}$ - предельная температура под источником в форме круга, определяемая согласно п.п.2.2-2.3), при $\varepsilon = \infty$ величина $\Theta_{пр}$ определяется как для вертикальной заглубленной трубы (п.2.6). Для промежуточных значений ε предельные температуры ищутся в такой последовательности:

- при заданных значениях переменных Н, μ и η определяется $\Theta_{пр}$ для пяти значений ε (0, 22, 43, 86, ∞)
- по этим данным строится график зависимости $\Theta_{пр}$ от $\exp(-0,01\varepsilon)$
- с помощью указанного графика находится $\Theta_{пр}$ для заданного значения ε.

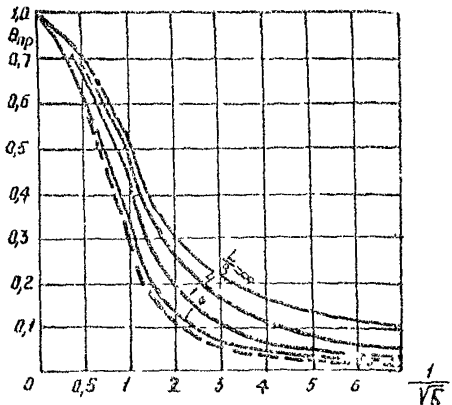


Рис.1 Стационарные (предельные) температурные поля под центрами ($x = 0,5\,\beta$, $Z = 0$) поверхностных источников.

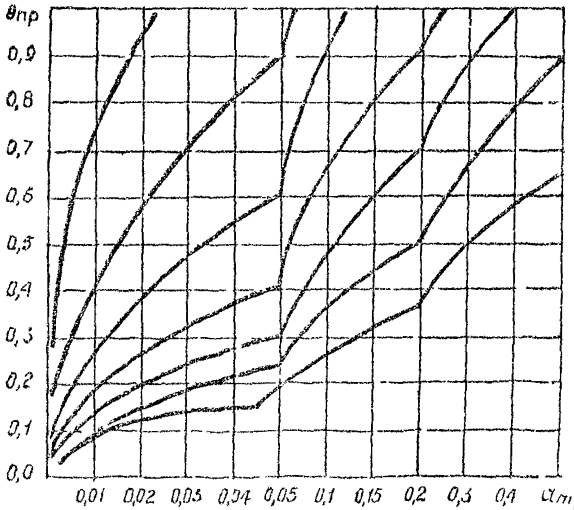


Рис.2 Стационарные (предельные) температурные поля под центром (X=0) горизонтальной трубы в области $y \geq z_{тр}$, $h_{тр}$, $a_{тр}$ $\frac{h_{тр}^2 - z_{тр}^2}{y^2}$

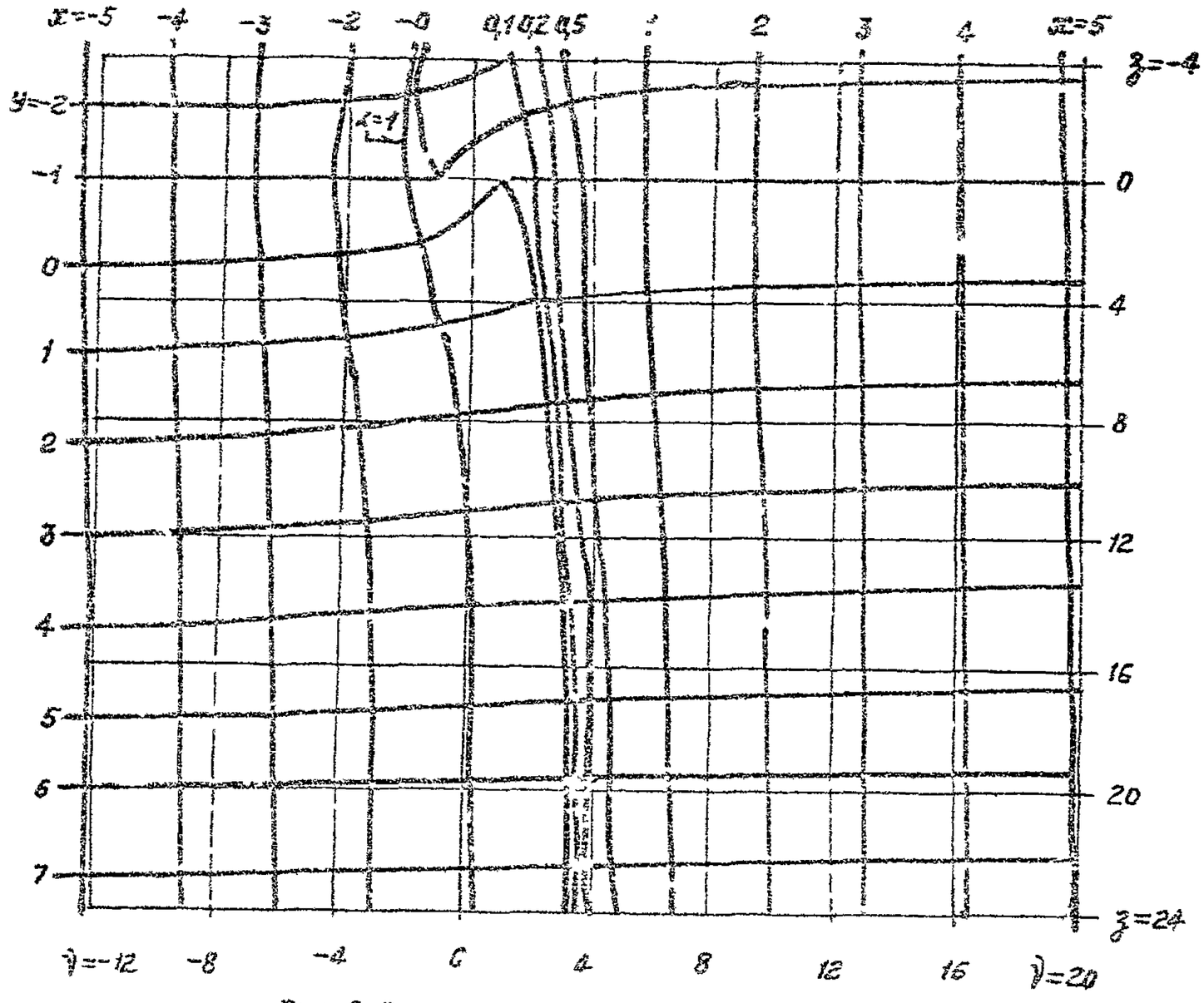


Рис.3 Сетка для перевода координат X, Y в координаты z η и обратно.

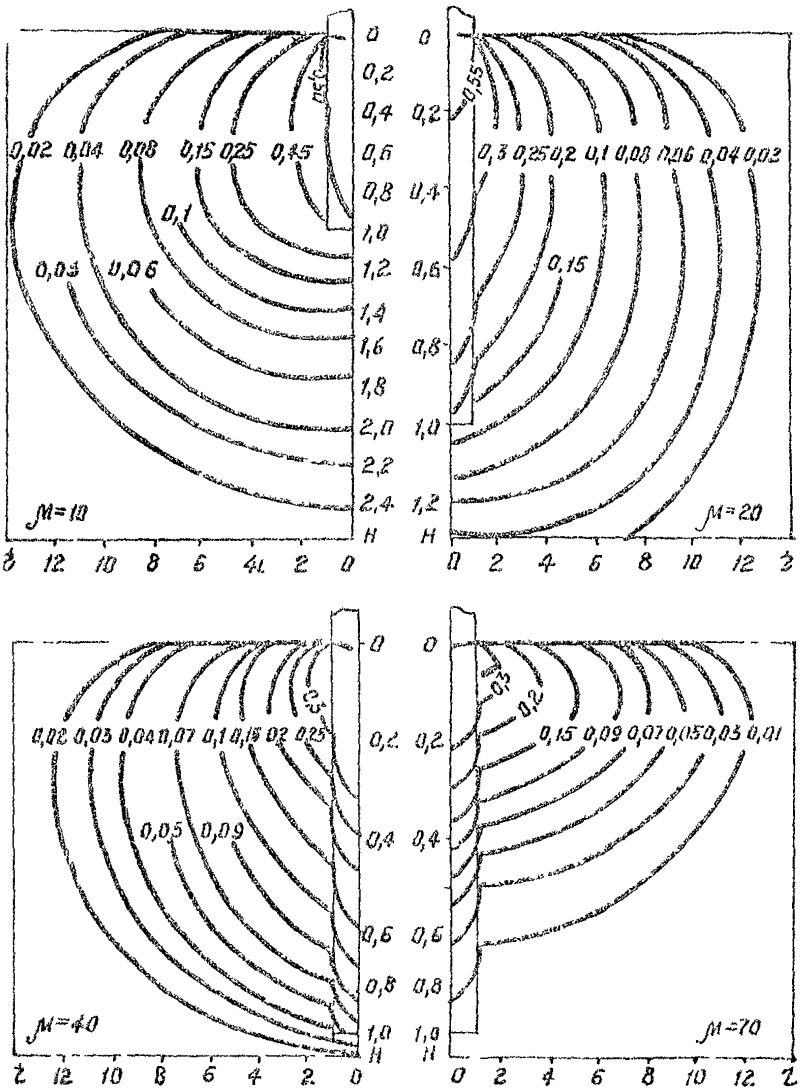


Рис.4 Стационарные (предельные) температурные поля в системе грунт-термосвая при $\frac{Q}{\gamma} = 8$

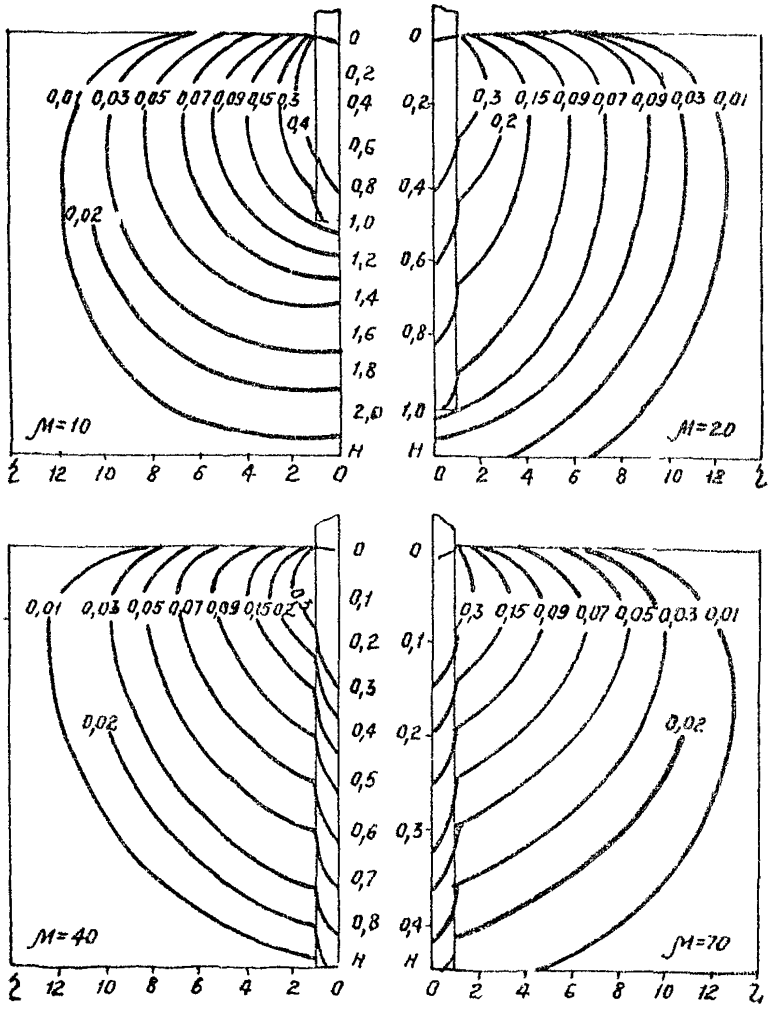


Рис.5 Стационарные (предельные) температурные поля в системе грунт-термосвая при $\varphi = 43$.

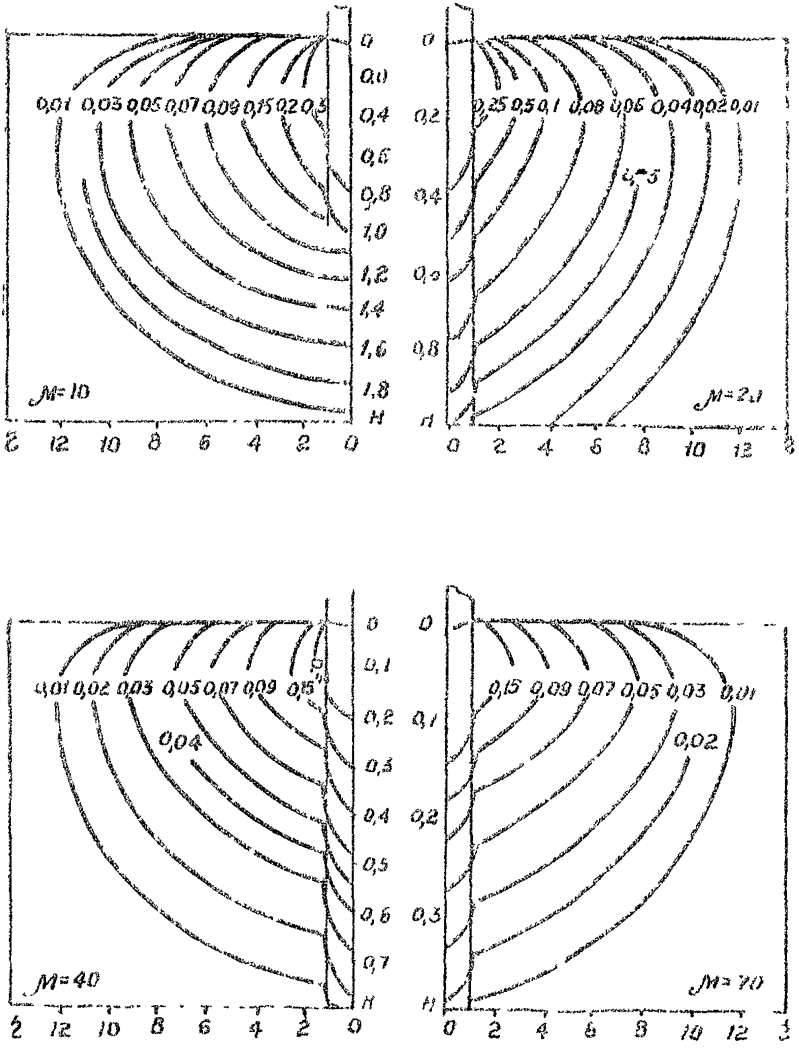


Рис.6 Стационарные (предельные) температурные поля в системе грунт-термосвая при ξ = 22

Примечание. Размерные температуры в системе "грунт-термосвая" вычисляются по формуле (2), но вместо t_n в этом случае подставляется $t_в$ - среднезимняя температура воздуха, вместо $t_o - T_{max}$

2.8. Наличие термического сопротивления между сооружением и грунтом учитывается приближенно- удлинением координат глубины под сооружением (или логарифма относительного радиуса в пределах высоты цилиндрического источника)на величину эквивалентного слоя, т.е. в соответствующие формулы или графики вместо y и η подставляется

$$Y = y + \frac{\lambda}{\lambda_{из}} \cdot h_{из} \qquad (7)$$

$$N = \frac{r}{r_{из}} \cdot \left(\frac{r_{из}}{r_o}\right)^{\frac{\lambda}{\lambda_{из}}} \qquad (8)$$

3. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ ГРУНТА

3.1. Нестационарные температурные поля в грунтовом полупространстве при отсутствии фазовых превращений влаги (Ко = 0) рассчитываются по формуле

$$t_\tau = t_o + \theta \cdot (t_n - t_o) + G r \cdot y_n \qquad (9)$$

3.2. Относительная температура θ в уравнении (9) для тепловых источников любой формы (за исключением бесконечного цилиндра) рассчитывается в такой последовательности:

-по п.п. 2.2 - 2.4, 2.6 находится $\theta_{пр}$ в точке с заданными координатами и затем - глубина под центром источника, в которой наблюдается найденное значение $\theta_{пр}$;

- на этой глубине по графикам на рис.7 при Ко = 0 или, более точно, формуле (1), определяется величина θ , которая и будет искомой.

3.3. При расчете температурных полей, возбуждаемых цилиндрическими источниками в $_{,}M > 70$ и (для горизонтального цилиндра

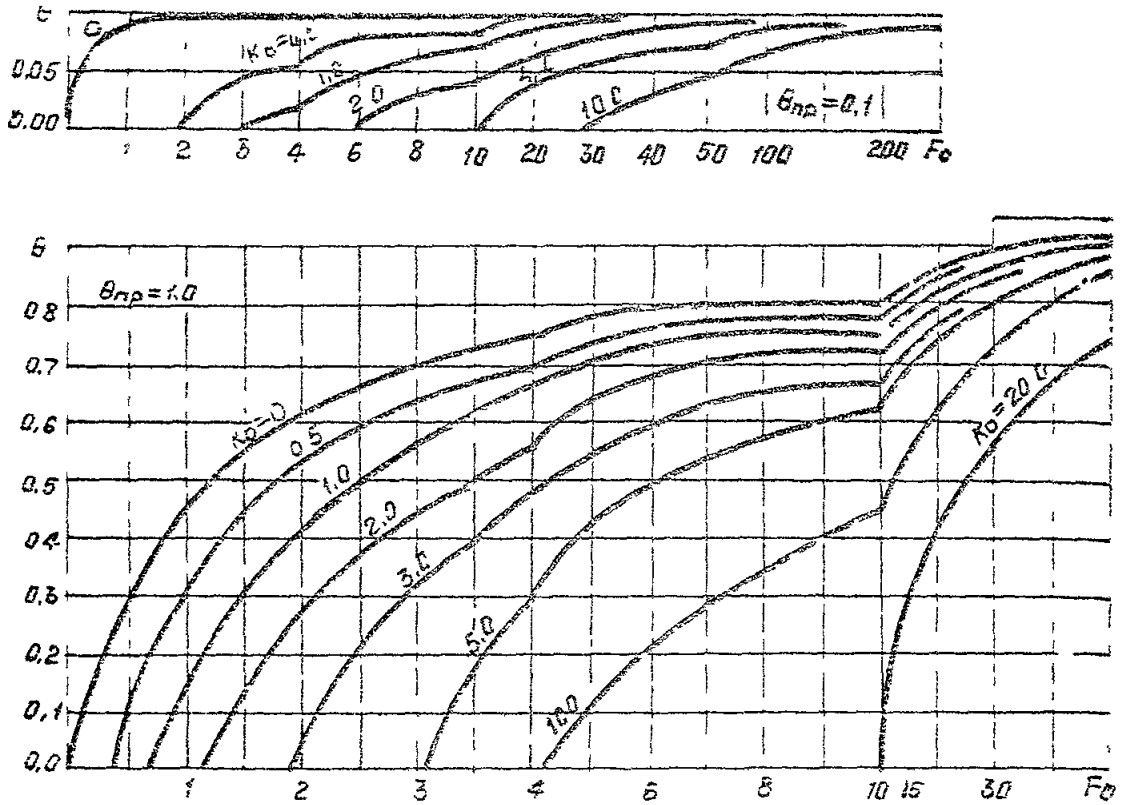
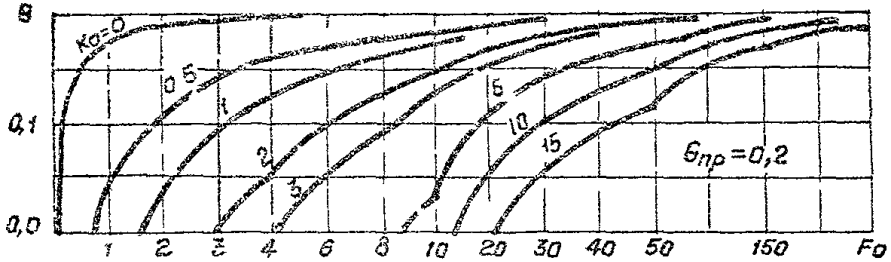


Рис.7 Нестационарные температурные поля под центрами источников в торце полосы, прямоугольника, круга, их заглубленных аналогов а также-горизонтальной трубы в грунте при $\Theta_{пр}$= 1 и $\Theta_{пр}$= 0,1.



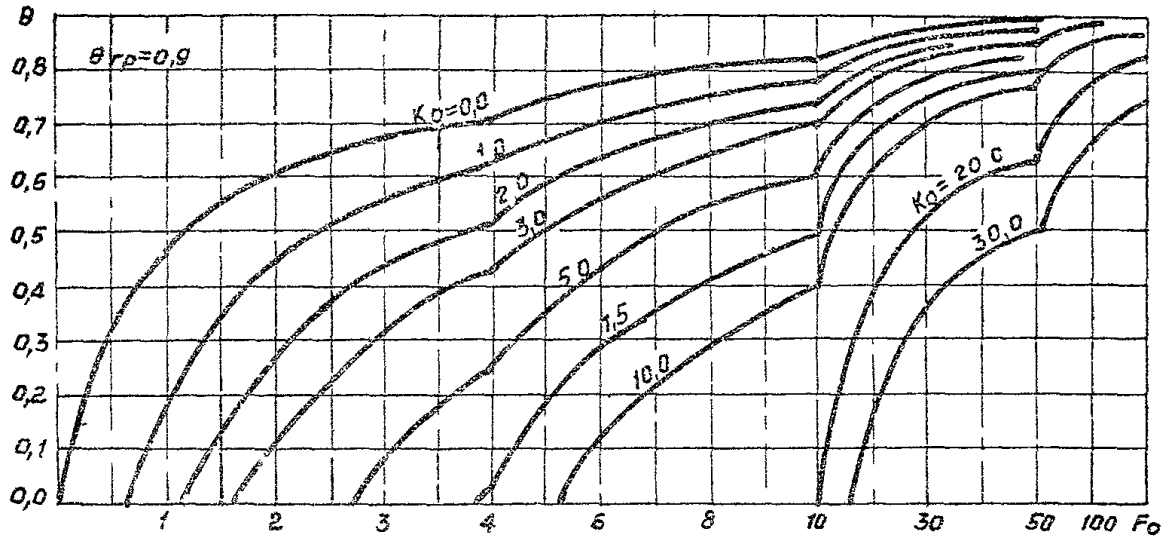
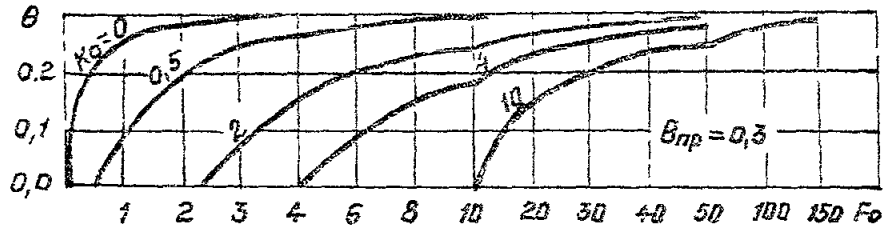


Рис.8 Нестационарные температурные поля под центрами источников в форме полосы прямоугольника круга, их заглубленных аналогов, а также-горизонтальной трубы в грунте при $\theta_{гр}$= 0,9 и $\theta_{пр}$= 0,2



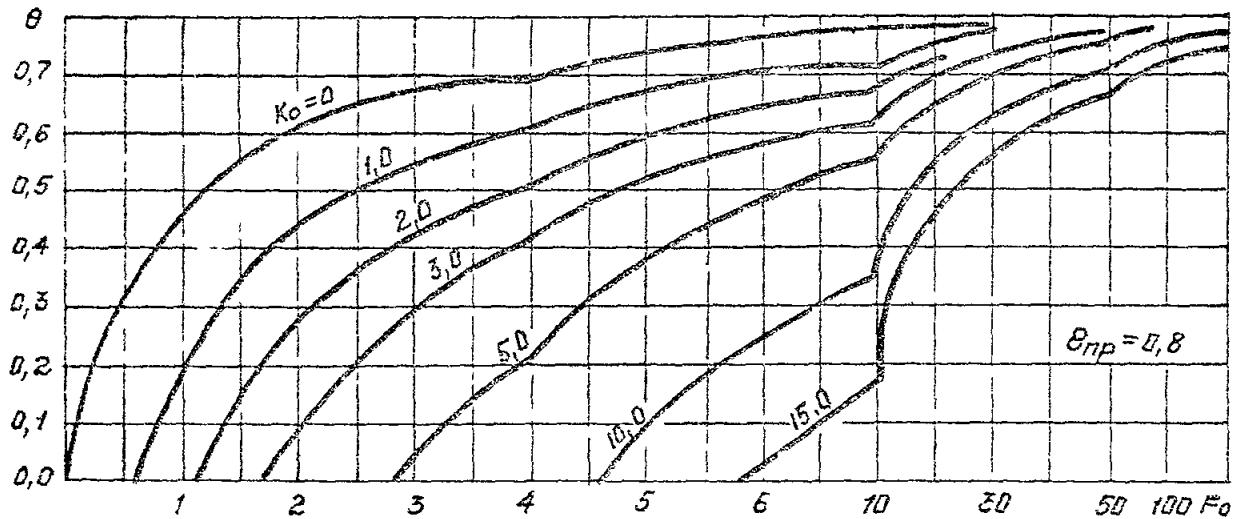


Рис.9 Нестационарные температурные поля под центрами источников в форме полосы, прямоугольника, круга, их заглубленных аналогов, а также - горизонтальной трубы в грунте при $\theta_{пр}$= 0,8 и $\theta_{пр}$= 0,3.

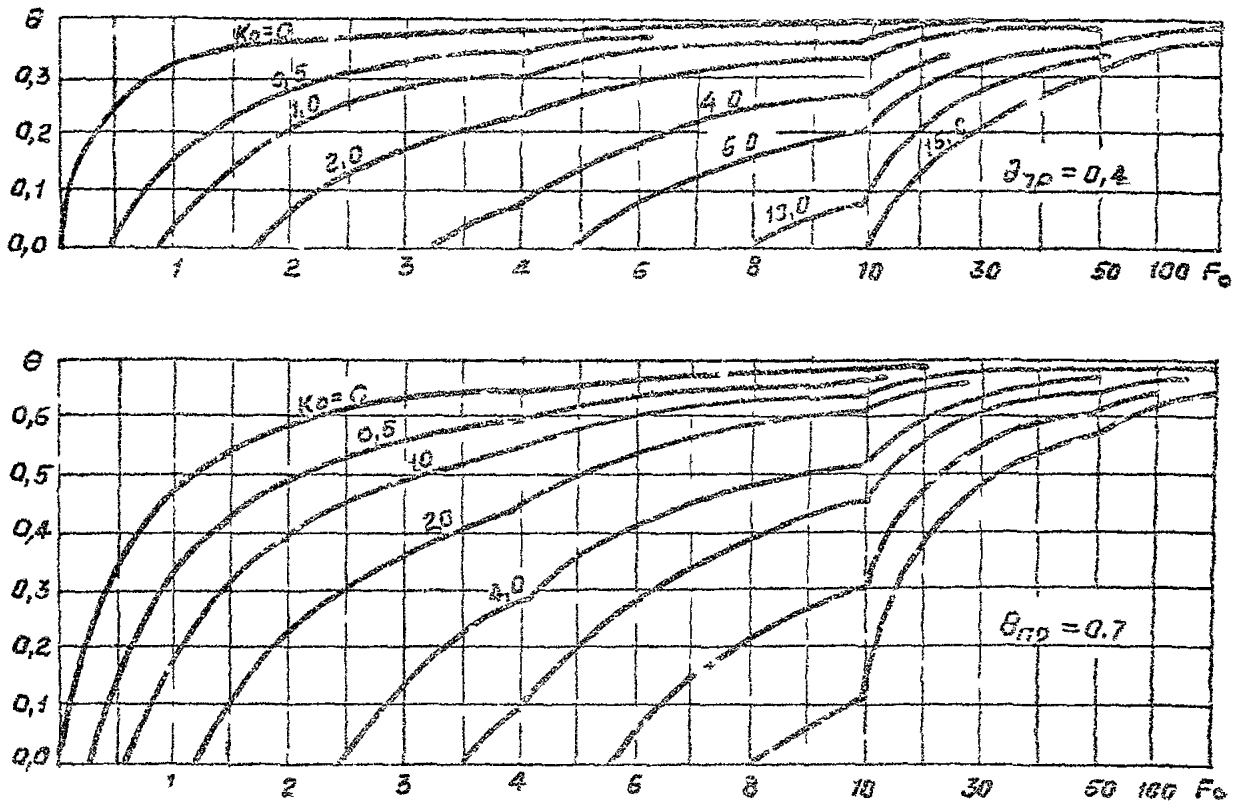


Рис.10 Нестационарные температурные поля под центрами источников в форме полосы прямоугольника, круга, их заглубленных аналогов, а также - горизонтальной трубы в грунте при $\vartheta_{пр}=0.7$ и $\vartheta_{пр}=0.4$.

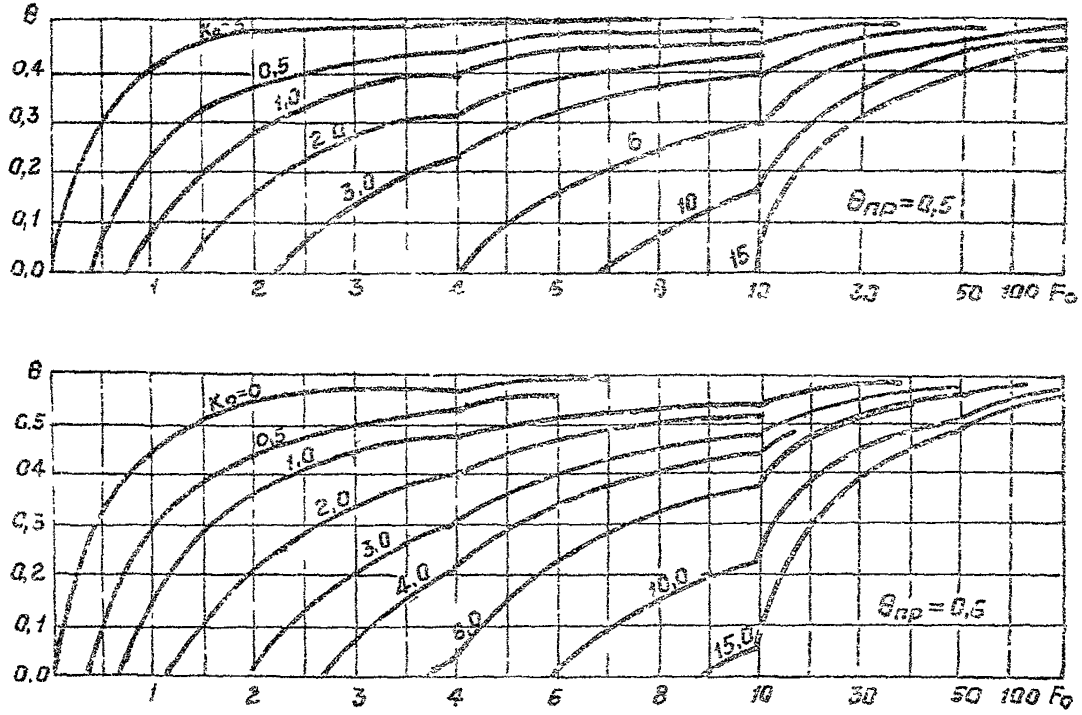


Рис. II Нестационарные температурные поля под центрами источников в форме полосы, прямоугольника, круга, их заглубленных аналогов а также - горизонтальной трубы в грунте при $\theta_{пр}$= 0,5 и $\theta_{пр}$= 0,5

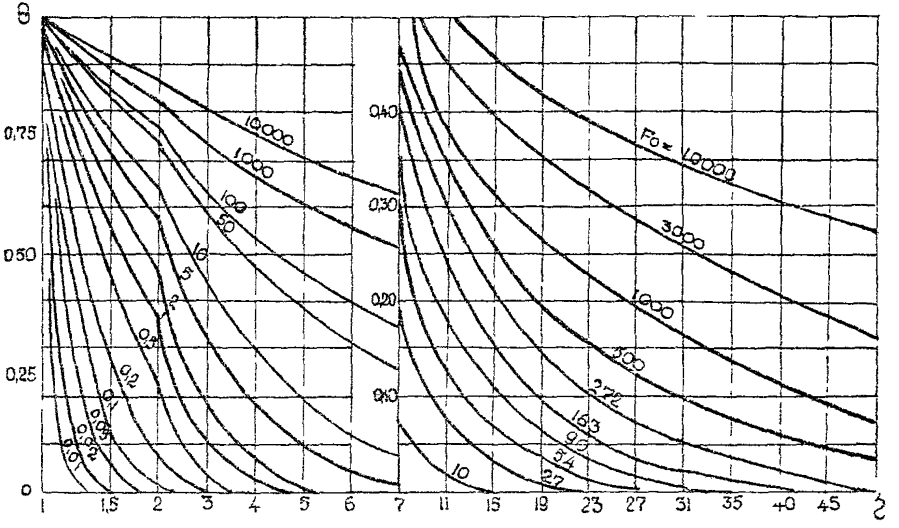


Рис. I2 Нестационарные температурные поля источника в форме бесконечного цилиндра ($K_0 = 0$).

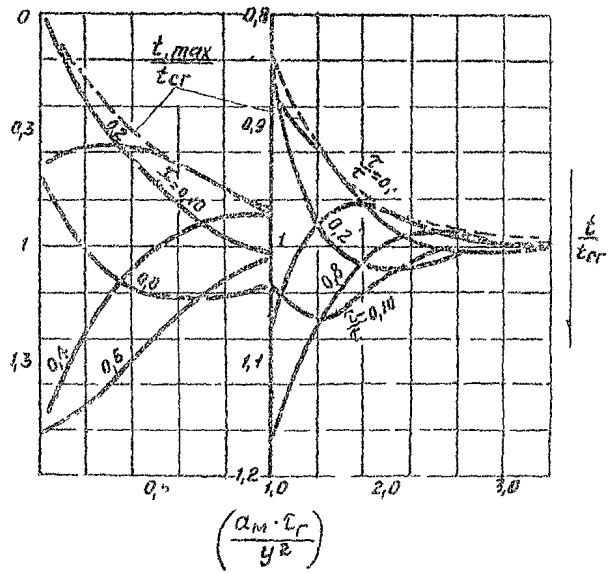


Рис. 13 Графики для определения температур вечномерзлого грунта на любой отрезок времени года (пунктиром показаны графики для определения экстремальных температур).

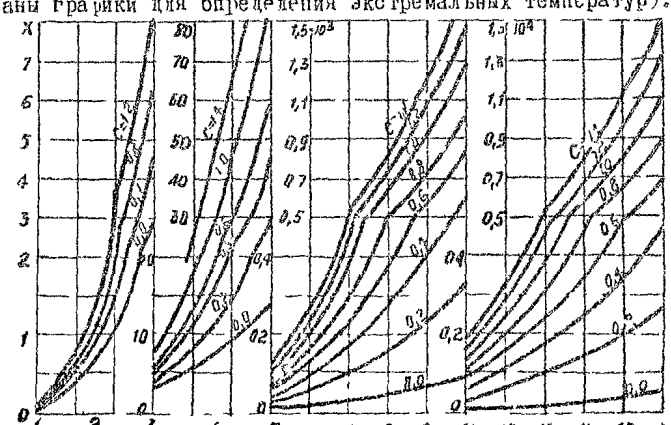


Рис. 14 Графики для определения k в зависимости от Б

расположенных глубже 10 м, в плоскостях, отстоящих от торцов более чем на $4\tau_0$ в сторону середины цилиндра, при определении θ допускается использовать решение для бесконечного цилиндра (рис.12).

3.4. Расчет температурных полей, формируемых несколькими источниками, а также источниками сложной формы, осуществляется по формуле (5), только вместо предельных относительных температур $\theta_{пр}(1)$, $\theta_{пр}(2)$ ... $\theta_{пр}(n)$ подставляются нестационарные температуры θ_1, θ_2, ... θ_n, найденные согласно п. 3.2

3.5. До глубины около 10 м температуры грунта испытывают сезонные колебания. Расчет температур однородного (талого или мерзлого) грунта в годовом цикле колебаний в естественных условиях, а также под зданиями и наземными сооружениями, основания которых охлаждаются атмосферным воздухом, либо подземными сооружениями, расположенными выше отметки 10 м, производится с помощью графика на рис. 13, при этом в случае расчета температур под зданиями и сооружениями вместо t_{cr} - подставляется значение $t_{пр}$, вычисленное согласно п.п. 2.2.-2.5.

Учет сезонных колебаний при расчете температурных полей грунта, возбуждаемых тепловыми источниками в форме вертикального цилиндра конечной длины (в том числе - автономными холодильными устройствами), осуществляется путем прибавления к температуре вычисленной по формуле (1), величины Δt

$$\Delta t = (t_{cr} - t_{max}) \cdot \frac{\tau - \tau_0}{3} \qquad (10)$$

здесь: $(\tau - \tau_0)$ - время работы теплового источника, час.

3.6. Нестационарные температурные поля в полупространстве при фазовых переходах влаги рассчитываются по формулам:

$$t_1 = t_п \cdot \left(1 - \frac{1-\theta_{1y}}{1-\theta_{1\xi}}\right) \qquad (11)$$

$$t_2 = t_0 \cdot \left(1 - \frac{\theta_{2y}}{\theta_{2\xi}}\right) \qquad (12)$$

Θ_{1y}, Θ_{2y} и $\Theta_{1\xi}, \Theta_{2\xi}$ в формулах (11) - (12) определяются согласно п.п. 3.1 - 3.3 при соответствующих значениях теплофизических констант. В выражение F_0 при вычислении Θ_y подставляется заданная глубина, а при вычислении Θ_ξ - глубина промерзания, если рассчитываются температуры промерзающего грунта, или оттаивания, если рассчитываются температуры оттаивающего грунта.

3.7. Глубина промерзания (оттаивания) под сооружениями различной формы определяется с помощью графиков на рис. 7-11 (а более точно, с помощью формулы в приложении 1).

Радиус промерзания (оттаивания) для источника в форме бесконечного цилиндра определяется в такой последовательности:

из соотношений (13) находятся параметры K и F

$$K = \frac{t_0(1-\Theta)}{K_0}, \qquad b = \frac{t_0 \lambda_2}{4 t_{n1} \lambda_1} \qquad (13)$$

- по графикам на рис.14 определяются значения $\eta = \frac{\xi}{r_0}$ и затем ξ.

В выражение для Θ при определении глубины или радиуса промерзания (оттаивания) вместо t_τ подставляется температура начала замерзания грунтовой влаги $t_{из}$, для песчаных грунтов, а в первом приближении также и для глинистых, принимаемая равной нулю. Более точно величина $t_{из}$ определяется по методике, изложенной в приложении IУ.

3.8. Учет термической изоляции между тепловым источником и грунтом во всех задачах нестационарной теплопроводности осуществляется приближенно, согласно п. 2.10.

4. ТЕМПЕРАТУРА ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

4.1. При решении тепловых задач, связанных со строительным проектированием, обычно встречаются два типа ограничивающей поверхности - плоская и цилиндрическая.

4.2. Плоскую ограничивающую поверхность имеют крупные инженерные сооружения (жилые и общественные здания, склады, холодильники и т.д.), а также различного рода и назначения участки естес-

твенной поверхности с измененными условиями теплообмена (защищенные от прямой солнечной радиации, с уплотненным снежным покровом и т.п.).

4.3. Температуры ограничивающих поверхностей для инженерных сооружений (температура у поверхности пола для зданий с полами на грунте, либо у поверхности подвала или подполья) определяются по указаниям соответствующих глав СНиП или специальных методик и рекомендаций.

4.4. Температура поверхности участков естественной поверхности рассчитывается по формулам:

- среднегодовая температура

$$t_п = t_в + \frac{B - LE}{\alpha_к} + 0{,}07 A_м \sqrt{R_{с.н}} \qquad (14)$$

- температура у поверхности грунта в теплый период года (с положительными температурами воздуха)

$$t_п = t_в + \frac{B - LE}{\alpha_к} \qquad (15)$$

- температура у поверхности грунта в холодный период года принимается равной температуре воздуха.

В правые части формул (14) и (15) подставляются значения входящих величин соответственно средних за год и средних за искомый период (но не менее, чем за декаду).

4.5. Цилиндрической ограничивающей поверхностью обладают различного рода инженерные сети, трубопроводы, а также охлаждающие или нагревающие устройства.

4.6. Температура цилиндрической поверхности вычисляется по формуле

$$t_п = t_с + \Theta'(t_{ср} - t_с) \qquad (16)$$

где, кроме известных обозначений

$t_{ср}$ - средняя температура тепло- или хладоносителя в трубе, величина которой должна быть известна из условий задачи,

Θ' - относительная температура, определяемая по табл.9 в зависимости от критерия $B_i = \frac{\alpha \cdot r_с}{\lambda}$.

Таблица 3

Зависимость Θ' от B_i

B_i	0	0,3	0,6	1	2	4	12	
Θ'	0	0,4	0,6	0,7	0,83	0,91	0,97	1

Величина α в выражении для B_i находится из выражений:

- для круглой трубы

$$\frac{\alpha \cdot 2r_0}{\lambda_x} = Nu = 0{,}023\, Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \qquad (17)$$

(λ_x - коэффициент теплопроводности хладоносителя)

- для круглой щели между двумя коаксиально расположенными трубами

$$Nu_x = 0{,}015\, Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \left(d_2/d_1\right)^{0,25} \qquad (18)$$

Физические константы некоторых хладоносителей приведены в приложении П.

5. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

5.1. Влияние климата на температуру грунта опосредовано температурой ограничивающей поверхности. Входящие в формулу (14) величины отражают влияние основных климатических показателей - температуры воздуха и амплитуды ее колебаний, радиационного баланса, затрат тепла на испарение и конвективный (турбулентный) теплообмен, термического сопротивления снежного покрова на температурный режим грунта.

5.2. Температура воздуха и амплитуда ее колебаний устанавливаются по климатическим справочникам и ежегодникам. Среднегодовые температуры воздуха и грунта (левая часть формулы (14) показаны на схематической карте рис.15.

5.3. Радиационный баланс за месяц вычисляется по формуле

$$B = \Theta_c (0{,}9 - 0{,}7A)^2 - 0{,}7 \text{ ккал/см}^2\text{мес.} \qquad (19)$$

Суммарная солнечная радиация определяется из выражения

$$Q_c = Q_0\left[1-(1-K_c)\cdot n_{об}\right] \qquad (20)$$

где K_c – коэффициент, показывающий какая доля солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу облаков, доходит до поверхности земли.

Величины Q_0 и K_c находятся по табл. 4 и 5, а величина альбедо – по справочному материалу или приложению Ш.

5.4. Прямая солнечная радиация рассчитывается по формуле

$$S = \frac{0{,}9\,Q_c}{n_{об}-\sqrt{0{,}1\cdot n_{об}}} \qquad (21)$$

5.5. Месячные суммы затрат тепла на испарение (ккал/см^2 мес) в естественных условиях определяются из выражения

$$\angle E = 1{,}8\,E, \qquad (22)$$

где E – интенсивность испарения, мм/сут., устанавливаемая с помощью рис.16.

Таблица 4

Среднеширотные значения суммарной солнечной радиации при безоблачном небе Q_0 ккал/см^2 мес.

широта \ мес.	I	II	III	IУ	У	У1	УП	УШ	IX	X	XI	XII
80°	0,0	0,0	2,5	9,6	17,9	20,3	18,9	10,8	3,6	0,4	0,0	0,0
75°	0,1	0,6	4,0	11,2	18,7	20,9	19,7	12,3	5,3	1,7	0,2	0,0
70°	0,2	1,4	5,8	12,7	19,4	21,4	20,3	13,7	7,0	3,0	0,7	0,1
65°	0,8	2,5	7,6	14,1	20,1	21,9	21,0	15,1	8,8	4,5	1,5	0,4
60°	1,7	3,9	9,6	15,4	20,8	22,3	21,6	16,4	10,5	6,1	2,6	1,2
55°	3,0	5,6	11,5	16,6	21,5	22,7	22,7	17,7	12,2	7,7	4,1	2,3

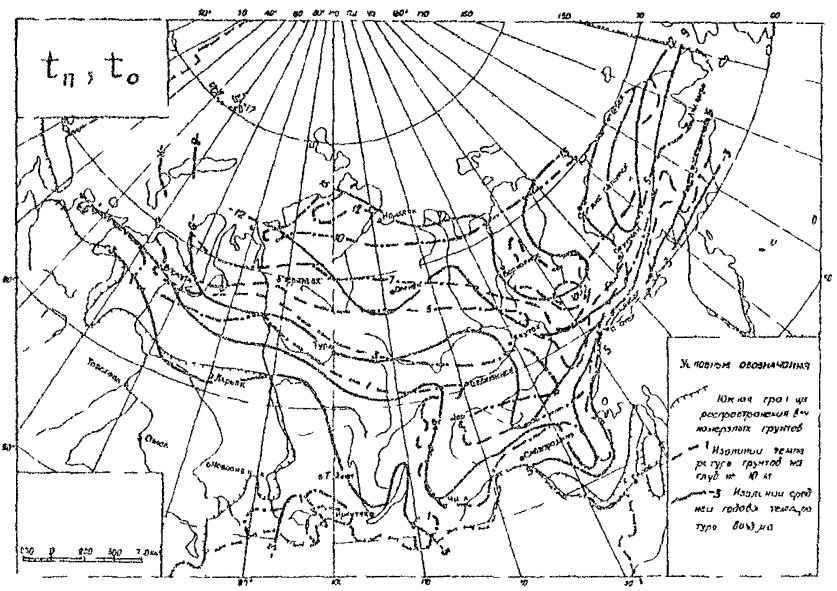


Рис. 15 Изолинии температур t_{17} и t_o на территории распространения вечномерзлых грунтов.

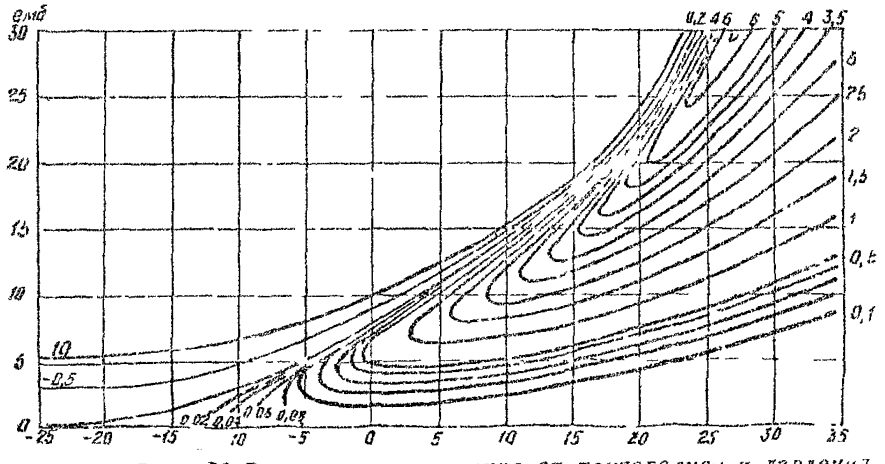


Рис. 16 Зависимость испарения от температуры и давления воздуха (e, мб).

Таблица 5

Среднеширотные значения K_c

широта места	75^0	70^0	65^0	60^0	55^0
K_c	0,55	0,50	0,45	0,40	0,38

На участках с поверхностью, экранированной от прямого солнечного облучения, месячные затраты тепла на испарение вычисляются по формуле:

$$LE_{эк} = 1{,}8E\sqrt{\frac{D\cdot(Q_c+\Gamma)}{Q_c(D+\Gamma)}} \qquad (23)$$

где $\Gamma = P^2/30(t_в+2)^2/256$

$t_в$ – среднемесячная температура воздуха

Q_c и D – суммарная и рассеянная солнечная радиации, ккал/см^2 мес.

5.6. Для перевода месячных сумм солнечной радиации и затрат тепла на испарение с размерностями ккал/см^2 мес. в систему размерностей ккал/м^2 час, принятую в технике, результаты, полученные в соответствии с п.п. 5.3 – 5.5, умножаются на коэффициент 1,99.

5.7. Среднегодовые (сг) и среднемесячные (см) значения $\alpha_к$ $\frac{\text{ккал}}{\text{м час град}}$ вычисляются по формулам

$$\alpha_{к(сг)} = 4 + 1{,}9\sqrt{V_в} \qquad (24)$$

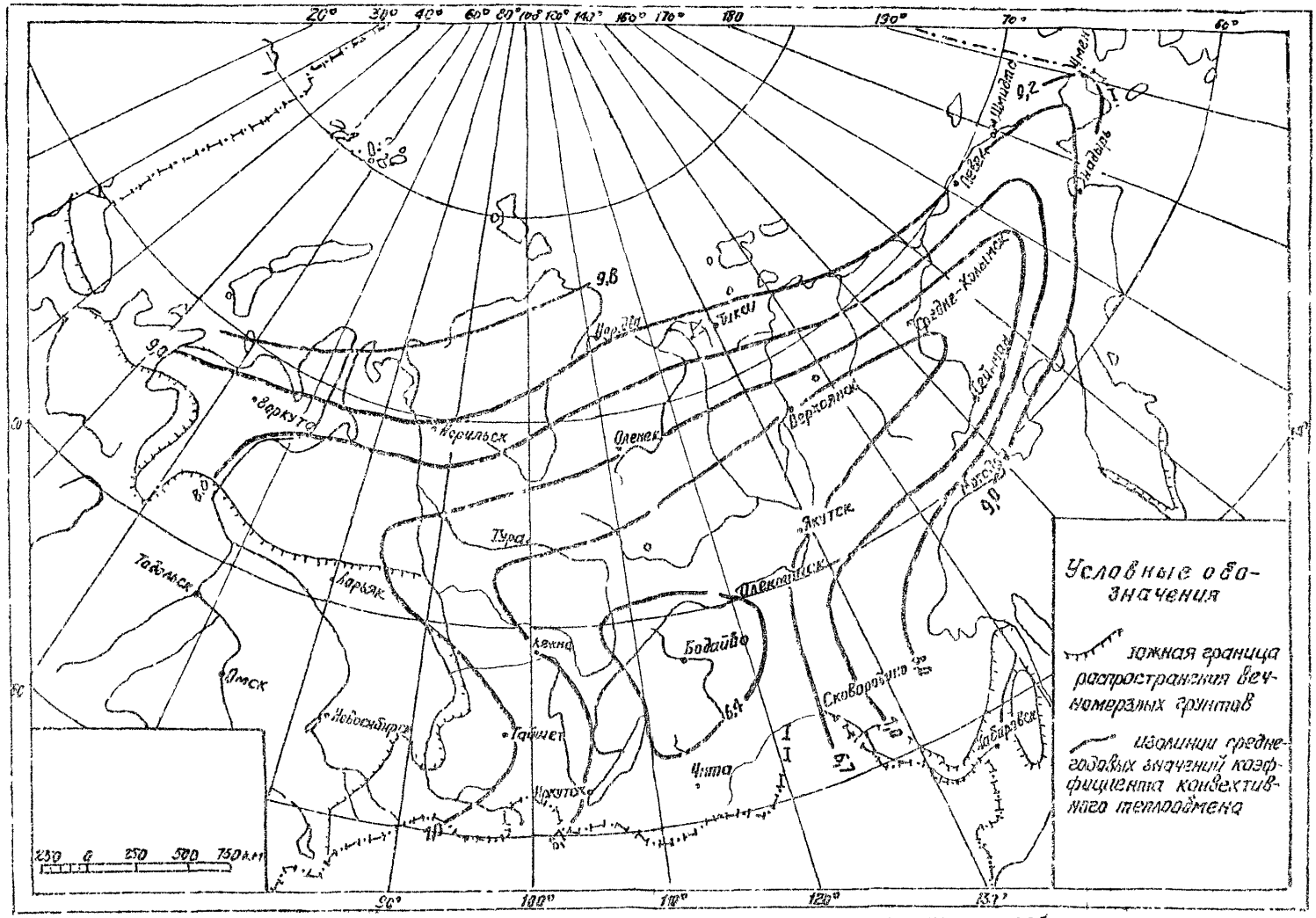
$$\alpha_{к(см)} = 1{,}1 + 5{,}3\sqrt{V_в} \qquad (25)$$

Вычисленные по формуле (24) среднегодовые величины $\alpha_к$ показаны на схематической карте (рис.17).

5.8. Термическое сопротивление снежного покрова $\frac{\text{м}^2 \text{ час град}}{\text{ккал}}$ рассчитывается с помощью соотношений

$$R_{сн} = h_{сн}/\lambda_{сн} \qquad (26)$$

$$\lambda_{сн} = 0{,}87\sqrt{\gamma_{сн}} + 0{,}018 \qquad (27)$$


Условные обозначения
южная граница распространения вечномерзлых грунтов
изолинии среднегодовых значений коэффициента конвективного теплообмена
Якутск
Чита
Иркутск
Тайшет
Новосибирск
Омск
Тобольск
Красноярск
Норильск
Верхоянск
Оленек
Тура
Хатанга
Тикси
Певек
Усть-Нера
Среднеколымск
Зырянка
Усть-Среднекан
Усть-Мая
Усть-Куйга
Усть-Нюкжа
Усть-Ыам
Усть-Ыам
Усть-Ыам

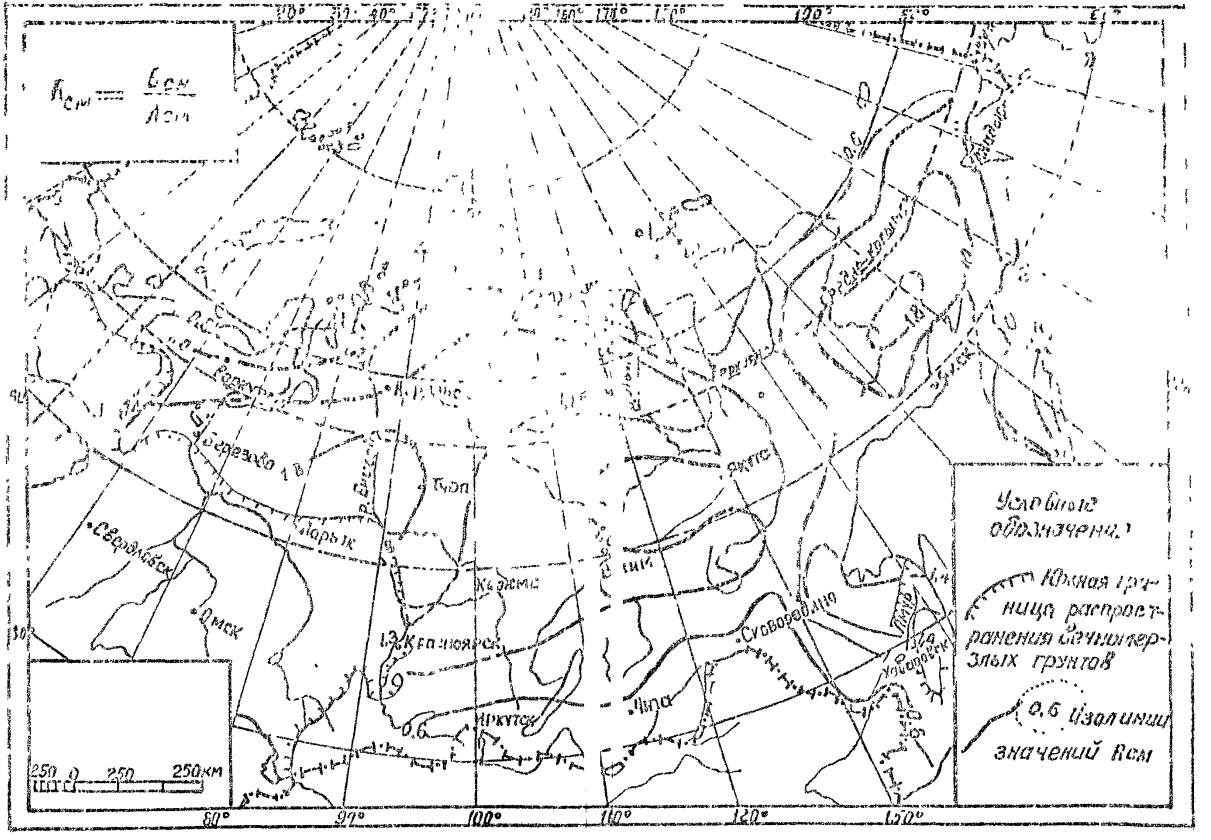


Рис.18 Изолинии значений K_{CH} на территории с вечномерзлыми грунтами

Сетевые метеостанции дают величину максимальной за декаду высоты снежного покрова. Переход от максимальных декадных высот к среднемесячным осуществляется с помощью выражения

$$h_{CH} = 0{,}25(h_0 + h_1 + h_2 + 0{,}5\,h_3) \qquad (28)$$

где h_0 – максимальная высота снежного покрова за предшествующую декаду ($h_0 = 0$, если определяется высота снежного покрова за первый зимний месяц),

h_1, h_2, h_3 – соответственно максимальные высоты снежного покрова за первую, вторую и третью декады месяца.

На рис. 18,19 представлены схематические карты распределения величин R_{CH} рассчитанных по формулам (26)–(27) и $\Delta t_{CH} = A_N \sqrt{R_{CH}}$ в области с вечномерзлыми грунтами.

6. ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

6.1. Теплофизические свойства грунтов характеризуются коэффициентами тепло- и температуропроводности (и), а также удельной C_y или объемной C теплоемкостью. Эти величины связаны между собой соотношениями:

$$a = \lambda / C \;, \quad C = C_y \cdot \gamma \qquad (29)$$

6.2. Коэффициенты теплопроводности талого и полностью промерзшего грунта определяются по формуле

$$\lambda = \lambda^{min} + (\lambda^{max} - \lambda^{min}) G^{\varphi} = \lambda^{min} + (\lambda^{max} - \lambda^{min})\, e^{\varphi \ln G} \qquad (30)$$

где λ^{min}, λ^{max} – коэффициенты теплопроводности при $G = 0$ и $G = 1$, а φ – безразмерный коэффициент, определяемые по табл. 7 в зависимости от параметра $\eta = W_H / \sqrt[4]{|t|}$

Удельная теплоемкость талого грунта C_{yT} рассчитывается по формуле

$$C_{yT} = \frac{\gamma_{CK}}{\gamma}\left[C_{yc}^{min} \cdot (1-q) + C_{yc}^{or} \cdot q + C_{y\ell}\, W_c\right] \qquad (31)$$

Удельные теплоемкости компонентов грунтового комплекса, входящие в уравнения для теплоемкости грунта, определяются по табл.6

Коэффициент теплопроводности $\lambda'_м$ и удельная теплоемкость промерзающего (оттаивающего) грунта $C_{ум}$ рассчитываются по формулам:

$$\lambda'_м = \lambda_г \left[1 + (\lambda_м/\lambda_т - 1)\cdot(1 - W_н/W_с)\right] \qquad (32)$$

$$C_{ум} = \frac{\gamma_{ск}}{\gamma}\left[C^{мин}_{ус}(1-q) + C^{ср}_{ус}\cdot q + C_{уд}\cdot W_с - W_н(C_{уд} - C_{ув}) - \frac{dW_н}{dt}\cdot P\right] \qquad (33)$$

Влажность за счет незамерзшей воды и производная этой величины от температуры зависят от температуры (см. приложение IУ), но поскольку в уравнения для температурных полей они входят в виде констант, приходится идти на упрощение - брать в расчет средние значения $W_н$ и $\frac{dW_н}{dt}$ в температурном интервале значительных фазовых превращений. Среднее значение $\frac{dW_н}{dt}$ в этом интервале для всех грунтов составляет минус 0,03 град.

Средние значения $W_н$ принимаются по табл.6.

Методика определения содержания незамерзшей воды в грунтах, в том числе засоленных, как функции от температуры, приведена в приложении IУ.

6.4. Степень заторфованности грунтов и полная влагоемкость $W_п$ в выражении для степени водонасыщения рассчитываются по формулам:

$$g = \frac{A}{\gamma_{узг}} - B \qquad (34)$$

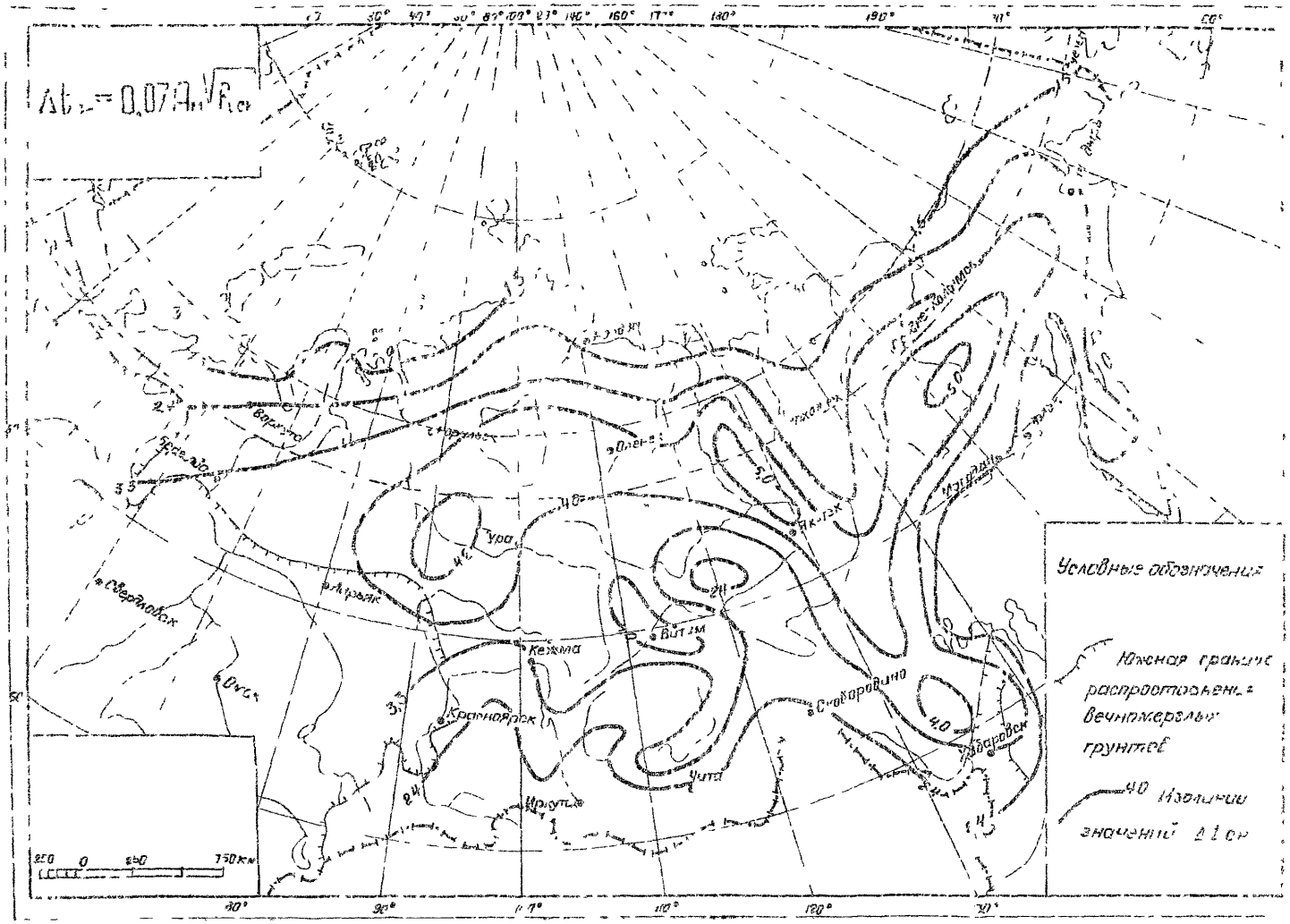
$$W_п = \frac{[\gamma_у(1 - W_с) - \gamma]\cdot\gamma_в}{\gamma\,\gamma_у} \qquad (35)$$

где $A\left(\frac{м^3}{кг}\right)$ и B (безразмерный) - параметры, зависящие от состава минеральной части заторфованного грунта, принимаемые соответственно равными 3460 и 1,3 - для песчаных заторфованных грунтов, 3260 и 1,9 - для глинистых заторфованных грунтов.

Удельные веса составляющих грунтового комплекса приведены в табл.6.

6.5. Эквивалентный коэффициент теплопроводности хладоносителя в автономных охлаждающих устройствах (термосваях) вычисляется по формуле

$$\lambda_э = 30\lambda_ц\left(j + 0{,}4\right)\varphi\sqrt{P_г}\cdot 10^{-5} \qquad (36)$$


Условные обозначения
Южная граница распространения вечномерзлых грунтов
40 Изолинии значений Δl
Красноярск
Чита
Иркутск
Якутск
Оленек
Кемма
Витим
Свободный
Тында
Зея-Халимск
Мирный
Усть-Вилюйск
Верхоянск
Среднеколымск
Среднеколымск
Оймякон
Усть-Мая
Усть-Алдан
Аллах-Юнь
Усть-Нера
Усть-Куйга
Усть-Мая
Усть-Нера
Усть-Куйга
Усть-Алдан
Аллах-Юнь
Усть-Вилюйск
Среднеколымск
Оймякон
Верхоянск
Среднеколымск
Зея-Халимск
Мирный
Тында
Свободный
Витим
Кемма
Чита
Иркутск
Красноярск
Якутск
Оленек

здесь, кроме известных обозначений

$$\varphi = \frac{C_y(t_в - t_р)\cdot 2(z_0 + h_{тер})}{g \cdot A_p \cdot z_0 \cdot h_{тер}}$$

C_y, λ_y - удельная теплоемкость хладоносителя, ккал/кг град и его истинная теплопроводность, ккал/м час град.

$g = 9,8$ м/сек^2 - ускорение силы тяжести,

$A_p = \frac{I}{427}$ ккал/кг м - тепловой эквивалент работы,

δ - отношение надземной части термосвай к подземной.

Таблица 6

Удельные веса (кг/м^3), теплоёмкости (ккал/кг град), а также средние значения влажности за счет незамерзшей воды и параметра Π (град^{0,25}) для типичных (незасоленных) грунтов (компонентов грунта)

Наименование грунта (компонента	γ_y	C_y	$W_н$	Π
Пески	2660	0,I7	0	0
Супеси	2700	0,I8	0,07	0,05
Суглинки	27I0	0,I9	0,I0	0,I0
Илы	2200-2260	0,20	0,08	0,07
Глины	2700	0,22	0,I5	0,I7
Торфы	I520	0,38	I,I	I,6
Вода	I000	I,0	-	-
Лед	920	0,5	-	-

Таблица 7

Значения λ^{min}, λ^{max} (ккал/м час град) и φ в зависимости от параметра Π

0,03	0,06	0,II	0,2I	0,33	0,5I	0,96	I,56
0,29	0,26	0,23	0,20	0,06	0,II	0,08	0,07
2,2	I,8	I,55	I,25	I,2	I,0	0,3	0,75
2,7	2,4	2,2	I,85	I,7	I,4	I,I	I,0
0,8	0,98	I,I5	I,25	I,35	I,5	I,65	I,8

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Формулы для расчетов температурных полей

а) стационарные (предельные) температурные поля под поверхностными источниками в форме:

1) бесконечной полосы -

$$\Theta_{пр} = \frac{1}{\pi}\left(arc\,tg\,\frac{0{,}5B - x}{y} + arc\,tg\,\frac{0{,}5B + x}{y}\right)$$

2) прямоугольника -

$$\Theta_{пр} = \frac{1}{\pi}\left[arc\,tg\,\frac{(0{,}5B - x)(0{,}5L - z)}{y\sqrt{y^2 + (0{,}5B - x)^2 + (0{,}5L - z)^2}} + \right.$$

$$+ arc\,tg\,\frac{(0{,}5B + x)(0{,}5L + z)}{y\sqrt{y^2 + (0{,}5B + x)^2 + (0{,}5L + z)^2}} + arc\,tg\,\frac{(0{,}5B - x)(0{,}5L + z)}{y\sqrt{y^2 + (0{,}5B - x)^2 + (0{,}5L + z)^2}} +$$

$$\left. + arc\,tg\,\frac{(0{,}5B + x)(0{,}5L - z)}{y\sqrt{y^2 + (0{,}5B + x)^2 + (0{,}5L - z)^2}}\right]$$

3) круга

$$\Theta_{пр} = \left\{1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + (z + z_0)^2}}\left[\frac{\sqrt{y^2 + z^2} - z_0}{\sqrt{y^2 + z^2 + 2z_0}} \cdot \Pi\left(\frac{\pi}{2}, n, K\right) + \frac{\sqrt{y^2 + z^2} + z_0}{\sqrt{y^2 + z^2} - z_0} \cdot \right.\right.$$

$$\left.\left. \Pi\left(\frac{\pi}{2}, n_2, K\right)\right]\right\}$$

где $n_1 = -\frac{2z}{\sqrt{z^2 + y^2 + z_0}}$; $n_2 = \frac{2z}{\sqrt{z^2 + y^2 - z_0}}$; $K^2 = \frac{4z_0}{y^2 + (z + z_0)}$

$\Pi\left(\frac{\pi}{2}, n, K\right)$ - полный эллиптический интеграл третьего рода (табулированная функция).

Для центра круга ($\beta = 2\pi$, $z = 0$) это уравнение значительно упрощается -

$$\Theta_{пр} = \left(1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + z_0^2}}\right)$$

4) горизонтальной трубы в грунте

$$\Theta_{тр} = \frac{\ln\frac{x^2 + (y + h_{тр})^2}{x^2 + (y - h_{тр})^2}}{2\ln\left[\frac{h_{тр}}{z_{тр}} + \sqrt{\left(\frac{h_{тр}}{z_{тр}}\right)^2 - 1}\right]}$$

б) нестационарные температурные поля грунта под центрами сооружений любой формы при отсутствии фазовых переходов -

$$\Theta = arfc\,\frac{y}{2\sqrt{a\tau}} - \left(1 - \Theta_{пр}\right) erfc\,\frac{y}{2\sqrt{a\tau}\,(1 - \Theta_{пр})}$$

в) то же, при наличии фазовых переходов -

б) уравнение связи времени и глубины промерзания оттаивания) под центром сооружений

$$\Theta = \frac{t_{нз} - t_0}{t_п - t_0} = \frac{\psi - \sqrt{\pi} \cdot K_0 / 2 Fo}{\psi - \delta},$$

где:

$$\psi = \frac{\sigma}{erfc \frac{1}{R\sqrt{Fo}} + (1 - \Theta_{пр})\, erfc \frac{1}{2\sqrt{Fo}\cdot(1-\Theta_{пр})}}$$

$$\delta = \frac{\sigma' \cdot K_э}{erfc \frac{1}{2\sqrt{Fo}\cdot K_a} - (1-\Theta_{пр})\, erfc \frac{1}{2\sqrt{Fo}\,(1-\Theta_{пр})\cdot\sqrt{K_a}}}$$

$$\sigma' = \exp\left(-\frac{1}{4Fo}\right) - (1-\Theta_{пр})^2 \exp\left[-\frac{1}{4Fo\,(1-\Theta_{пр})^2}\right] +$$

$$+ \sqrt{\pi Fo}\,(1-\Theta_{пр})\left[1-(1-\Theta_{пр})^2\right] erfc \frac{1}{2\sqrt{Fo}\,(1-\Theta_{пр})}; \quad Fo = \frac{a_1 \tau}{R^2},$$

$$K_0 = \frac{P \cdot W_c \cdot \gamma_{ек}}{c_1 (t_п - t_0)}; \quad K_a = a_2 / a_1, \quad K_э = \sqrt{\frac{\lambda_2 c_2}{\lambda_1 c_1}}$$

В выражение σ' в отличие от σ величина Fo входит с множителем K_a.

Примечание: В формулах (5 и 6) глубина отсчитывается от низа сооружения, а его форма учитывается через величину $\Theta_{пр}$

П. Физические и теплофизические свойства некоторых хладоносителей

Таблица 8.

Хладоносители	Температура замерзания, °С	Плотность кг/м³	Вязкость м²/час	Удельная теплоемкость, ккал/кг град.	Коэффициент теплопроводности, ккал/м час град
Воздух		1,453	0,039	0,242	0,019
Дихлорметан (метиленхлорид или фреон - 30)	-95	1370	0,019	0,265	0,141
Хлористый кальций (30-процентный раствор)	-55	1286	0,059	0,636	0,371
Энтиленгликоль (50-процентный раствор)	-37	1150	0,058	0,77	0,37
Керосин	-30	820	0,032	0,487	0,129

ПРИМЕЧАНИЕ: В таблице 8 приведены средние значения в интервале температур от -10°С до -50°С.

Ш. Значения альбедо (%) некоторых поверхностей

Тип поверхности	альбедо
Снег свежевыпавший	90
Снег плотный, слежавшийся, сухой	60
Снег загрязненный	28
Трава зеленая	21
Трава в период увядания	28
Песок сухой, желтый	35
Песок сухой, серый	21
Песок сухой, коричневый	19
Чернозем сухой	12
Глина синяя	23
Тундра	15-20
Болота	12-18
Галечник светложелтый	21
Галечник подчерненный	10
Оголенный грунт, забеленный известью	30-50
Оголенный грунт, зачерненный угольной пылью	8-9
Мостовая, панель (плитками)	17
Асфальтовое покрытие	10-20
Щебеночное покрытие	18
Бетон светложелтый	27
Бетон светлосерый	23
Дерево, окрашенное светлой краской	40
Цемент	27
Битумная пленка, свеженанесенная	9
Битумная пленка после годичной эксплуатации	15

IУ. Определение содержания незамерзшей воды в мерзлом грунте в зависимости от температуры

Содержание незамерзшей воды в грунте (отношение веса незамерзшей воды к весу сухого грунта) определяется по формуле

$$W_н = W_п \cdot T^{-0,35} = W_п \cdot e^{-0,35 \ln T} \qquad (*)$$

где $T = \frac{t}{t_{нз}}$

t - температура грунта,

$t_{нз}$ - температура начала замерзания свободной воды в грунте, определяемая по формуле:

$$t_{нз} = t_э \cdot \left(\frac{P}{P_э}\right)^{1,15} = t_э \cdot e^{1,15(\ln P - \ln P_э)} \qquad (**)$$

где P - концентрация солей в грунтовой (поровой) влаге,

$P_э$ и $t_э$ - эвтектические значения концентрации и температуры, определяемые по табл.9.

Таблица 9

Формула солей	$P_э$ (%)	$t_э$ °C
$NaCl$	22,4	-21,2
KCl	20,6	-6,6
$CaCl_2$	29,9	-55,0
$MgCl_2$	21,6	-33,6
$NaNO_3$	3,8	-18,5
Na_2CO_3	6,25	-2,33
$MgSO_4$	19,0	-3,9

Производная величины $W_н$ по температуре, которая входит в формулу для расчета эффективной теплоемкости, равна

$$\frac{dW_н}{dt} = -0,35 \frac{W_п}{t} \left(T\right)^{-0,35} \qquad (***)$$

У. Примеры расчета

а) к разделу 2

I. Определить стационарную температуру грунта под длинным холодильником в форме заглубленного бруса при следующих исходных данных: $t_п = -5$, $t_0 = -1$, $x = 3$ м, $y = 4$ м, $h = 6$ м, $b = 12$ м (помнить, что начало системы координат в левом углу заглубления).

Находим безразмерные переменные

$$\Gamma = \frac{3}{6} = 0,5; \quad H = \frac{4}{6} = 0,67; \quad 0,5B/h = 1$$

С помощью рис.3 по найденным значениям Г, Н определяем значения

$$\zeta = 3,8; \quad \zeta_B = 5,7; \quad \nu = 2,5$$

В формулу(1) приложения 1 вместо x подставляем $1 + \zeta = 4,8$ вместо $0,5b$ $1 + \zeta_B = 6,7$, вместо y $\nu = 2,5$ тогда имеем

$$\Theta_{пр} = \frac{1}{3,14}\left(arctg\frac{13,4-4,8}{2,5} + arctg\frac{4,8}{2,5}\right) = 0,76$$

По формуле (2) основного текста вычисляем $t_{пр}$

$$t_{пр} = -1 + 0,76\ (-4) + 10 \cdot 0,03 = -3,74$$

2. Определить стационарную температуру в системе „грунт - термосвая при следующих исходных данных: $h_п = 4$ м, $r_0 = 0,1$ м, $y = 1$ м, $z = 0,5$ м, $t_B = -21$, $t_0 = -1$, $\Theta = 86$.

Определяем безразмерные переменные

$$\mu = 40; \quad \eta = 5, \quad H = 0,25.$$

По графику на рис.4 находим искомую предельную температуру $\Theta_{пр} = 0,12$.

По формуле (2) вычисляем

$$t_{пр} = -1 + 0,12\ (-20) + 1 \cdot 0,03 = -3,37$$

б) к разделу 3.

3. Определить нестационарную температуру грунта при исходных данных примера 1 и $a_м = 0,004$ $\frac{м^2}{час}$, $\tau = 1200$ час.

По графику на рис.1 определяем относительную глубину, на которой $\Theta_{пр} = 0,76$ наблюдается под центром источника на вспомогательной плоскости с координатами ζ и ν.

$$\frac{\nu}{1 + \zeta_B} = 0,35$$

С учетом того, что $\zeta_B = 5,7$ (см. пример 1), величина ν равна $6,7 \cdot 0,35 = 2,35$.

С помощью рис.3 переводим величину $\nu = 2{,}35$ (при $\zeta\beta = 5{,}7$) в $y_ц$; $\frac{y_ц}{h} = 0{,}67$, $y_ц = 4$.

Определяем Fo:

$$Fo = \frac{0{,}004 \cdot 1200}{16} = 0{,}3$$

По графику на рис.9 при $Ko = 0$, $\Theta_{пр} = 0{,}76 \approx 0{,}8$ и $Fo = 0{,}3$ находим: $\Theta = 0{,}23$.

По формуле (9) вычисляем $t\tau$:

$$t\tau = -1 + 0{,}23\ (-4) + 10 \cdot 0{,}03 = -1{,}62$$

4. Определить время, за которое нулевая изотерма достигнет глубины $y = 4$ м под центром здания ($\beta = 12$ м, $L = 19$ м) с холодным подпольем ($t_г = -3{,}5$); необходимые для расчета исходные характеристики грунта: $t_0 = +0{,}5$; $a_м = 0{,}004$ м2/час; $W_c = 0{,}1$; $\gamma_{ск} = 1600$ кг/м^3; $C_м = 400$ ккал/м^{3}град.

С помощью графика на рис.1 в зависимости от $y/0{,}5\beta = 0{,}67$ находим величину $\Theta_{пр}$: $\Theta_{пр} = 0{,}6$.

Вычисляем $Ko = \frac{80 \cdot 0{,}1 \cdot 1600}{400 \cdot 4} = 8$ и $\Theta = \frac{0 - 0{,}5}{-3{,}5 - 0{,}5} = 0{,}125$.

По графику на рис.11 находим $Po = 6$, откуда

$$\tau = \frac{6 \cdot 16}{0{,}004} = 24000 \text{ час} \approx 2{,}7 \text{ года}$$

в) к разделу 4.

5. Определить температуру поверхности скважины ($d_2 = 0{,}4$), охлаждаемой холодным воздухом через трубу меньшего диаметра ($d_1 = 0{,}1$ м), коаксиально расположенную в скважине; $\lambda_м = 1$ ккал/м час град.

$$V = 5 \text{ м/сек}, \quad t_{ср} = -10, \quad t_0 = -1.$$

Из формулы (18), подставив в нее указанные значения V, d_2 и d_1, а также значения ν и a для воздуха, по приложению II находим величину коэффициента теплоотдачи: $\alpha = 13{,}5$ ккал/м2 час град.

Вычисляем критерий Био: $Bi = \frac{13{,}5 \cdot 0{,}2}{1} = 2{,}6$

По табл. 3 находим значение $\Theta' : \Theta'_1 = 0{,}86$

По формуле (16) вычисляем температуру поверхности скважины

$$t_{п} = -1 + 0{,}86\ (-10 + 1) = -8{,}7$$

г) к разделу 5.

6. Определить величину радиационного баланса бетонного (светлосерого) покрытия за июль на 70^{0} широте при общей облачности $n_{об} = 0{,}6$.

По таблицам 4 и 5 определяем Q_{0} и K_{c}, а по приложению А: $Q_{0} = 20{,}3$ ккал/см2·мес; $K_{c} = 0{,}5$; $A = 0{,}23$.

По формуле (20) вычисляем Q_{c}:

$Q_{c} = 20{,}3\ [1 - 0{,}5 \cdot 0{,}6] = 14{,}2$ ккал/см2 мес.

По формуле (19) находим величину радиационного баланса

$B = 14{,}2\ (0{,}9 - 0{,}16)^{2} - 0{,}7 = 7{,}1$ ккал/см^{2} мес

7. Определить величину $\Delta t_{сн}$ в районе Якутска

По схематической карте (рис. 19) находим $\Delta t_{сн} = 4{,}8$.

д) к разделу 6.

Определить теплофизические характеристики заторфованной глины со следующими характеристиками $W_{c} = 0{,}43$; $\gamma_{уз} = 2{,}320$ кг/м^{3}, $\gamma = 1620$ кг/м^{3}; $t = -2$, $t_{нз} = -0{,}5$.

С помощью формул (34), (35) и по приложению IУ определяем исходные обобщенные характеристики:

$$g = 3260 : 2320 - 1{,}19 = 0{,}21$$

$$G = \frac{0{,}43}{0{,}48} = 0{,}89;$$

По формуле (я) приложения IУ рассчитываем влажность за счет незамерзшей воды: $W_{н} = 0{,}27$

Определяем параметр $\Pi = \frac{W_{н}}{\sqrt{t}} = \frac{0{,}27}{1{,}19} = 0{,}23$ и по табл 6, в зависимости от величины этого параметра, находим $\lambda^{min} = 0{,}19$; $\lambda_{т}^{max} = 1{,}24$; $\lambda_{м}^{max} = 1{,}9$; $\varphi = 1{,}27$.

По формуле (30) вычисляем $\lambda_{т}$ и $\lambda_{м}$

$\lambda_{т} = 1{,}1$ ккал/м час град; $\lambda_{м} = 1{,}6$ ккал/м час град.

По формуле (32) рассчитываем коэффициент теплопроводности при $t = -2$

$\lambda' = 1{,}1\ \ 1 + (1{,}45 - 1)\ (1 - 0{,}63) = 1{,}28$ ккал/м час град.

По формулам (30), (33) с учетом (~~нек~~)табл.6 и выражения для объемного веса скелета грунта $\gamma_{ск} = \frac{\gamma}{1 + Wc}$ определяем эффективную объемную теплоемкость

$$C = 1140 \left[0,22 \cdot 0,79 + 0,38 \cdot 0,21 + 0,5 \cdot 0,43 - 0,27 (-0,5) + 0,02 \cdot 80\right] = 2508 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Пялов С.С. Длительная прочность мерзлых грунтов при переменной нагрузке и температуре. Труды У Всесоюзного совещания-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. Т.2, вып.5. Тюмень, октябрь, 1968. Красноярск, 1968. (Институт "Красноярский промстройниипроект").

2. Lachenbruch A.H. Three-dimensional heat conduction in permafrost beneath heated buildings - Geol. Surv. Bull. N 1052-B, 1957

3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., "Высшая школа", 1967.

4. Коновалов А.А. Метод определения температурных полей промерзающих или оттаивающих оснований зданий и сооружений. В сб.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера, вып. 26. Красноярск, 1973. (Институт "Красноярский промстройниипроект")

5. Порхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. М., "Наука", 1970.

6. Конюшенко А.Г., Коновалов А.А. К расчету стационарных температурных полей заглубленных сооружений. В сб.:Строительство в районах Восточной Сибири и райнего Севера, вып.26, Красноярск, 1973. (Институт "Красноярский промстройниипроект").

7. Иванов Н.С. Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах. М., "Наука", 1969.

8. Пособие по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. М., Стройиздат, 1969.

9. Руководство по расчетным способам определения прочностных деформативных и теплофизических характеристик мерзлых, промерзающих и оттаивающих грунтов. Красноярск, 1972. (Институт "Красноярский промстройниипроект").

IO. Будыко М.И. Тепловой баланс поверхности земли. Гидрометеоиздат. Л., 1956.

II. Константинов А.С. Испарение в природе. Гидрометеоиздат. М., 1963.

I2. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат. Л., - М. 1959.

I3. К расчету температурных полей промерзающих и оттаивающих грунтовых оснований зданий и сооружений. В сб. "Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера", вып. 29, Красноярск, 1974. (Институт "Красноярский промстройниинроект")

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

Введение 3

1. Исходные и искомые величины, их условные обозначения 8

2. Предельные (стационарные) температурные поля грунта 12

3. Нестационарные температурные поля грунта 20

4. Температура ограничивающей поверхности 29

5. Климатические показатели 31

6. Физические и теплофизические характеристики . . . 35

Приложения

1. Формулы для расчетов температурных полей 38

П. Физические и теплофизические свойства некоторых хладоносителей 39

Ш. Значения альбедо (%) некоторых поверхностей . . . 40

1У. Определение содержания незамерзшей воды в мерзлом грунте в зависимости от температуры 40

У. Примеры расчета 41

Литература 45

Практическое руководство
по производству тепловых расчетов оснований
в районах с вечномерзлыми грунтами

Редактор К.В. Богданович
Корректор И.Л. Малыгина
Подписано к печати 22·III-76
АЛ00615 Объем 2,6 уч.-изд.л., 2,75 печ.л.
Формат 60 x 90 1/16
Тираж 500 экз. Цена 26 коп. Заказ №343

Печатно-графический цех
института "Красноярский промстройниипроект"
Красноярск, 62, пр. Свободный, 75

gost.e-ecolog.ru