

МИНМОНТАЖСПЕЦСТРОЙ СССР

УКАЗАНИЯ  
ПО ТЕПЛОВОМУ РАСЧЕТУ КОНСТРУКЦИЙ  
ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

ВСН 314-73  
ММСС СССР

Однозначно введен с выходом ВСН 429-81  
Инструкции по проектированию агрегатов  
"без применения пегит из огнеупорного во-  
локна и пакетов" с 01.07.82.

Министерство монтажных и специальных  
строительных работ СССР

УТВЕРЖДАЮ:

заместитель министра  
монтажных и специальных  
строительных работ СССР

(Солодеников Л.Д.

3 октября 1973 г.

У К А З А Н И Я  
ПО ТЕПЛОВОМУ РАСЧЕТУ КОНСТРУКЦИЙ  
ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

ВСН 314-73  
ММСС СССР

Центральное бюро научно-технической информации  
Москва - 1974

В настоящих указаниях рассматриваются вопросы теплового расчета плоской и цилиндрической многослойных стенок, конструкций с включениями и фундаментов дымовых труб с подземным вводом газоходов.

Указания предназначены для проектных и производственных организаций Минмонтажспецстроя СССР, осуществляющих проектирование и строительство тепловых агрегатов.

Указания разработаны в лаборатории математического моделирования и вычислительной техники Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института Теплопроект под руководством канд.техн.наук В.Г. Петрова-Денисова.

Составители: канд. техн. наук Г.А. Жильков, инженер Ю.Ф. Бердигин, а также принимали участие канд.техн.наук И.И. Шахов и А.Е. Кулаго, инженеры Ю.Г. Каленский и Е.К. Егоров.

С вопросами обращаться по адресу: 129327, Москва, И-327, ул. Коминтерна, 7, корп. 2, ВНИПИ Теплопроект.

Минмонтажспецстрой СССР	Ведомственные строительные нормы	ВСН 814-73 ММСС СССР
	Указания по тепловому рас- чету конструкций тепловых агрегатов	-

## I. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.1. Указания предназначены для тепловых расчётов ограждающих конструкций тепловых агрегатов, выполненных полностью или частично из жаростойкого и обычного бетона, железобетона и огнеупоров, работающих в стационарном режиме. Цель расчётов:

определить общую толщину ограждения и вид применяемых в нем материалов (определить термическое сопротивление ограждения), исходя из допустимых потерь тепла или максимальной температуры наружной поверхности;

найти распределение температур в конструкции ограждения для выбора материалов отдельных зон по температуростойкости или определения максимальных температурных усилий, возникающих в конструкции при эксплуатации.

I.2. При выборе граничных условий теплообмена на наружной (холодной) поверхности ограждения для конструкций, находящихся в помещении или на открытом воздухе, но защищенных от воздействия ветра, следует руководствоваться формулой

$$\alpha_H = 7 + 0,05 t_{c,H} \quad (I)$$

(где  $t_{c,H}$  – температура наружной поверхности ограждения,  $^{\circ}\text{C}$  или данными табл. I для конструкций, находящихся на открытом воздухе.

Внесены Всесоюзным научно-исследо- вательским и проектным ин- ститутом Теплопроект	Утверждены Минмонтажспецстроем СССР 3 октября 1973 г.	Срок введения 1 января 1974
---	--	--------------------------------

Таблица I  
Границные условия на наружной поверхности ограждения

Цель теплового расчёта	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_H$ , ккал/м <sup>2</sup> ·ч·°С	Температура окружающей среды $t_H$ , °С
Выбор конструкции по допускаемым потерям тепла	$\alpha_H = 3 + 10\sqrt{V}$ , V – среднегодовая скорость ветра <sup>1)</sup> , м/с	Среднегодовая температура <sup>1)</sup>
Выбор конструкции по максимально-допустимой температуре наружной поверхности ограждения	$\alpha_H = 8,4 + 0,06(t_{c,H} - t_H)$ , $t_{c,H}$ – температура наружной поверхности ограждения, °С	Средняя температура наиболее жаркого месяца <sup>1)</sup>
Определение температур для расчёта максимальных температурных условий в конструкциях	$\alpha_H = 3 + 10\sqrt{V}$ , V – средняя скорость ветра наиболее холодного месяца <sup>1)</sup> , м/с	Средняя температура наименее жаркого месяца <sup>1)</sup>
Определение температур для выбора материалов по температуростойкости	$\alpha_H = 8,4 + 0,06(t_{c,H} - t_H)$ , $t_{c,H}$ – температура наружной поверхности ограждения, °С	Средняя температура наименее жаркого месяца <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Определяется по СНиПу глава II-А.6-62. "Строительная климатология и геофизике"

I.3. Значения коэффициента теплоотдачи на внутренней (горячей) поверхности ограждения  $\alpha_g$  разрешается подбирать по табл.2 в зависимости от температуры среды рабочего пространства теплового агрегата  $t_{c,b}$ .

Таблица 2

Значение коэффициента  $\alpha_g$ , ккал/м<sup>2</sup>·ч·°С

	Температура, °С									
	50	100	200	300	400	500	700	900	1100	1200
$\alpha_g$	10	10	10	12	15	20	40	70	120	150

I.4. Значения коэффициентов теплопроводности материалов ограждения (бетон, кирпичная кладка, изоляция) следует принимать по приложению I.

1.5. При выполнении тепловых расчетов, используя метод последовательных приближений, необходимо учитывать зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. На первом этапе расчета коэффициенты теплопроводности материалов, составляющих конструкцию, принимают при температуре конструкции, равной полусумме температур внутренней среды и окружающего воздуха. Используя полученное при этом допущении распределение температур, вновь находят значение коэффициентов теплопроводности и выполняют следующий этап и т.д. Расчет заканчивают тогда, когда значения коэффициентов теплопроводности в последующем шаге отличаются от значений, найденных в предыдущем, не более чем на 10%.

## 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ И ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ МНОГОСЛОЙНЫЕ СТЕНКИ

2.1. Расчет теплопередачи через плоскую стенку, состоящую из  $n$  слоев (рис. I, а) следует производить по формуле

$$q = \frac{t_b - t_h}{R_b + \sum_{i=1}^n R_i + R_h} \quad (2)$$

где  $q$  - удельный тепловой поток,  $\text{kкал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ;

$t_b$  - температура внутренней среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_h$  - температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$R_b$  - термическое сопротивление теплоотдаче на внутренней (внешней) поверхности плоской стенки,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{kкал}$ ;

$\sum_{i=1}^n R_i$  - полное термическое сопротивление,  $n$  - слойной плоской стенки,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{kкал}$ .

2.2. Термические сопротивления плоской стенки следует определять по соотношениям:

а) для  $i$  - слоя

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad , \quad (3)$$

б) на внутренней (внешней) поверхности

$$R_{B|W} = \frac{1}{\alpha_{B|H}} \quad , \quad (4)$$

где  $\delta_i$  - толщина  $i$ -го слоя, м;  
 $\lambda_i$  - коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя, ккал/м·ч·°С;  
 $\alpha_{(вн)}$  - коэффициент теплоотдачи на внутренней (внешней) поверхности, ккал/м<sup>2</sup>·ч·°С.

2.3. Температуры в плоской многослойной стенке следует рассчитывать по формулам:

а) температуру на внутренней поверхности ограждения

$$t_{c,B} = t_B - q R_B, \quad (5)$$

б) температуру на границе  $k$ -го и  $k+1$ -го слоя

$$t_{k+1} = t_B - q / \left( R_B + \sum_{i=1}^{k+1} R_i \right), \quad (6)$$

в) температуру в  $k$ -м слое на расстоянии  $x$  от границы с  $k+1$ -м слоем

$$t (0 < x \leq \delta_k) = t_k - \frac{t_k - t_{k+1}}{\delta_k} x, \quad (7)$$

г) температуру на наружной поверхности ограждения

$$t_{c,H} = t_H + q R_H \quad (8)$$

или с помощью графика, приведенного в приложении II.

2.4. Расчет теплопередачи через цилиндрическую  $n$ -слойную стенку (см. рис. I, б) следует производить по формуле

$$q' = \frac{t_B - t_H}{R'_B + \sum_{i=1}^n R'_i + R'_H}, \quad (9)$$

где  $q'$  - удельный линейный (на единицу длины цилиндрической стенки) тепловой поток, ккал/м·ч;

$R'_B$  - линейное термическое сопротивление теплоотдаче на внутренней (внешней) поверхности цилиндрической стени, м·ч·°С/ккал;

$\sum_{i=1}^n R'_i$  - полное линейное термическое сопротивление многослойной цилиндрической стени, м·ч·°С/ккал.

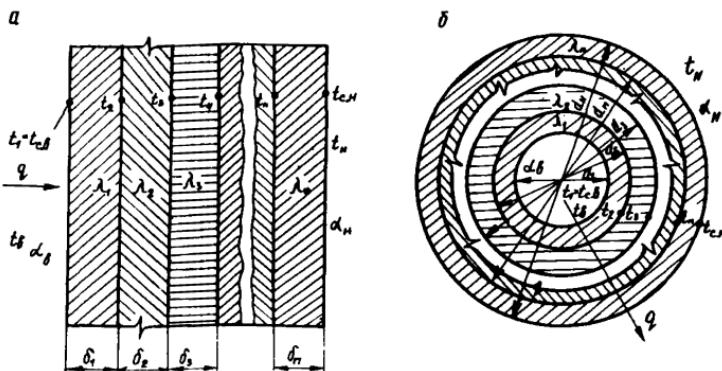


Рис. 1. Расчетная схема многослойной стены: а-плоской; б-цилиндрической

2.5. Линейные термические сопротивления цилиндрической стены следует определять по соотношениям:

а) для  $i$ -слоя

$$R'_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} , \quad (10)$$

б) на внутренней (внешней) поверхности

$$R'_{b(H)} = \frac{1}{\pi d_{b(H)} \lambda_{b(H)}} , \quad (II)$$

где  $d_i$  - диаметр  $i$ -слоя, м;

$\lambda_i$  - коэффициент теплопроводности  $i$ -слоя, ккал/м·ч·°С;

$d_{b(H)}$  - диаметр внутренней (внешней) поверхности, м;

$\lambda_{b(H)}$  - коэффициент теплопроводности на внутренней (внешней) поверхности, ккал/м·ч·°С.

2.6. Температуру в многослойной цилиндрической стенке следует рассчитывать по формулам:

а) на внутренней поверхности

$$t_{cb} = t_b - q' R'_{b(H)} , \quad (12)$$

б) температуру на границе  $k$ - и  $k+1$ -ской

$$t_{k+1} = t_B - q' (R_B' + \sum_{i=1}^k R_i') , \quad (13)$$

в) температуру на наружной поверхности

$$t_{c,H} = t_H + q' R_H' \quad (14)$$

или с помощью графика, приведенного в приложении II.

### 3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ

3.1. В данном разделе приведены указания, которыми следует руководствоваться при тепловом расчете ограждений, конструкция которых может представлять собой одну из шести основных расчетных схем (рис. 2); раздел содержит методику определения температур в трех характерных сечениях и теплового потока через конструкцию.

3.2. Удельный тепловой поток через конструкцию с включением  $q_{вкл}$ , ккал/м<sup>2</sup>.ч, следует определять по формуле

$$q_{вкл} = \eta q , \quad (15)$$

где  $q$  - удельный тепловой поток через плоскую стенку из основного материала конструкции, ккал/м<sup>2</sup>.ч, с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , ккал/м.ч.°С, и толщиной  $\delta$  м, для схем 1, 2, 3 и  $\delta_1 + \delta_2$  м для схем 4, 5, 6;

$\eta$  - поправочный коэффициент, учитывающий влияние геометрии и теплопроводности включений на теплозащитные свойства конструкций.

3.3. Расчет конструкций с включениями следует производить в безразмерных температурах, определяемых соотношением

$$\theta = \frac{t - t_H}{t_{c,H} - t_H} , \quad (16)$$

(где  $t$  - температура в любой точке конструкции, °С, и изменяющихся от нуля в наружном воздухе до единицы на внутренней (горячей) поверхности ограждения).

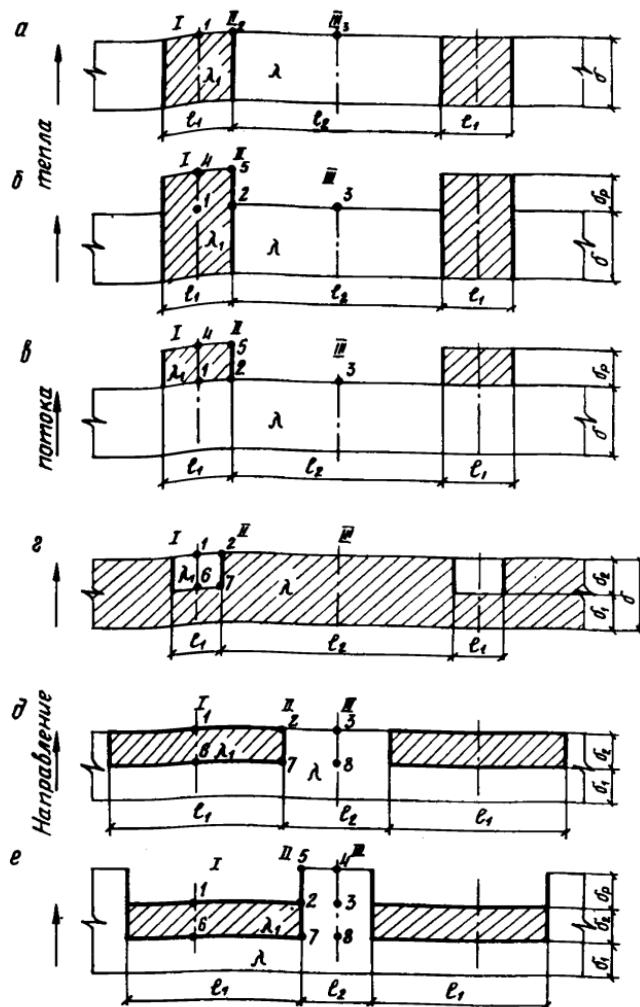


Рис. 2. Расчетные схемы конструкций с включениями: I-8-базовые точки в выбранных для расчета сечениях I-III

3.4. Температуру на внутренней поверхности конструкции допускается вычислять по формуле (5), принимая тепловой поток  $q$  как для плоской стенки толщиной  $\delta$  и с коэффициентом теплопро-

водности  $\lambda$  для схем а, б, в, г и как для двухслойной стенки с толщинами  $\delta_1$  и  $\delta_2$  и коэффициентами теплопроводности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , для схем д, е - согласно п. 2.3.

Расчет конструкций со сквозным включением

3.5. Безразмерные температуры на поверхности ограждения в точках I, 2, 3 (см. рис. 2 схема а) вычисляют по формулам

$$\theta_1 = 1 - c + 0,4 a_1 [C - B_{i_1} (1 - c)] \Sigma_3 , \quad (17)$$

$$\theta_2 = 1 - c , \quad (18)$$

$$\theta_3 = 1 - c + 0,4 a_2 [c - B_{i_2} (1 - c)] \Sigma_4 , \quad (19)$$

где  $a_1 = \frac{\ell_1}{\delta} ; \quad a_2 = \frac{\ell_2}{\delta} ; \quad B_{i_1} = \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda_1} ; \quad B_{i_2} = \frac{\alpha_2 \delta}{\lambda_2} ;$

$$c = \frac{\alpha_1 \ell_1 \Sigma_1 + \alpha_2 \ell_2 \Sigma_2}{\ell_1 (\alpha_1 + \frac{\lambda_1}{\delta}) \Sigma_1 + \ell_2 (\alpha_2 + \frac{\lambda_2}{\delta}) \Sigma_2} ;$$

$\alpha_1$  - коэффициент теплообмена с поверхности включения, ккал/м<sup>2</sup>·ч·°С;

$\alpha_2$  - коэффициент теплообмена с поверхности основного материала, ккал/м<sup>2</sup>·ч·°С;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности основного материала, ккал/м·ч·°С;

$\lambda_i$  - коэффициент теплопроводности включения, ккал/м·ч·°С; остальные обозначения показаны на рис. 2.

3.6. Поправочный коэффициент для определения  $q_{вкл}$  по п.3.2 следует вычислять по формуле

$$\gamma = \frac{\alpha_2 + \frac{\lambda}{\delta}}{\alpha_2 \lambda (\ell_1 + \ell_2)} (\lambda_1 \ell_1 \gamma_1 + \lambda_2 \ell_2 \gamma_2) , \quad (20)$$

где  $J_1 = C - 0,8 [C - B_{i_1} (1 - C)] \Sigma_5$  ,

$$J_2 = C - 0,8 [C - B_{i_2} (1 - C)] \Sigma_6 .$$

3.7. Значения величин  $\Sigma_1, \dots, \Sigma_6$  следует определять по графикам приложений (I<sup>1</sup>-I<sup>6</sup>) в зависимости от значений параметров  $\alpha$  и  $B_i$

$$\Sigma_1 = S_1 (\alpha = \alpha_1; B_i = B_{i_1}); \Sigma_2 = S_1 (\alpha = \alpha_2; B_i = B_{i_2}),$$

$$\Sigma_3 = S_2 (\alpha = \alpha_1; B_i = B_{i_1}); \Sigma_4 = S_2 (\alpha = \alpha_2; B_i = B_{i_2}),$$

$$\Sigma_5 = S_3 (\alpha = \alpha_1; B_i = B_{i_1}); \Sigma_6 = S_3 (\alpha = \alpha_2; B_i = B_{i_2}).$$

При значениях  $\alpha > 6$  величины  $S_1$  и  $S_2$  следует рассчитывать по формуле

$$S_i (\alpha, B_i) = \frac{6 S_i (6, B_i)}{\alpha}, (i = 1, 2). \quad (21)$$

3.8. По толщине ограждения распределение температур следует считать линейным.

Расчет конструкций со сквозным включением, выступающим за поверхность ограждения, и конструкций с включением на его внешней поверхности

3.9. Вычисление безразмерных температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  в точках I, 2, 3 (см. рис. 2, схемы б, в), а также поправочного коэффициента для определения потока тепла  $q_{бкв}$  (п. 3.2) следует производить по формулам (I<sup>7</sup>-20), где вместо значения  $\alpha$ , подставляют значение  $\alpha_{экв}$ .

3.10. Эквивалентный коэффициент теплообмена  $\alpha_{экв}$  следует вычислять по формуле

$$\alpha_{экв} = \beta \alpha_2, \quad (22)$$

где поправочный коэффициент  $\varphi$  находят по кривым приложения III в зависимости от величин

$$h = \frac{2\delta_p}{\ell_1}, \quad B_1 = \frac{d_2 \ell_1}{2\lambda_1}$$

3.II. Безразмерные температуры в точках 4 и 5 следует вычислять по формулам

$$\theta_4 = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} S_4, \quad (23)$$

$$\theta_5 = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} S_5, \quad (24)$$

где  $\theta_1, \theta_2$  - см. пункт 3.9.

$S_4, S_5$  - величины, определяемые в зависимости от значений величин  $n$  и  $B$  по графикам приложений УП и IX.

### Расчет конструкций с несквозным теплопроводным включением

3.I2. Температуру в сечении II (см. рис. 2, схема г) следует рассчитывать как для плоской стенки согласно п. 2.3.

3.I3. Безразмерные температуры в точках 1,2,6,7 следует вычислять по формулам

$$\theta_1 = \varepsilon_1 \theta_1^{usl}, \quad (25)$$

$$\theta_2 = \varepsilon_2 \theta_2^{usl}, \quad (26)$$

$$\theta_6 = \varepsilon_6 \theta_6^{usl}, \quad (27)$$

$$\theta_7 = \varepsilon_7 \theta_7^{usl}. \quad (28)$$

3.I4. Величины  $\theta_1^{usl}, \theta_2^{usl}$  следует вычислять по формулам (I7-I8), заменив величину  $\lambda_1$  величиной  $\lambda_{экб}$  по соотношению

$$\lambda_{экб} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}. \quad (29)$$

3.15. Величины  $\theta_6^{ycl}$ ,  $\theta_7^{ycl}$  вычисляют по формулам

$$\theta_6^{ycl} = \frac{\delta_1 \theta_1^{ycl} + \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} , \quad (30)$$

$$\theta_7^{ycl} = \frac{\delta_1 \theta_2^{ycl} + \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} . \quad (31)$$

3.16. Поправочные коэффициенты  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_6$ ,  $\varepsilon_7$ , следует выбирать из табл. I приложения X в зависимости от значений величин

$$K = \frac{\lambda}{\lambda_1} , \quad B_{i1} = \frac{\alpha_1 \delta_2}{\lambda_1} , \quad B_{i2} = \frac{\alpha_2 \delta_2}{\lambda} .$$

3.17. Поправочный коэффициент  $\eta$  для определения потерь тепла по п.3.2 следует вычислять по формуле (20), подставляя вместо величины  $\lambda$ , величину  $\lambda_{экб}$ , определенную по формуле (29).

3.18. Распределение температур в сечениях I (II) между нагреваемой поверхностью и точками 6(7), а также между точками 6-I (7-2), следует считать линейным.

#### Расчет конструкций с несквозным изоляционным включением

3.19. Безразмерные температуры в точках I, 2, 3, 6, 7, 8(см. рис. 2, схема д), следует вычислять по формулам

$$\theta_1 = \varepsilon_1 \theta_1^{ycl} , \quad (32)$$

$$\theta_2 = \varepsilon_2 \theta_2^{ycl} , \quad (33)$$

$$\theta_3 = \varepsilon_3 \theta_3^{ycl} , \quad (34)$$

$$\theta_6 = \varepsilon_6 \theta_6^{ycl} , \quad (35)$$

$$\theta_7 = \xi_7 \theta_7^{\text{усл}} , \quad (36)$$

$$\theta_8 = \xi_8 \theta_8^{\text{усл}} . \quad (37)$$

3.20. Величины  $\theta_1^{\text{усл}}$ ,  $\theta_2^{\text{усл}}$ ,  $\theta_3^{\text{усл}}$  следует вычислять по формулам (17-19), заменив величину  $\lambda$ , величиной  $\lambda_{\text{вк}}$  по соотношению (29).

3.21. Величины  $\theta_6^{\text{усл}}$ ,  $\theta_7^{\text{усл}}$ ,  $\theta_8^{\text{усл}}$  следует вычислять по формулам

$$\theta_6^{\text{усл}} = \frac{\delta'_1 \theta_1^{\text{усл}} + \delta'_2}{\delta'_1 + \delta'_2} , \quad (38)$$

$$\theta_7^{\text{усл}} = \frac{\delta'_1 \theta_2^{\text{усл}} + \delta'_2}{\delta'_1 + \delta'_2} , \quad (39)$$

$$\theta_8^{\text{усл}} = \frac{\delta'_1 \theta_3^{\text{усл}} + \delta'_2}{\delta'_1 + \delta'_2} . \quad (40)$$

3.22. Поправочные коэффициенты  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$ ,  $\xi_6$ ,  $\xi_7$ ,  $\xi_8$  следует подбирать из табл. 2 приложения X в зависимости от значений величин

$$m = \frac{\ell_1}{\ell_2} , \quad \alpha = \frac{\ell_2}{\lambda} , \quad \rho = \frac{\delta'_1}{\delta'_2} ,$$

$$B_{i_2} = \frac{\alpha_2 \delta'_2}{\lambda} , \quad B_{i_1} = \frac{\alpha_1 \delta'_1}{\lambda_1} , \quad K = \frac{\lambda}{\lambda_1} .$$

При значениях параметра  $m \geq 2$  температуры в сечении I следует рассчитывать как для двухслойной стены согласно п. 2.3.

3.23. Поправочный коэффициент  $\eta$  для определения  $q_{\text{вкл}}$  по п. 3.2 следует вычислять по пункту 3.17.

3.24. Распределение температур в сечениях I (II, III) между нагреваемой поверхностью и точками 6 (7, 8), а также между точками 6-I (7-2, 8-3) следует принимать линейным.

## Расчет ребристых конструкций

3.25. Расчет безразмерных температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$  в точках 1, 2, 3, 6, 7, 8 (см. рис. 2, схема в) следует выполнять согласно пунктам 3.19 – 3.24, в которых вместо значения коэффициента  $\alpha_2$  подставляют значение коэффициента  $\alpha_{экв}$ , выбираемое согласно пункту 3.10 при условии замены  $\ell_1$  величиной  $\ell_2$ , а  $\lambda$ , величиной  $\lambda$ .

3.26. Безразмерные температуры  $\theta_4, \theta_5$  в точках 4, 5 следует вычислять по формулам

$$\theta_4 = \frac{\theta_2 + \theta_3}{2} S_4, \quad (41)$$

$$\theta_5 = \frac{\theta_2 + \theta_3}{2} S_5, \quad (42)$$

где  $\theta_2, \theta_3$  определяют по п. 3.25, а величины  $S_4, S_5$  находят по графикам приложений VIII и IX в зависимости от значений величин  $h$  и  $B_i$ .

3.27. Для пересчета безразмерных температур в конструкциях с включениями, получаемых по п.п. 3.3-3.26, в обычные следует применять формулу

$$t = t_H + \theta (t_{c,8} - t_H); \quad (43)$$

где  $\theta$  – соответствующая безразмерная температура.

## 4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР В ЭЛЕМЕНТАХ ФУНДАМЕНТОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ С ПОДЗЕМНЫМ ВВОДОМ ГАЗОХОДОВ

4.1. Данный метод расчета рекомендуется применять для определения температуры в различных по толщине точках цилиндрической или донной части фундамента принятой конструкции в условиях стационарного температурного режима.

4.2. Вид и толщину изоляции бетона фундамента следует подбирать в зависимости от допустимой температуры применения бетона, исходя из условий прочности и экономичности сооружения.

4.3. Для расчета температуры в цилиндрической стенке и донце фундамента следует предварительно определить температуру на наружной поверхности стенки  $t_{c,H}$  и донца  $t_{g,H}$  по принятым размерам бетонной части, футеровки и изоляции (рис. 3) по формулам:

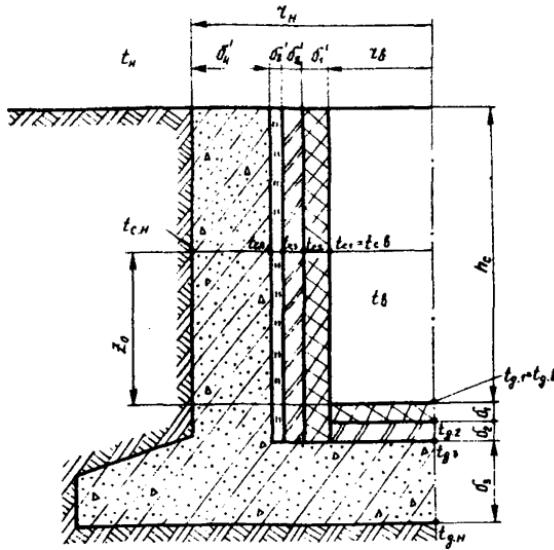


Рис. 3. Фрагмент фундамента дымовой трубы

а) для цилиндрической стенки фундамента:

$$t_{c,H} = \frac{t_B + \lambda_{2p,eff} \alpha \Psi t_H (R_B' + \sum_{i=1}^n R_i')}{1 + \lambda_{2p,eff} \alpha \Psi (R_B' + \sum_{i=1}^n R_i')} , \quad (44)$$

где  $t_B$  - температура дымовых газов в трубе на уровне фундамента,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_H$  - температура окружающей фундамент среды (принимается в соответствии с п. 4.6),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda_{2p,eff}$  - эффективный коэффициент теплопроводности грунта (принимается в соответствии с п. 4.7), ккал/м·ч  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$  - величина, определяемая по соотношению  $\alpha = \tau_H/h_c$ ;

$\tau_H$  - наружный диаметр стакана фундамента, м;

$h_c$  - высота подземной части стакана фундамента (расстояние от уровня поверхности грунта до уровня футеровки днища фундамента), м;

$\Psi$  - величина, определяемая по графику приложения XI в зависимости от относительной высоты рассматриваемого сечения  $B = \tau_o/h_c$ ;

$Z_0$  - высота рассматриваемого сечения от уровня футеровки днища фундамента, м;

$R_B$  - линейное термическое сопротивление теплоотдачи от газа к стенке (определяется в соответствии с п. 2.5), м·ч·°С/ккал;

$\sum_{i=1}^n R_i'$  - сумма линейных термических сопротивлений  $n$  - слойной стенки фундамента (определяется в соответствии с п. 2.5), м·ч·°С/ккал;

б) для днища фундамента:

$$t_{g.H} = \frac{t_B + t_H \cdot \frac{4\lambda_{ep, \phi}}{\pi r_B} \left( R_B + \sum_{i=1}^m R_i \right)}{1 + \frac{4\lambda_{ep, \phi}}{\pi r_B} \left( R_B + \sum_{i=1}^m R_i \right)} , \quad (45)$$

где  $r_B$  - радиус внутренней поверхности фундамента (футеровки), м;

$R_B$  - термическое сопротивление теплоотдачи от газа к футеровке днища (определяется в соответствии с п. 2.2),  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}/\text{ккал}$ ;

$\sum_{i=1}^m R_i'$  - сумма термических сопротивлений  $m$  - слойного днища (определяется в соответствии с п. 2.2),  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}/\text{ккал}$ .

4.4. Температуру на границе  $k$  и  $k+1$  слоев цилиндрической стенки и днища фундамента определяют по известным температурам наружной и внутренней поверхности по формулам:

а) для цилиндрической стенки:

$$t_{c.k+1} = t_B - (t_B - t_{c.H}) \frac{R_B + \sum_{i=1}^k R_i'}{R_B + \sum_{i=1}^m R_i} , \quad (46)$$

где  $\sum_{i=1}^k R_i'$  - сумма линейных термических сопротивлений  $k$  - слоев цилиндрической стенки (определяется в соответствии с п. 2.5), м·ч·°С/ккал;

б) для днища:

$$t_{g.k+1} = t_B - (t_B - t_{g.H}) \frac{R_B + \sum_{i=1}^k R_i}{R_B + \sum_{i=1}^m R_i} , \quad (47)$$

где  $\sum_{i=1}^k R_i$  - сумма термических сопротивлений  $k$  слоев (определяется в соответствии с п. 2.2),  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}/\text{ккал}$ .

4.5. Распределение температуры во всех слоях стенки цилиндрической части фундамента для интервала относительной высоты рассматриваемых сечений в пределах  $\beta = 0,3-0,9$  может быть получено по формуле (46), справедливой для  $\alpha > 0,2$ . Максимальная

температура в слоях стенки будет при  $\beta = 0,3$ . Температура в слоях днища, полученная по формуле (47) будет максимальной.

4.6. В формулах (44) и (45)  $t_{ch}$  следует принимать равной среднегодовой температуре наружного воздуха при расчете на максимально возможную температуру в элементах фундамента и равной средней температуре воздуха за отопительный период при расчете температурных напряжений в бетоне фундамента.

4.7. Эффективный коэффициент теплопроводности грунта  $\lambda_{gr,eff}$  следует определять по графикам приложения XII в зависимости от температуры  $t_{ch,n}$  и  $t_{gh,n}$  и коэффициентов теплопроводности сухого и влажного грунта при фактической влажности. Коэффициент теплопроводности всех видов сухого грунта следует принимать постоянным  $\lambda_{gr,s} = 0,3 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности влажного грунта следует принимать по фактическим данным для районов строительства фундаментов. Ориентировочно допускается принимать такие значения коэффициентов теплопроводности влажных грунтов: для всех видов песков плотностью  $\rho = 1500 - 1700 \text{ кг}/\text{м}^3$  с объемной влажностью 8-10%  $\lambda_{gr,6,s} = 1,0 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$ ; для глины, суглиников и супесей плотностью  $\rho = 1600-2100 \text{ кг}/\text{м}^3$  с объемной влажностью 18 - 25%  $\lambda_{gr,6,s} = 2,0 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$ . При температуре  $t_{ch,n}$  и  $t_{gh,n} < 100^{\circ}\text{C}$   $\lambda_{gr,eff} = \lambda_{gr,6,s}$ .

4.8. При расчёте температуры в цилиндрической стенке фундамента, находящейся в зоне грунтовых вод, для определения термических напряжений следует предварительно найти  $t_{ch,n}$  как для влажного грунта при отсутствии грунтовых вод в соответствии с п. 4.3. Если при этом  $t_{ch,n} > 100^{\circ}\text{C}$ , то расчёт температуры в стенке, находящейся в зоне грунтовых вод, следует вести по формуле (46) при  $t_{ch,n} = 100^{\circ}\text{C}$ . Если  $t_{ch,n} < 100^{\circ}\text{C}$ , то расчёт температуры в стенке, находящейся в зоне грунтовых вод, следует вести как для случая влажного грунта при отсутствии грунтовых вод по формулам (44), (46).

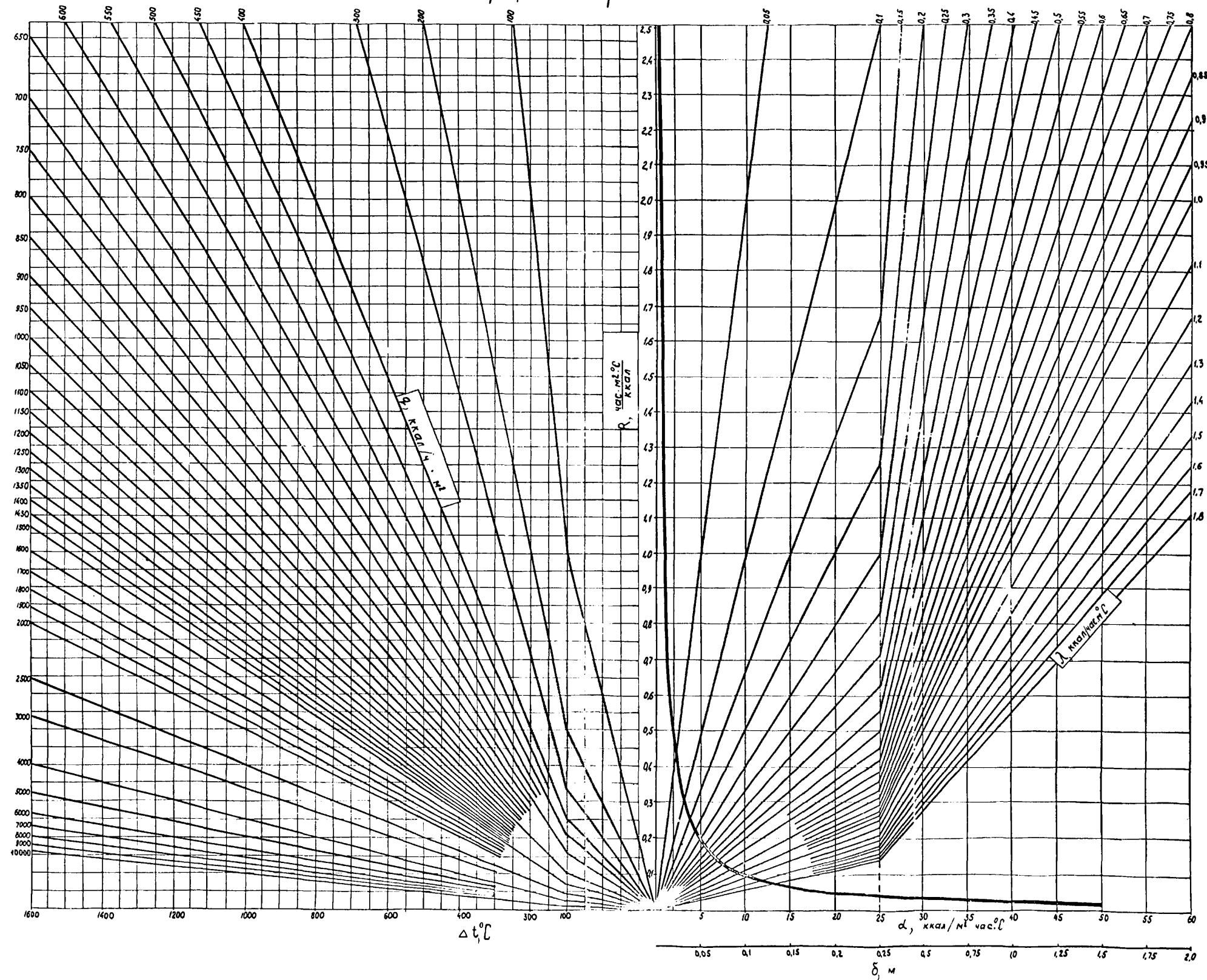
4.9. Температуру в цилиндрической стенке и днище фундамента, находящегося в зоне грунтовых вод, для подбора материалов по допустимой температуре их применения следует рассчитывать как для случая влажного грунта при отсутствии грунтовых вод по формулам (44-47).

4.10. Если фундамент выступает над поверхностью грунта, необходимо дополнительно выполнить расчёт температуры в условиях теплообмена наружной цилиндрической поверхности с воздухом согласно п. 2.4-2.5 и для определения температурных напряжений в бетоне принять наиболее неблагоприятное распределение температуры.

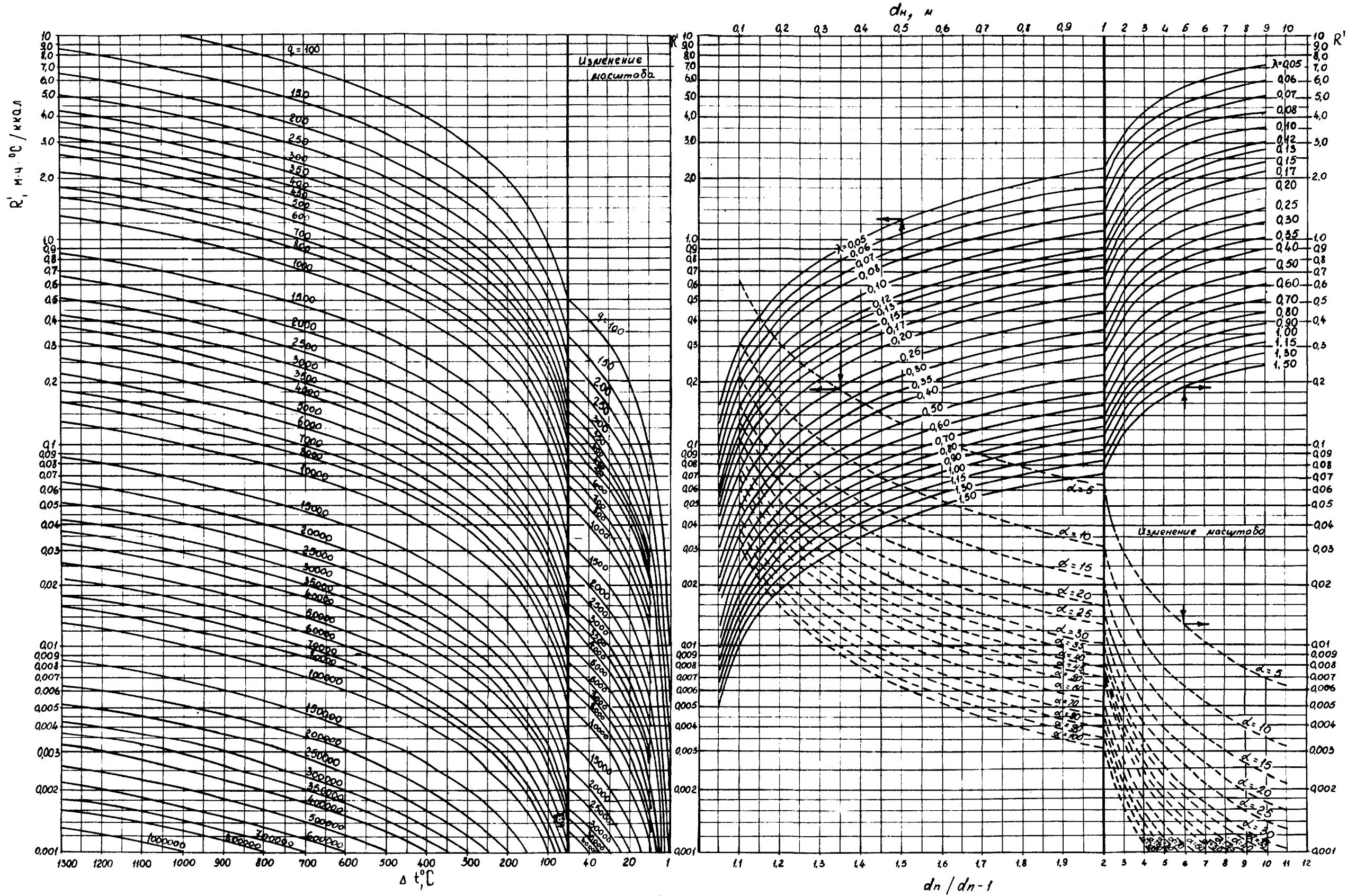
Коэффициенты  
теплопроводности обычного и жаростойкого бетонов, огнеупоров и  
изоляционных материалов

М а т е р и а л	Коэффициент теплопроводности, ккал/м·ч·°С, при средней температуре нагрева, °С										
	50	100	200	300	400	500	600	700	900	1100	I
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Обычный тяжелый бетон .....	I,12	I,14	I,21	I,28	-	-	-	-	-	-	
Жаростойкие бетоны с заполнителями:											
хромит .....	I,12	I,14	I,17	I,20	I,25	I,30	I,33	I,35	I,40	I,50	
базальт, диабаз, андезит .....	I,02	I,04	I,10	I,16	I,21	I,27	I,33	I,39	-	-	
шамот .....	0,62	0,64	0,70	0,76	0,81	0,87	0,93	0,98	I,10	-	
шлак, бой обыкновенного глиняного											
кирпич .....	0,56	0,58	0,63	0,68	0,72	0,77	0,82	0,87	-	-	
артикский туф .....	0,54	0,56	0,61	0,66	0,70	0,75	0,80	0,85	-	-	
Легкие жаростойкие бетоны с заполнителями из керамзита с объемной массой бетона, кг/м <sup>3</sup> :											
I200 .....	0,33	0,35	0,39	0,43	0,46	0,50	0,54	0,58	-	-	
I500 .....	0,37	0,40	0,46	0,51	0,57	0,63	0,69	0,75	-	-	
Динасовый .....	I,38	I,39	I,43	I,46	I,49	I,53	I,56	I,59	I,66	I,72	
Шамотный .....	0,69	0,65	0,71	0,77	0,82	0,87	0,93	0,99	I,10	I,21	

## График для расчёта плоской стенки

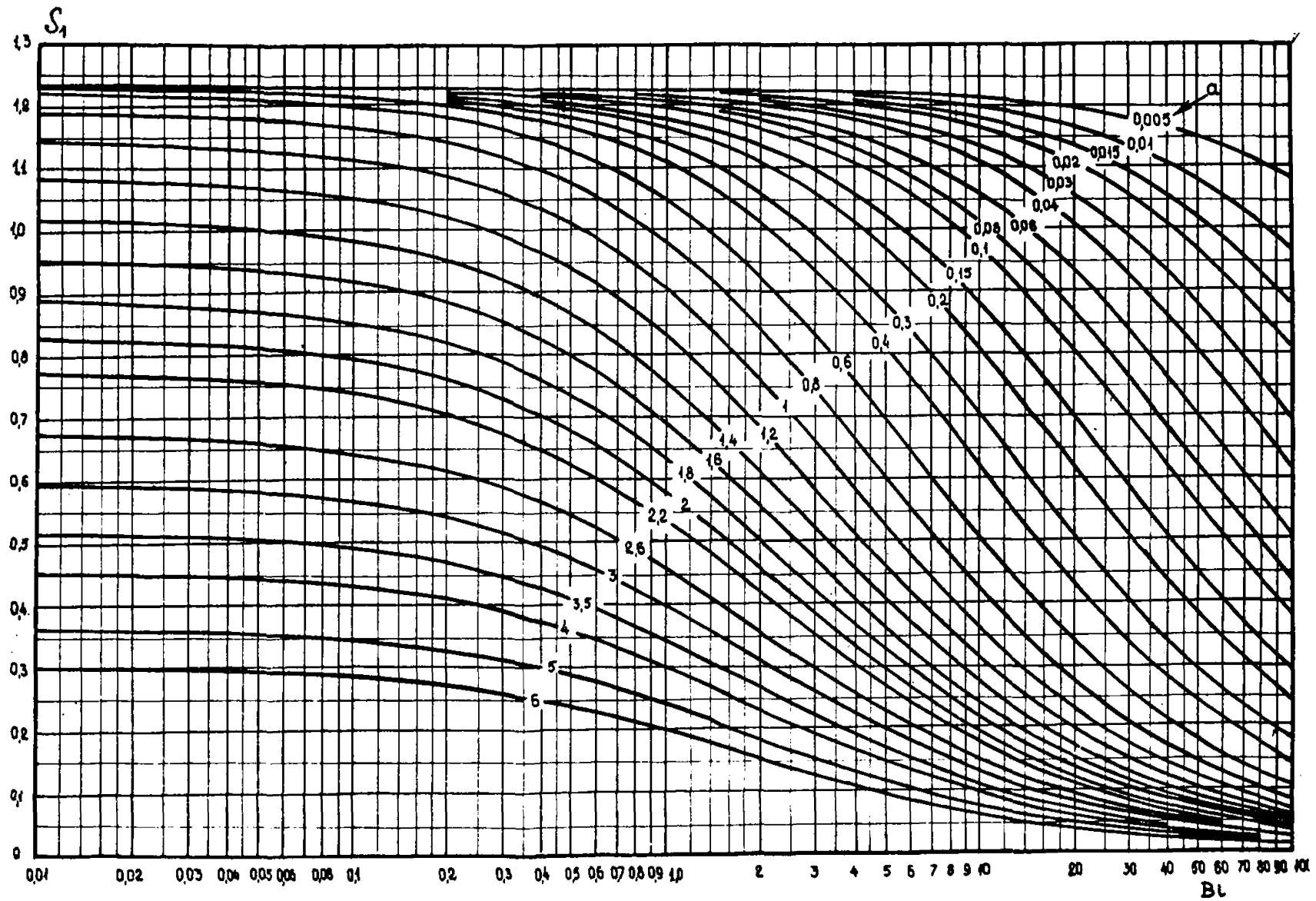


## График для расчета цилиндрической стенки



Продолжение приложения I

	I	! 2	! 3	! 4	! 5	! 6	! 7	! 8	! 9	! 10	! II
Керамический .....	1,54	1,55	1,57	1,60	1,62	1,64	1,66	1,68	1,78	1,77	
Высокоглиноземистый .....	1,51	1,50	1,48	1,46	1,44	1,42	1,40	1,38	1,34	1,30	
Магнезитовый .....	5,16	5,07	4,84	4,61	4,38	4,15	3,92	3,69	3,28	2,77	
Магнезитохромитовый .....	3,44	3,39	3,24	3,10	2,96	2,82	2,67	2,53	2,24	1,96	
Хромомагнезитовый .....	2,36	2,32	2,25	2,18	2,10	2,02	1,95	1,88	1,72	1,58	
Динасовый лёгковесный .....	0,49	0,50	0,52	0,55	0,57	0,60	0,62	0,65	0,70	0,75	
Пакетный лёгковесный, т/м <sup>3</sup> :											
2	I,3 .....	0,42	0,43	0,47	0,50	0,53	0,56	0,60	0,63	0,70	0,76
	I,0 .....	0,29	0,30	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,54	0,60
	0,8 .....	0,20	0,21	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,36	0,40
	0,4 .....	0,11	0,11	0,13	0,14	0,16	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25
Диатомитовый марки:											
600 .....	0,12	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,29	-	
500 .....	0,10	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,27	-	
Асбестовый картон .....	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	-	-	-	-	
Глиняный обычновенный кирпич .....	0,43	0,44	0,49	0,53	0,58	0,62	0,66	0,71	0,80	-	
Совхозитовые плиты марки:											
400 .....	0,076	0,080	0,089	0,098	0,107	0,116	-	-	-	-	
350 .....	0,073	0,077	0,085	0,093	0,102	0,111	-	-	-	-	
Асбестовермикулит 250 .....	0,076	0,083	0,100	0,119	0,137	0,155	-	-	-	-	
Маты минеральные 250 .....	0,060	0,067	0,083	0,099	0,115	0,131	-	-	-	-	
Вермикулит обожжённый I25 .....	0,076	0,084	0,104	0,124	0,145	0,165	0,185	0,20	0,25	-	
Асбозурит 600 .....	0,15	0,16	0,17	0,18	0,20	0,22	0,23	0,25	-	-	

График для определения величин  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$ 

## ПРИЛОЖЕНИЕ У

График для определения величин  $\Sigma_3, \Sigma_4$

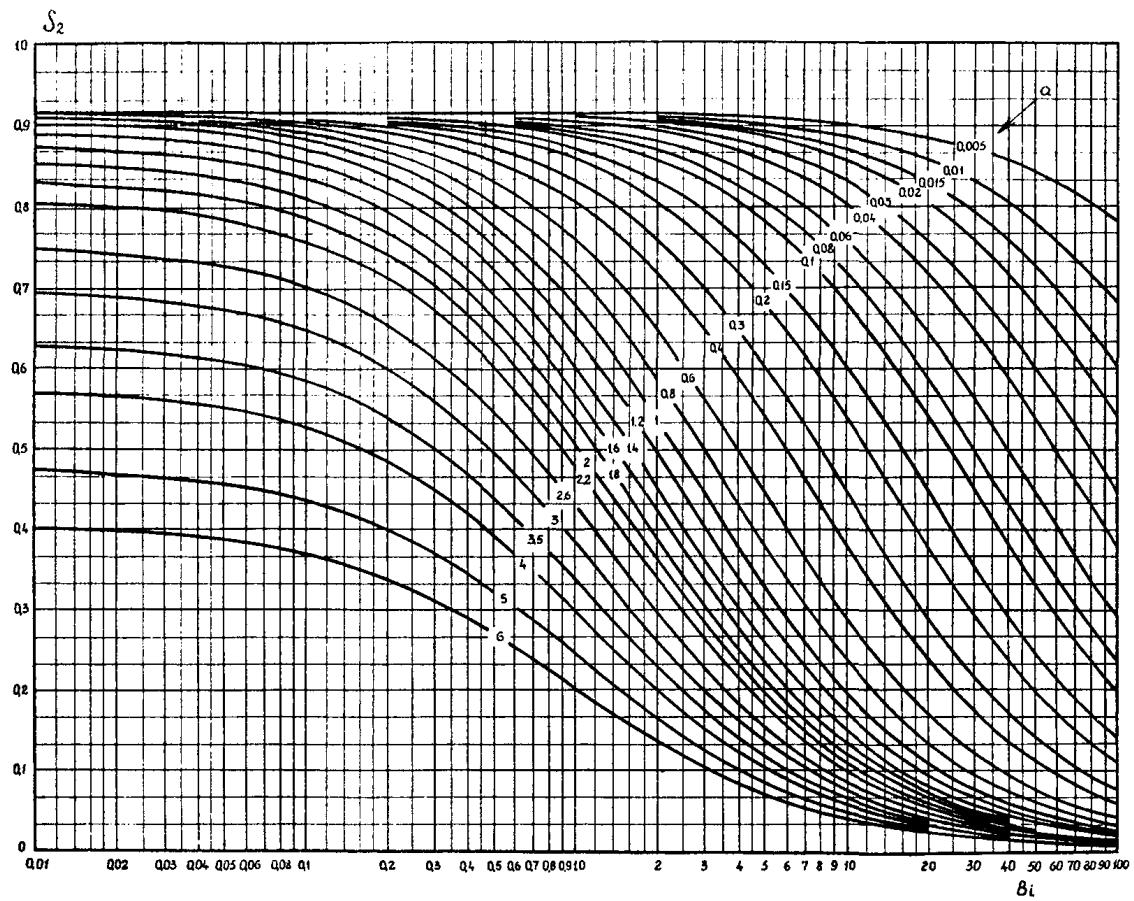
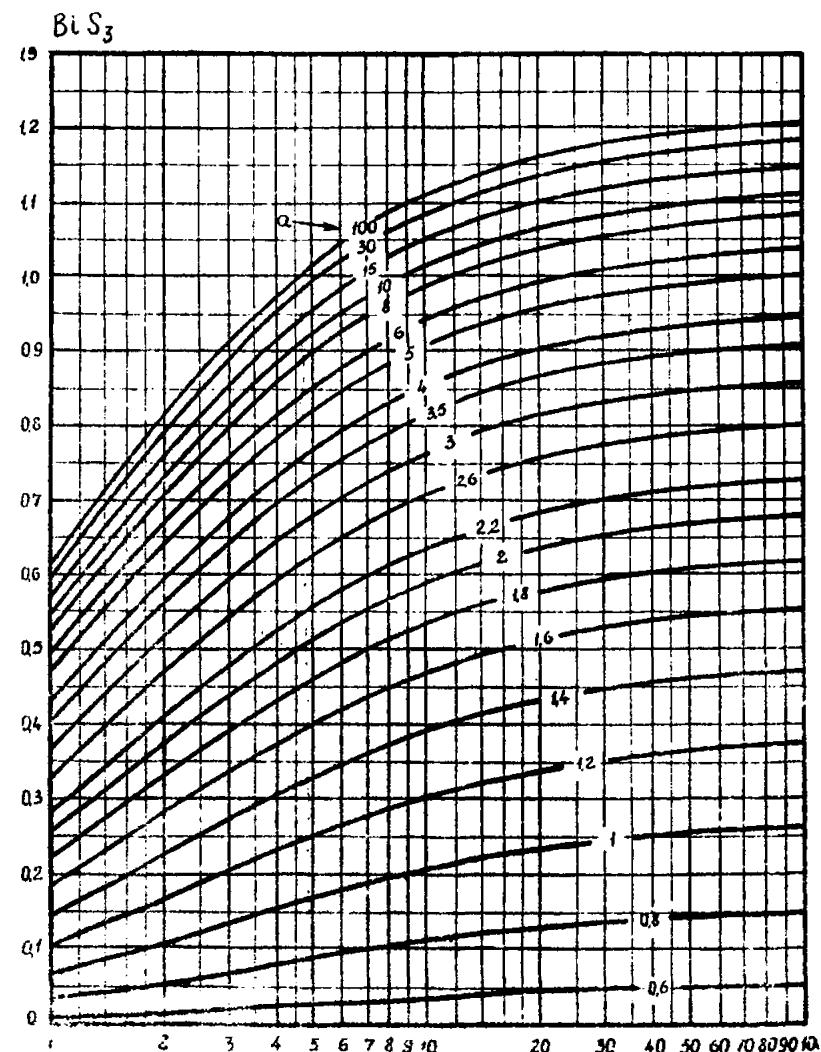
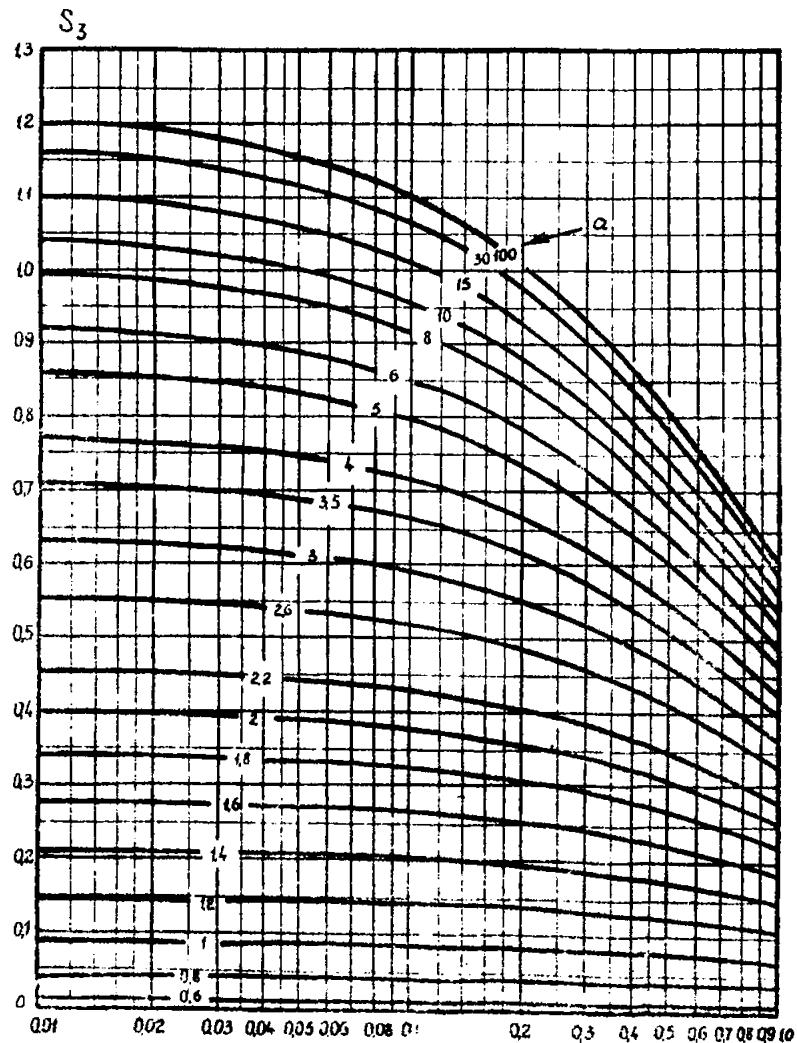


График для определения величин  $\Sigma_5$ ,  $\Sigma_6$

ПРИЛОЖЕНИЕ VI



ПРИЛОЖЕНИЕ УП

График для определения поправочного коэффициента  $\beta$

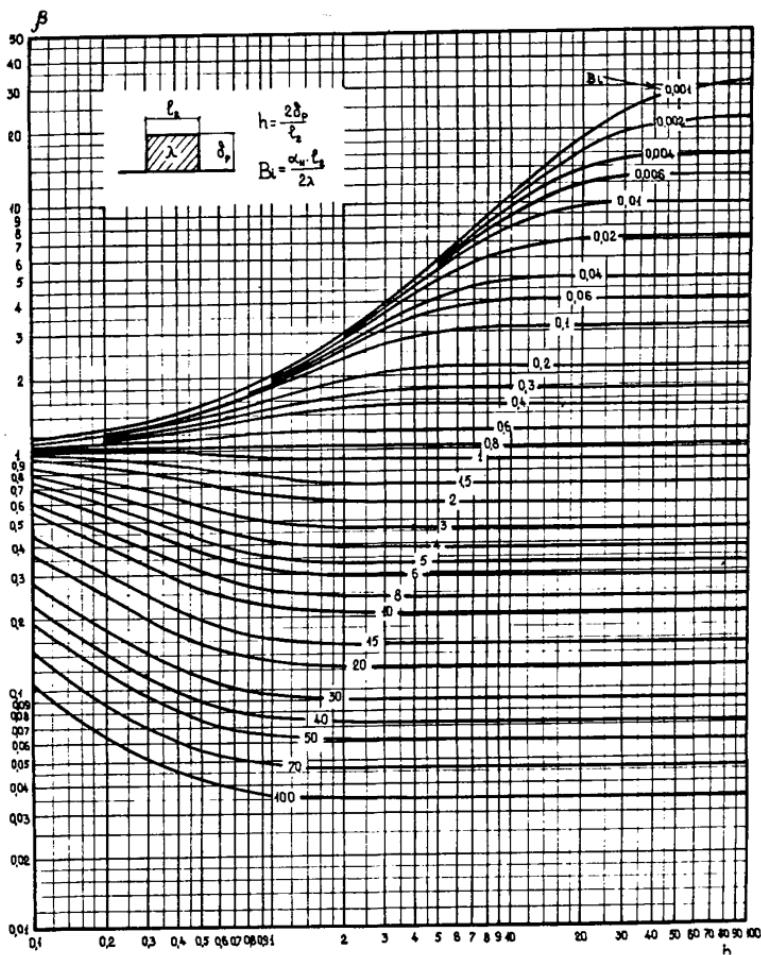
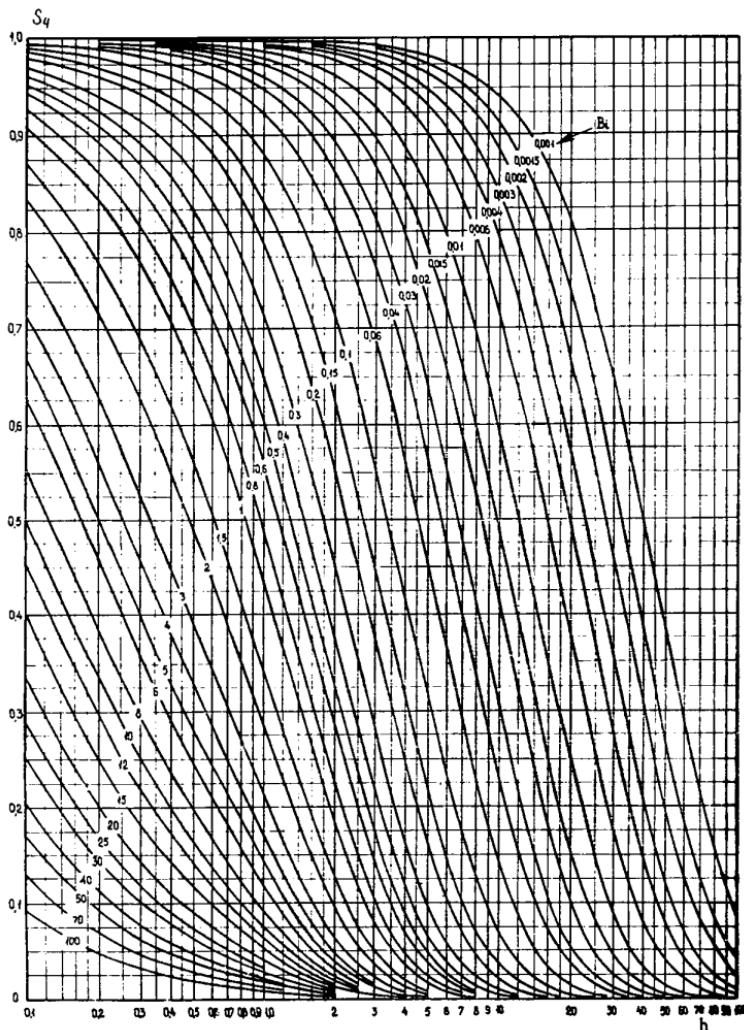
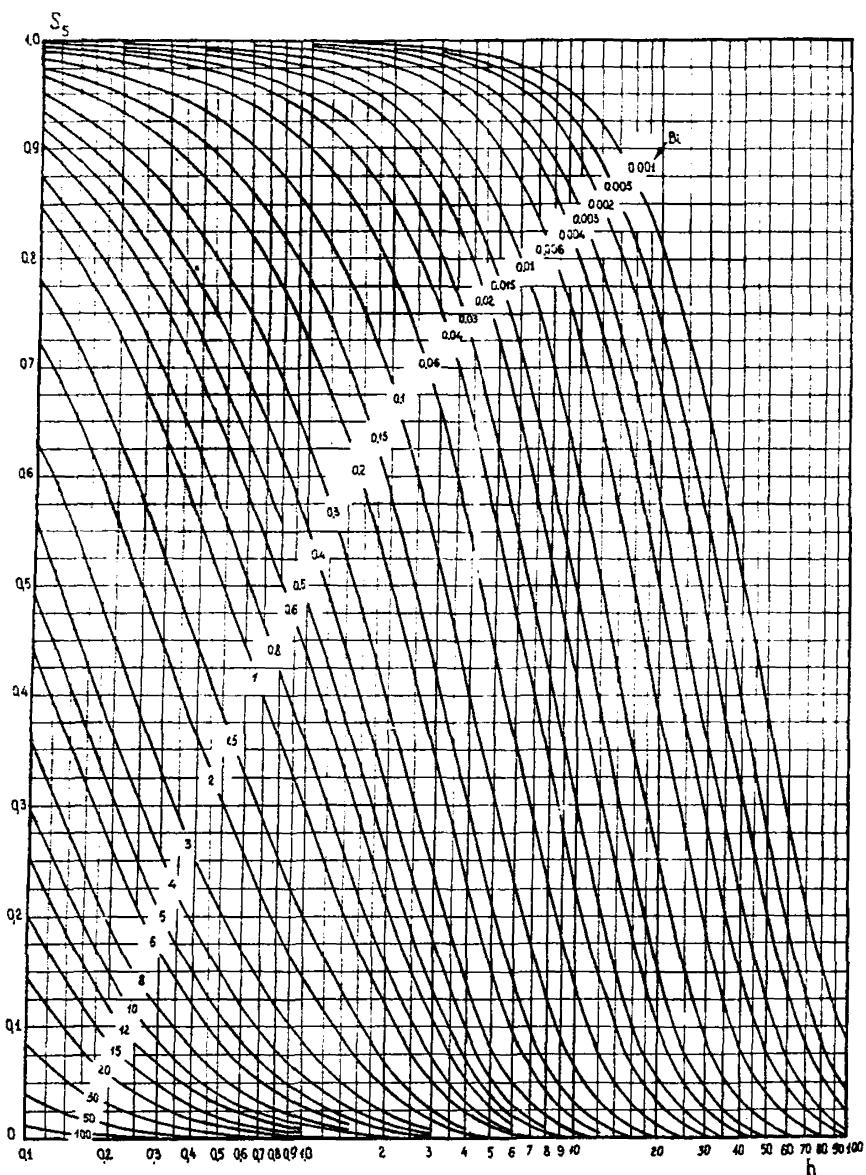


График для определения величины  $S_4$



ПРИЛОЖЕНИЕ IX

График для определения величины  $S_5$



## ПРИЛОЖЕНИЕ X

## Т а б л и ц а I

Поправочные коэффициенты для расчета конструкций  
с несквозным теплопроводным включением

$B_{i_2}$	$B_{i_1}$	K	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_6$	$\varepsilon_8$	$\varepsilon_7$
27 $0,8 \leq B_{i_2} < 3$	$0,5 \leq B_{i_1} < I$	$0,2 \leq \kappa < 0,3$	I,II	0,64	0,88	0,78
		$0,3 \leq \kappa < 0,5$	I,05	0,76	0,99	0,86
		$0,5 \leq \kappa \leq I$	I,01	0,91	I,02	0,96
	$I \leq B_{i_1} \leq I,5$	$0,2 \leq \kappa < 0,3$	I,I4	0,58	0,73	0,75
		$0,3 \leq \kappa < 0,5$	I,08	0,73	0,92	0,84
		$0,5 \leq \kappa \leq I$	I,02	0,91	I,01	0,95
3 $\leq B_{i_2} \leq 10$	$0,5 \leq B_{i_1} < I$	$0,2 \leq \kappa < 0,3$	I,08	0,61	I,01	0,77
		$0,3 \leq \kappa < 0,5$	I,03	0,73	I,08	0,84
		$0,5 \leq \kappa \leq I$	I,00	0,89	I,03	0,95
	$I \leq B_{i_1} \leq I,5$	$0,2 \leq \kappa < 0,3$	I,I2	0,56	0,86	0,74
		$0,3 \leq \kappa < 0,5$	I,06	0,70	I,02	0,63
		$0,5 \leq \kappa \leq I$	I,01	0,89	I,03	0,95

Таблица 2

Поправочные коэффициенты для расчета конструкций  
с несквозным изоляционным включением и ребристых

$B_{i_2}$	$B_{i_1}$	$K$	Номер строки
$0,5 \leq B_{i_2} < 1$	$2 \leq B_{i_1} < 5$	$I \leq K \leq 2$	I
		$2 \leq K \leq 5$	2
		$5 \leq K \leq 10$	3
	$5 \leq B_{i_1} < 10$	$I \leq K \leq 2$	4
		$2 \leq K \leq 5$	5
		$5 \leq K \leq 10$	6
	$10 \leq B_{i_1} \leq 20$	$I \leq K \leq 2$	7
		$2 \leq K \leq 5$	8
		$5 \leq K \leq 10$	9
$I \leq B_{i_2} < 3$	$2 \leq B_{i_1} < 5$	$I \leq K \leq 2$	IO
		$2 \leq K \leq 5$	II
		$5 \leq K \leq 10$	I2
	$5 \leq B_{i_1} < 10$	$I \leq K \leq 2$	I3
		$2 \leq K \leq 5$	I4
		$5 \leq K \leq 10$	I5
	$10 \leq B_{i_1} \leq 20$	$I \leq K \leq 2$	I6
		$2 \leq K \leq 5$	I7
		$5 \leq K \leq 10$	I8
$3 \leq B_{i_2} \leq 6$	$2 \leq B_{i_1} < 5$	$I \leq K \leq 2$	I9
		$2 \leq K \leq 5$	20
		$5 \leq K \leq 10$	2I
	$5 \leq B_{i_1} \leq 10$	$I \leq K \leq 2$	22
		$2 \leq K \leq 5$	23
		$5 \leq K \leq 10$	24
	$10 \leq B_{i_1} \leq 20$	$I \leq K \leq 2$	25
		$2 \leq K \leq 5$	26
		$5 \leq K \leq 10$	27

Таблица 2 (продолжение)

Номер строки	$I \leq m \leq 2$											
	$0,5 \leq a \leq I$											
	$0,5 \leq p \leq I$						$I \leq p \leq I,5$					
	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_6$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_7$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon_8$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_6$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_7$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon_8$
1	0,97	I,12	I,04	I,06	I,05	I,01	0,96	I,16	I,05	I,09	I,07	I,02
2	0,90	I,25	I,03	I,14	I,08	I,08	0,89	I,33	I,06	I,21	I,13	I,14
3	0,86	I,31	0,99	I,17	I,07	I,10	0,84	I,41	I,04	I,27	I,14	I,19
4	0,95	I,15	I,07	I,07	I,07	I,00	0,94	I,20	I,10	I,10	I,10	I,01
5	0,87	I,32	I,08	I,17	I,12	I,08	0,85	I,43	I,15	I,25	I,20	I,15
6	0,81	I,40	I,03	I,20	I,10	I,11	0,78	I,54	I,12	I,31	I,21	I,20
7	0,94	I,16	I,10	I,08	I,09	I,00	0,93	I,22	I,14	I,11	I,12	I,01
8	0,86	I,36	I,13	I,19	I,16	I,08	0,82	I,49	I,24	I,29	I,26	I,15
9	0,79	I,45	I,07	I,22	I,14	I,12	0,75	I,64	I,20	I,35	I,27	I,22
10	0,97	I,10	I,01	I,07	I,04	I,04	0,96	I,13	I,02	I,09	I,06	I,06
II	0,92	I,25	0,96	I,17	I,07	I,11	0,90	I,32	0,98	I,25	I,13	I,19
I2	0,89	I,32	0,89	I,23	I,07	I,15	0,88	I,43	0,93	I,34	I,15	I,26
I3	0,95	I,13	I,04	I,08	I,06	I,02	0,94	I,17	I,06	I,11	I,09	I,05
I4	0,88	I,30	I,00	I,19	I,11	I,11	0,86	I,40	I,04	I,28	I,18	I,19
I5	0,84	I,39	0,92	I,24	I,10	I,15	0,80	I,53	0,98	I,37	I,20	I,26
I6	0,95	I,15	I,08	I,08	I,02	I,02	0,93	I,19	I,11	I,11	I,11	I,04
I7	0,87	I,34	I,04	I,20	I,14	I,11	0,83	I,46	I,12	I,30	I,23	I,19
I8	0,81	I,44	0,95	I,25	I,13	I,15	0,77	I,61	I,04	I,39	I,25	I,27
I9	0,97	I,09	0,98	I,07	I,04	I,06	0,96	I,11	0,98	I,10	I,06	I,09
20	0,98	I,24	0,87	I,20	I,08	I,14	0,92	I,31	0,86	I,28	I,13	I,23
21	0,92	I,33	0,74	I,27	I,09	I,18	0,92	I,44	0,76	I,40	I,18	I,31
22	0,96	I,12	I,01	I,08	I,06	I,05	0,94	I,15	I,01	I,11	I,08	I,08
23	0,90	I,29	0,89	I,21	I,11	I,14	0,87	I,38	0,90	I,30	I,18	I,23
24	0,87	I,39	0,75	I,28	I,11	I,18	0,84	I,52	0,78	I,42	I,21	I,31
25	0,95	I,13	I,04	I,08	I,07	I,04	0,93	I,17	I,05	I,12	I,10	I,06
26	0,88	I,32	0,92	I,22	I,14	I,13	0,84	I,44	0,96	I,32	I,22	I,22
27	0,83	I,43	0,76	I,28	I,13	I,18	0,79	I,59	0,81	I,43	I,25	I,31

Таблица 2 (продолжение)

Номер строки	$I \leq m \leq 2$											
	$0,5 \leq \alpha \leq I$						$I \leq \alpha \leq 1,5$					
	$I,5 \leq \rho \leq 2$						$0,5 \leq \rho \leq I$					
	$\mathcal{E}_1$	$\mathcal{E}_6$	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$	$\mathcal{E}_1$	$\mathcal{E}_6$	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$
I	0,95	I,18	I,06	I,10	I,08	I,03	0,97	I,13	I,04	I,06	I,05	0,99
2	0,87	I,39	I,09	I,26	I,17	I,18	0,91	I,28	I,02	I,13	I,08	I,04
3	0,83	I,48	I,09	I,34	I,19	I,25	0,88	I,35	0,97	I,16	I,07	I,06
4	0,93	I,23	I,II	I,12	I,12	I,02	0,97	I,16	I,08	I,07	I,06	0,98
5	0,83	I,5I	I,20	I,32	I,26	I,20	0,89	I,35	I,07	I,15	I,II	I,04
6	0,76	I,65	I,19	I,40	I,29	I,28	0,85	I,44	I,01	I,18	I,10	I,06
7	0,92	I,25	I,17	I,13	I,15	I,02	0,96	I,17	I,10	I,07	I,07	0,97
8	0,81	I,59	I,32	I,36	I,34	I,2I	0,90	I,39	I,II	I,17	I,13	I,04
9	0,72	I,78	I,30	I,45	I,38	I,3I	0,84	I,50	I,04	I,19	I,12	I,06
I0	0,95	I,15	I,02	I,II	I,07	I,07	0,97	I,II	I,01	I,06	I,04	I,02
II	0,89	I,37	0,99	I,3I	I,16	I,24	0,93	I,27	0,93	I,16	I,08	I,07
I2	0,87	I,50	0,96	I,43	I,2I	I,34	0,92	I,36	0,84	I,2I	I,08	I,09
I3	0,93	I,20	I,07	I,13	I,10	I,06	0,97	I,14	I,04	I,07	I,05	I,0I
I4	0,84	I,47	I,07	I,35	I,23	I,25	0,9I	I,33	0,97	I,17	I,10	I,07
I5	0,78	I,63	I,02	I,47	I,27	I,35	0,89	I,43	0,86	I,22	I,10	I,09
I6	0,92	I,22	I,13	I,14	I,13	I,05	0,96	I,16	I,07	I,08	I,06	I,00
I7	0,81	I,55	I,17	I,38	I,30	I,25	0,9I	I,37	I,00	I,19	I,12	I,06
I8	0,74	I,73	I,II	I,50	I,34	I,36	0,87	I,48	0,88	I,23	I,12	I,09
I9	0,95	I,12	0,97	I,12	I,07	I,II	0,98	I,10	0,97	I,07	I,04	I,04
20	0,9I	I,36	0,86	I,35	I,17	I,30	0,95	I,27	0,8I	I,18	I,09	I,09
2I	0,92	I,5I	0,77	I,50	I,24	I,4I	0,95	I,36	0,63	I,25	I,10	I,12
22	0,94	I,17	I,02	I,13	I,10	I,09	0,97	I,13	I,00	I,07	I,05	I,03
23	0,85	I,45	0,92	I,37	I,23	I,29	0,93	I,33	0,83	I,19	I,II	I,09
24	0,82	I,6I	0,80	I,52	I,29	I,4I	0,9I	I,43	0,64	I,26	I,12	I,12
25	0,92	I,20	I,07	I,14	I,12	I,08	0,97	I,14	I,03	I,08	I,06	I,02
26	0,82	I,5I	0,99	I,39	I,28	I,29	0,92	I,36	0,85	I,20	I,12	I,08
27	0,76	I,70	0,85	I,55	I,34	I,42	0,89	I,48	0,64	I,26	I,13	I,II

Таблица 2 (продолжение)

Номер строки	$1 \leq m \leq 2$											
	$1 \leq \alpha \leq 1,5$											
	$1 \leq \rho \leq 1,5$						$1,5 \leq \rho \leq 2$					
	$\mathcal{E}_1$	$\mathcal{E}_6$	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$	$\mathcal{E}_1$	$\mathcal{E}_6$	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$
1	0,96	I,17	I,07	I,08	I,07	I,00	0,95	I,20	I,08	I,10	I,08	I,01
2	0,88	I,37	I,07	I,20	I,14	I,09	0,86	I,43	I,10	I,25	I,18	I,14
3	0,84	I,47	I,02	I,25	I,14	I,14	0,82	I,54	I,07	I,33	I,21	I,20
4	0,95	I,21	I,11	I,09	I,09	0,99	0,94	I,25	I,14	I,11	I,11	0,99
5	0,86	I,47	I,15	I,24	I,19	I,09	0,84	I,56	I,20	I,30	I,25	I,14
6	0,80	I,61	I,09	I,29	I,19	I,14	0,76	I,72	I,16	I,38	I,28	I,22
7	0,95	I,23	I,15	I,10	I,10	0,98	0,95	I,27	I,18	I,13	I,13	0,98
8	0,86	I,53	I,22	I,26	I,22	I,10	0,83	I,64	I,31	I,34	I,30	I,14
9	0,78	I,70	I,15	I,32	I,23	I,15	0,75	I,86	I,26	I,42	I,34	I,23
I0	0,96	I,14	I,02	I,09	I,06	I,04	0,95	I,16	I,02	I,11	I,08	I,06
II	0,91	I,35	0,94	I,24	I,13	I,14	0,89	I,40	0,95	I,30	I,18	I,19
I2	0,89	I,47	0,86	I,32	I,16	I,19	0,87	I,54	0,87	I,41	I,23	I,27
I3	0,95	I,18	I,07	I,10	I,08	I,02	0,94	I,21	I,08	I,12	I,10	I,04
I4	0,88	I,44	I,01	I,26	I,17	I,13	0,85	I,52	I,04	I,33	I,23	I,19
I5	0,84	I,59	0,90	I,35	I,20	I,19	0,80	I,69	0,94	I,45	I,28	I,28
I6	0,95	I,20	I,11	I,11	I,09	I,01	0,94	I,24	I,13	I,13	I,12	I,02
I7	0,87	I,50	I,07	I,28	I,21	I,13	0,84	I,59	I,12	I,36	I,27	I,19
I8	0,81	I,67	0,95	I,37	I,23	I,19	0,78	I,80	I,01	I,48	I,33	I,28
I9	0,96	I,12	0,96	I,10	I,06	I,07	0,96	I,14	0,95	I,12	I,08	I,10
20	0,93	I,34	0,79	I,27	I,15	I,18	0,92	I,39	0,77	I,33	I,19	I,24
21	0,93	I,47	0,62	I,38	I,20	I,23	0,92	I,54	0,61	I,48	I,27	I,33
22	0,95	I,16	I,00	I,11	I,08	I,05	0,94	I,18	I,01	I,13	I,10	I,07
23	0,89	I,43	0,83	I,29	I,18	I,17	0,87	I,49	0,83	I,36	I,23	I,23
24	0,87	I,58	0,63	I,40	I,22	I,23	0,84	I,67	0,63	I,51	I,31	I,33
25	0,95	I,18	I,05	I,11	I,09	I,04	0,94	I,21	I,06	I,13	I,11	I,06
26	0,88	I,48	0,87	I,30	I,20	I,16	0,85	I,56	0,89	I,38	I,24	I,23
27	0,84	I,65	0,65	I,41	I,25	I,23	0,80	I,78	0,66	I,53	I,34	I,33

Таблица 2 (продолжение)

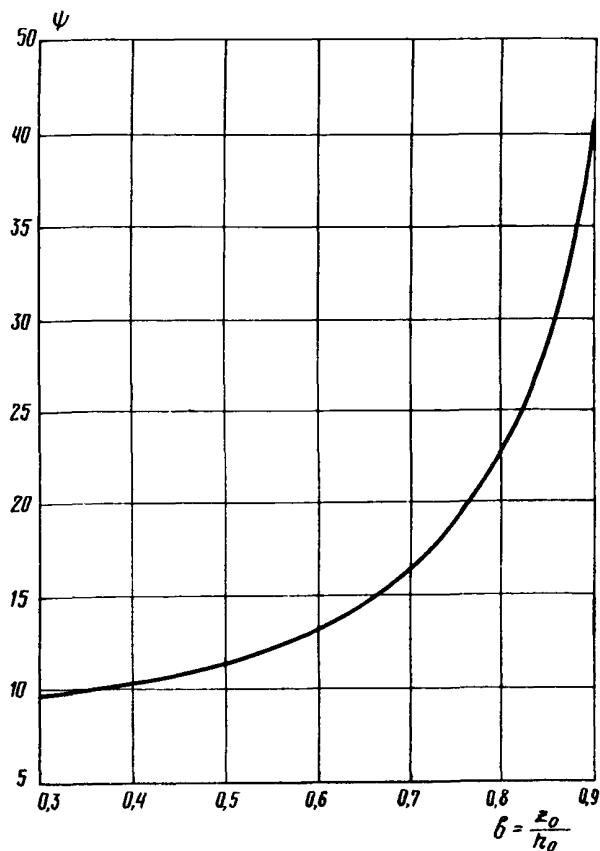
Номер строки	$2 \leq m$											
	$0,5 \leq \alpha \leq 1$											
	$0,5 \leq \rho \leq 1$				$1 \leq \rho \leq 1,5$				$1,5 \leq \rho \leq 2$			
	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$
I	I,08	I,06	I,07	I,01	I,12	I,10	I,11	I,03	I,15	I,12	I,13	I,04
2	I,08	I,16	I,12	I,09	I,15	I,26	I,20	I,17	I,20	I,35	I,26	I,24
3	I,03	I,19	I,10	I,12	I,11	I,33	I,21	I,23	I,18	I,46	I,30	I,34
4	I,14	I,07	I,10	I,00	I,20	I,11	I,14	I,02	I,24	I,14	I,18	I,03
5	I,16	I,18	I,17	I,09	I,27	I,31	I,29	I,18	I,36	I,41	I,38	I,26
6	I,09	I,22	I,15	I,12	I,22	I,38	I,30	I,26	I,34	I,54	I,43	I,38
7	I,18	I,08	I,11	I,00	I,26	I,12	I,16	I,01	I,33	I,15	I,20	I,03
8	I,21	I,20	I,20	I,09	I,38	I,34	I,35	I,19	I,52	I,45	I,48	I,27
9	I,13	I,24	I,18	I,13	I,32	I,42	I,37	I,27	I,50	I,60	I,54	I,41
10	I,04	I,07	I,06	I,04	I,05	I,11	I,08	I,07	I,06	I,14	I,10	I,09
II	0,98	I,19	I,09	I,12	I,00	I,30	I,16	I,23	I,01	I,40	I,21	I,31
12	0,90	I,25	I,09	I,16	0,92	I,42	I,19	I,31	0,95	I,56	I,27	I,45
13	I,08	I,08	I,08	I,03	I,12	I,12	I,12	I,05	I,15	I,15	I,15	I,07
14	I,04	I,21	I,14	I,12	I,10	I,34	I,24	I,23	I,15	I,44	I,32	I,32
15	0,94	I,26	I,13	I,16	I,01	I,45	I,26	I,32	I,07	I,62	I,38	I,47
16	I,14	I,08	I,10	I,02	I,20	I,13	I,14	I,04	I,24	I,14	I,18	I,06
17	I,10	I,22	I,17	I,12	I,20	I,36	I,30	I,23	I,28	I,48	I,41	I,32
18	0,98	I,28	I,16	I,17	I,09	I,48	I,32	I,33	I,19	I,66	I,47	I,48
19	0,98	I,08	I,05	I,07	0,96	I,13	I,07	I,11	0,95	I,16	I,08	I,15
20	0,86	I,21	I,09	I,15	0,82	I,34	I,15	I,28	0,80	I,45	I,20	I,39
21	0,72	I,29	I,09	I,20	0,69	I,49	I,20	I,38	0,67	I,66	I,28	I,55
22	I,03	I,09	I,07	I,05	I,04	I,13	I,10	I,09	I,04	I,16	I,13	I,12
23	0,91	I,23	I,13	I,15	0,90	I,37	I,22	I,27	0,90	I,48	I,30	I,38
24	0,75	I,30	I,13	I,20	0,74	I,51	I,26	I,38	0,73	I,69	I,38	I,55
25	I,08	I,09	I,09	I,04	I,11	I,14	I,13	I,08	I,13	I,17	I,16	I,10
26	0,95	I,24	I,16	I,15	0,98	I,38	I,27	I,27	I,00	I,51	I,37	I,38
27	0,77	I,31	I,15	I,20	0,78	I,53	I,31	I,38	0,81	I,72	I,46	I,55

Таблица 2 (продолжение)

Номер строки	$2 \leq m$											
	$I \leq a \leq I,5$											
	$0,5 \leq p \leq I$				$I \leq p \leq I,5$				$I,5 \leq p \leq 2$			
	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_7$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_8$
I	I,07	I,06	I,05	0,99	I,II	I,08	I,08	I,00	I,I4	I,I0	I,II	I,01
2	I,05	I,I3	I,09	I,04	I,II	I,22	I,I6	I,I0	I,I6	I,29	I,23	I,I6
3	0,99	I,I6	I,08	I,06	I,05	I,28	I,I7	I,I5	I,II	I,39	I,26	I,24
4	I,I0	I,06	I,06	0,98	I,I7	I,09	I,I0	0,99	I,22	I,I2	I,I3	0,99
5	I,I0	I,I5	I,I2	I,04	I,20	I,25	I,21	I,I0	I,29	I,34	I,30	I,I6
6	I,02	I,I8	I,I0	I,07	I,I3	I,31	I,22	I,I6	I,23	I,44	I,34	I,25
7	I,I3	I,07	I,07	0,97	I,21	I,I0	I,I2	0,98	I,28	I,I3	I,I5	0,98
8	I,I4	I,I7	I,I4	I,04	I,28	I,28	I,25	I,I0	I,41	I,38	I,35	I,I7
9	I,05	I,I9	I,I2	I,07	I,I9	I,34	I,26	I,I6	I,34	I,49	I,40	I,27
I0	I,02	I,06	I,04	I,02	I,03	I,09	I,07	I,04	I,04	I,I2	I,09	I,06
II	0,94	I,I6	I,08	I,07	0,95	I,26	I,I5	I,I5	0,95	I,34	I,21	I,23
I2	0,84	I,21	I,08	I,I0	0,85	I,35	I,I8	I,21	0,83	I,49	I,27	I,32
I3	I,06	I,07	I,06	I,01	I,I0	I,I0	I,09	I,03	I,I3	I,I3	I,I2	I,04
I4	0,98	I,I8	I,II	I,07	I,03	I,28	I,I9	I,I5	I,06	I,38	I,27	I,22
I5	0,87	I,23	I,I0	I,09	0,91	I,38	I,32	I,21	0,94	I,53	I,33	I,32
I6	I,09	I,07	I,07	I,00	I,I5	I,II	I,I0	I,01	I,I9	I,I4	I,I3	I,03
I7	I,02	I,I9	I,I2	I,06	I,I0	I,30	I,23	I,I4	I,I7	I,41	I,32	I,22
I8	0,89	I,24	I,I2	I,09	0,96	I,40	I,25	I,21	I,02	I,56	I,38	I,33
I9	0,97	I,07	I,04	I,04	0,95	I,II	I,07	I,08	0,93	I,I4	I,08	I,II
I0	0,80	I,I9	I,09	I,I0	0,76	I,29	I,I6	I,I9	0,72	I,39	I,22	I,28
I1	0,62	I,25	I,I0	I,I2	0,57	I,41	I,21	I,25	0,53	I,57	I,31	I,39
I2	I,01	I,08	I,05	I,03	I,02	I,II	I,08	I,06	I,02	I,I4	I,II	I,08
I3	0,83	I,20	I,II	I,09	0,82	I,31	I,I9	I,I8	0,80	I,42	I,27	I,27
I4	0,64	I,26	I,I2	I,I2	0,60	I,43	I,25	I,25	0,56	I,60	I,36	I,38
I5	I,05	I,08	I,06	I,02	I,07	I,I2	I,09	I,05	I,09	I,I5	I,I2	I,07
I6	0,86	I,20	I,I2	I,09	0,87	I,32	I,22	I,I8	0,87	I,43	I,31	I,26
I7	0,64	I,27	I,I3	I,I2	0,62	I,45	I,27	I,25	0,60	I,62	I,40	I,38

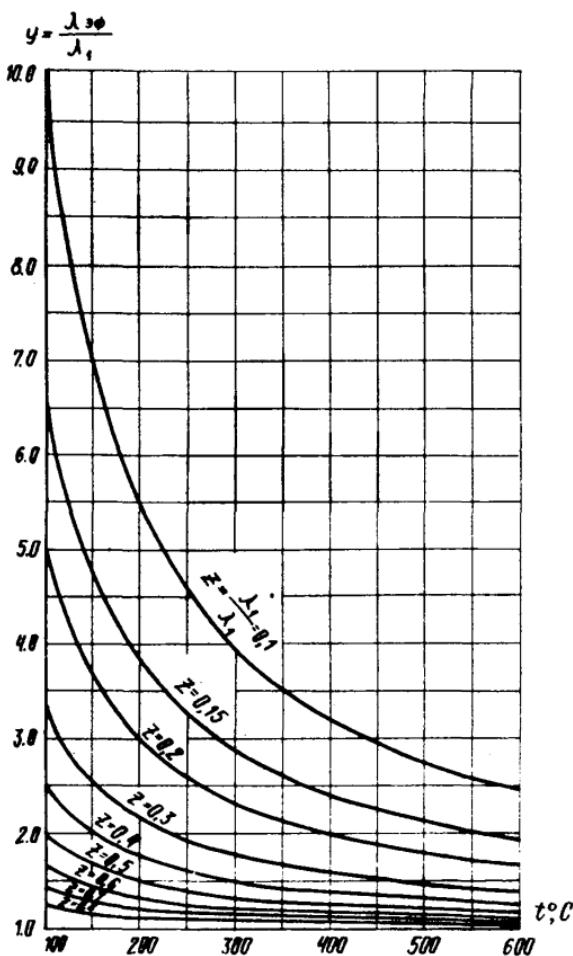
ПРИЛОЖЕНИЕ XI

График для определения величины  $\Psi$



## ПРИЛОЖЕНИЕ XII

## График для определения эффективного коэффициента теплопроводности влажных грунтов



Примеры теплового расчета ограждающих конструкций

## Пример I.

Исходные данные. Двухслойная плоская конструкция ограждения печи: внутренний слой толщиной 0,4 м из жаростойкого бетона на портландцементе с шамотным заполнителем, наружный - из лёгкого жаростойкого керамзитобетона на жидким стекле объемной массой 1200 кг/м<sup>3</sup>. Печь установлена на открытом воздухе, средняя температура наиболее жаркого месяца +24<sup>0</sup>С. Температура газов в печи 1000<sup>0</sup>С.

Требуется. Определить толщину внешнего изоляционного слоя при условии максимальной температуры поверхности 80<sup>0</sup>С.

Решение. По формуле (п. I.2, табл. I) находим коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности

$$\alpha_H = 8,4 + 0,06(80-24) = 11,8 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^0\text{C}.$$

Пользуясь формулами (8) и (4) определяем удельный тепловой поток через конструкцию

$$q = \alpha_H (t_{CH} - t_{\theta}) = 11,8 \cdot (80-24) = 661 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}.$$

Из табл. 2, п. I.3 находим коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности  $\alpha_B = 95 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^0\text{C}$  и по формуле (5) определяем температуру на внутренней поверхности ограждения

$$t_{CH} = 1000 - \frac{661}{95} = 993 {}^0\text{C}.$$

Дальнейший расчёт производим по графику приложения II. При перепаде температуры на наружной и внутренней поверхностях ограждения  $\Delta t = 993-80 = 913 {}^0\text{C}$  и удельном тепловом потоке  $q = 661 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$  определяем требуемое термическое сопротивление конструкции, оно равно 1,38. При средней температуре конструкции (п. I.5) 512<sup>0</sup>С по приложению I находим коэффициенты теплопроводности:

для бетона на портландцементе с шамотным заполнителем  $\lambda_1 = 0,88 \text{ ккал/м} \cdot \text{с} \cdot {}^0\text{C}$ ;

для бетона на жидким стекле с керамзитовым заполнителем  
 $\lambda_2 = 0,50 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$ .

По графику при  $\delta_r = 0,4 \text{ м}$  и  $A_r = 0,88 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$  определяем термическое сопротивление внутреннего слоя  $0,45 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$ , тогда термическое сопротивление наружного слоя должно быть  $1,38-0,45 = 0,93 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$ . По графику находим при  $\lambda_2 = 0,50 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$  требуемую толщину, она равна  $0,47 \text{ м}$ . Определяем при  $q = 661 \text{ ккал}/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  и  $R = 0,45 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$  перепад температур во внутреннем слое  $297^{\circ}\text{C}$ , тогда температура на границе слоев  $993-297 = 696^{\circ}\text{C}$ , а средние температуры слоев:

$$\text{внутреннего } \frac{993+696}{2} = 845^{\circ}\text{C},$$

$$\text{наружного } \frac{696+80}{2} = 388^{\circ}\text{C}.$$

Для найденных температур уточняем коэффициенты теплопроводности  $\lambda_r = 1,07$ ,  $\lambda_2 = 0,46 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$ .

Находим новое значение  $R$ , при  $\delta_r = 0,4 \text{ м}$  и  $\lambda_r = 1,07 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C} - 0,37 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$ , отсюда требуемое сопротивление  $R_2$  должно быть  $1,38-0,37 = 1,01 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$ . При  $\lambda_2 = 0,46 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$  толщина наружного слоя  $0,41 \text{ м}$ . Затем для  $q = 661 \text{ ккал}/\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$  и  $R = 0,37 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$  находим перепад температур во внутреннем слое  $245^{\circ}$ , тогда температура на границе слоев равна  $748^{\circ}\text{C}$ , а средние температуры слоев:

$$\text{внутреннего } \frac{993+748}{2} = 870^{\circ}\text{C} \text{ и}$$

$$\text{наружного } \frac{748+80}{2} = 414^{\circ}\text{C}.$$

Найденные при этих температурах коэффициенты теплопроводности отличаются от принятых в предыдущем шаге менее чем на 10%, поэтому (п. I.5) расчет на этом заканчиваем. Толщина слоя из керамзитобетона получилась равной  $0,41 \text{ м}$ .

### Пример 2.

Исходные данные. Круглый газопровод с внутренним диаметром 0,8 м и длиной 100 м расположен на открытом воздухе, допустимые потери тепла газопроводом 500000 ккал/ч, температура газов  $+700^{\circ}\text{C}$ , средняя годовая температура  $+10^{\circ}\text{C}$ , средняя скорость ветра 3 м/с.

Требуется. Определить толщину футеровки газопровода из жаростойкого керамзитобетона объемной массой  $1200 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Решение. Расчет выполняем с помощью графика приложения III.

Удельный поток на единицу длины газопровода  $500000/100=5000 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}$ .

Для  $\Delta t = 700-10 = 690^\circ\text{C}$  и  $q' = 5000 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}$  по левой части графика находим требуемое сопротивление, оно равно  $0,138 \text{ м}\cdot\text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}/\text{ккал}$ ; по приложению I при средней температуре  $355^\circ\text{C}$  находим коэффициент теплопроводности  $0,45 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}$  и по правой части графика при  $R = 0,138$ ; пренебрегая внешним и внутренним сопротивлениями определяем отношение внешнего и внутреннего диаметров футеровки 1,47, откуда  $d_H = 1,47 \cdot 0,8 = 1,18 \text{ м}$ . По формуле (см. п. I.2 табл. I) и по табл. 2 находим коэффициенты теплоотдачи на внешней и внутренней поверхностях  $\alpha_H = 3+10\sqrt{3} = 20,5 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}$  и  $\alpha_B = 40 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}$ , а по графику находим внешнее и внутреннее сопротивления теплоотдаче  $0,014$  и  $0,01 \text{ м}\cdot\text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}/\text{ккал}$ .

Пользуясь левой частью графика найдем перепад температур между температурой наружной поверхности и воздуха при  $R'_H = 0,014 \text{ м}\cdot\text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}/\text{ккал}$  и  $q' = 5000 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}$ , он равен  $70^\circ\text{C}$ , а также перепад температур между температурой газов и внутренней поверхностью при  $R'_B = 0,01 \text{ м}\cdot\text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}/\text{ккал}$  и  $q' = 5000 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}$ . Следовательно температура наружной поверхности  $80^\circ\text{C}$ , температура внутренней поверхности  $650^\circ\text{C}$  и средняя температура футеровки:  $\frac{650+80}{2} = 365^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности при этом равен  $0,45 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}$ . Требуемое термическое сопротивление футеровки равно  $0,138-0,024 = 0,114 \text{ м}\cdot\text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}/\text{ккал}$ , тогда по графику получаем  $d_H/d_B = 1,37$ , откуда  $d_H = 0,8 \cdot 1,37 = 1,10 \text{ м}$ , а толщина футеровки  $0,15 \text{ м}$ .

При мер 3.

Исходные данные. Ограждение печи из жаростойкого керамзитобетона с объемной массой  $1500 \text{ кг}/\text{м}^3$  содержит сквозные теплопроводные включения из жаростойкого бетона на портландцементе с шамотным заполнителем. Температура среды внутри печи  $430^\circ\text{C}$ , температура окружающей среды  $20^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности  $\alpha_H = 10 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^\circ\text{C}$ . Геометрические размеры (см. рис. 2, схема а):  $\delta' = 0,4 \text{ м}$ ;  $\ell_1 = 0,16 \text{ м}$ ;  $\ell_2 = 1 \text{ м}$ .

Требуется. Определить максимальную температуру арматуры  $t_a$ , находящейся на расстоянии  $\delta_a = 0,3$  м от нагретой поверхности и влияние теплопроводных включений на изменение потока тепла через ограждение.

Решение. В соответствии с п. 3.4 определяем температуру на нагретой поверхности. По п. 1.5 находим среднюю температуру конструкции

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_a + t_h}{2} = \frac{430+20}{2} = 225^{\circ}\text{C}.$$

По приложению I выбираем значения коэффициентов теплопроводности для жаростойкого бетона с керамзитовым заполнителем  $\lambda = 0,47$  ккал/м·ч· $^{\circ}\text{C}$  и для жаростойкого бетона с шамотным заполнителем  $\lambda_1 = 0,71$  ккал/м·ч· $^{\circ}\text{C}$ . Учитывая значения коэффициентов теплоотдачи на внутренней и внешней поверхности  $\alpha_b = 16$  ккал/м·ч· $^{\circ}\text{C}$  (см. табл. 2) и  $\alpha_h = 10$  ккал/м·ч· $^{\circ}\text{C}$  находим термическое сопротивление плоской стенки  $1,01 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{ккал}$ , тепловой поток  $404$  ккал/м $^2$ ·ч и температуру на внутренней поверхности

$$t_{c,b} = 430 - \frac{404}{16} = 405^{\circ}\text{C}.$$

По п. 3.5 определяем значения параметров:

$$\alpha_1 = \frac{0,16}{0,4} = 0,4; \quad \alpha_2 = \frac{1}{0,4} = 2,5;$$

$$B_{i_1} = \frac{10 \cdot 0,4}{0,71} = 5,6; \quad B_{i_2} = \frac{10 \cdot 0,4}{0,47} = 8,5.$$

По графикам приложений IV-У1 (п. 3.7) находим:

$$\Sigma_1 = S_1 \text{ (} \alpha = 0,4; B_i = 5,6 \text{)} = 0,78;$$

$$\Sigma_2 = (S_1 = 2,5; B_i = 8,5) = 0,17;$$

$$\Sigma_3 = S_2 \text{ (} \alpha = 0,4; B_i = 5,6 \text{)} = 0,52;$$

$$\Sigma_4 = (S_2 = 2,5; B_i = 8,5) = 0,11;$$

$$\Sigma_5 = S_3 \text{ (} \alpha = 0,4; B_i = 5,6 \text{)} = 0;$$

$$\Sigma_6 = (S_3 = 2,5; B_i = 8,5) = 0,08.$$

Вычисляем значение величины  $C$  по п. 3.5:

$$C = \frac{10 \cdot 0,16 \cdot 0,78 + 10 \cdot 1 \cdot 0,17}{0,16 \cdot (10 + \frac{0,71}{0,4}) \cdot 0,78 + 1 \cdot (10 + \frac{0,47}{0,4}) \cdot 0,17} = 0,868.$$

По формулам (I7-I9) находим безразмерные температуры в точках I, 2, 3:

$$\theta_1 = 1 - 0,868 + 0,4 \cdot 0,4 [0,868 - 5,6 \cdot (1 - 0,868)] \cdot 0,52 = 0,143;$$

$$\theta_2 = 1 - 0,868 = 0,132;$$

$$\theta_3 = 1 - 0,868 + 0,4 \cdot 2,5 [0,868 - 8,5 \cdot (1 - 0,868)] \cdot 0,11 = 0,104.$$

По формуле (43) находим истинные температуры в точках 1, 2, 3:

$$t_1 = 75^\circ; \quad t_2 = 71^\circ, \quad t_3 = 60^\circ.$$

Принимая за среднюю температуру поверхности включения

$$t_{\text{с.н.}}^{\text{вкл}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{75 + 71}{2} = 73^\circ\text{C},$$

а за среднюю температуру поверхности основного материала

$$t_{\text{с.н.}}^{\text{осн}} = \frac{t_2 + t_3}{2} = \frac{76 + 60}{2} = 65^\circ\text{C},$$

находим средние температуры по включению  $t_{\text{вкл}}^{\text{вкл}}$  и по основному материалу  $t_{\text{вкл}}^{\text{осн}}$ ,

$$t_{\text{вкл}}^{\text{вкл}} = \frac{405 + 73}{2} = 239^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{вкл}}^{\text{осн}} = \frac{405 + 65}{2} = 235^\circ\text{C}.$$

По приложению I уточним значения коэффициентов теплопроводности:  $\lambda = 0,48$  ккал/м·ч·°C,  $\lambda_1 = 0,72$  ккал/м·ч·°C.

Так как уточненные коэффициенты теплопроводности отличаются от первоначальных менее чем на 10%, расчет температур на этом заканчиваем.

В соответствии с п. 3.8 находим максимальную температуру арматуры

$$t_0 = 405 - \frac{405 - 75}{0,4} \cdot 0,3 = 162^\circ\text{C}.$$

По п. 3.6 вычисляем значения величин  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ :

$$\gamma_1 = 0,868,$$

$$\gamma_2 = 0,868 - 0,8 \cdot [0,868 - 8,5 (1 - 0,868)] \cdot 0,08 = 0,884$$

и поправочный коэффициент  $\eta$  для определения  $\varphi_{\text{вкл}}$

$$\eta = \frac{10 + \frac{0,47}{0,4}}{10 + 0,47(0,16 + 1)} (0,71 \cdot 0,16 + 0,868 + 0,47 \cdot 1 \cdot 0,884) = 1,06.$$

Приходим к выводу, что наличие включений увеличивает поток тепла через конструкцию в 1,06 раза по сравнению со стенкой без включений.

Пример 4.

Исходные данные. Панель ребристой конструкции из жаростойкого бетона на портландцементе с шамотным заполнителем. Трехмерная изоляция панели выполнена из легкого жаростойкого бетона объемной массой 1500 кг/м<sup>3</sup> на портландцементе с керамзитовым заполнителем. Температура внутри агрегата 900°C, температура окружающего воздуха 40°C. Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности  $d_H = 10 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$ . Геометрические размеры (см. рис. 2, схема е):

$$l_1 = 0,375 \text{ м}; \quad l_2 = 0,15 \text{ м}; \quad d_1 = 0,15 \text{ м}; \quad d_2 = 0,15 \text{ м}; \\ d_p = 0,15 \text{ м}.$$

Требуется. Определить распределение температуры в сечениях I, II, III (рис. 2, схема 6) и удельный поток тепла через панель.

Решение. Согласно п. 3.4 определяем температуру на нагретой поверхности, по п. 1.5 находим среднюю температуру конструкции.

$$t_{cp} = \frac{t_b + t_n}{2} = \frac{900 + 40}{2} = 470^\circ\text{C}.$$

Выбираем по приложению I значения коэффициентов теплопроводности для жаростойкого бетона с шамотным заполнителем  $\lambda = 0,85 \text{ ккал}/\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$ , а для жаростойкого бетона с керамзитовым заполнителем  $\lambda_1 = 0,61 \text{ ккал}/\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$ . Учитывая, что согласно табл. 2  $\alpha_b = 70 \text{ ккал}/\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$ , по формуле (2) вычисляем удельный тепловой поток для двуслойной стенки

$$\varphi = \frac{900-40}{\frac{1}{70} + \frac{0,15}{0,85} + \frac{0,15}{0,61} + \frac{1}{10}} = 1600 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}.$$

По п. 2.3 определяем температуру в точках I и 6 и на нагретой поверхности сечения I

$$t_1 = 40 + 1600 \cdot \frac{1}{10} = 200^\circ\text{C},$$

$$t_6 = 900 - 1600 \cdot \left( \frac{1}{70} + \frac{0,15}{0,85} \right) = 571^\circ\text{C},$$

$$t_{ef} = 900 - 1600 \cdot \frac{1}{70} = 877^\circ\text{C}.$$

Уточняем средние температуры по основному материалу конструкции и тепловой изоляции

$$t_{cp}^{oc} = \frac{877+571}{2} = 724^{\circ}\text{C},$$

$$t_{cp}^{u3} = \frac{571+200}{2} = 385^{\circ}\text{C}.$$

Уточняем значения коэффициентов теплопроводности  $\lambda = 1,01 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$ , и  $\lambda_1 = 0,56 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$ .

Так как значения коэффициентов теплопроводности отличаются от первоначально принятых более чем на 10%, то согласно п. I.5 пересчитываем удельный тепловой поток и температуру

$$q = \frac{900-40}{\frac{1}{70} + \frac{0,15}{1,01} + \frac{0,15}{0,56} + \frac{1}{10}} = 1610 \text{ ккал}/\text{м}^2\cdot\text{ч},$$

$$t_1 = 40 + 1610 \cdot \frac{1}{10} = 201^{\circ}\text{C},$$

$$t_6 = 900 - 1610 \left( \frac{1}{70} + \frac{0,15}{1,01} \right) = 634^{\circ}\text{C},$$

$$t_{cp} = 900 - 1600 \frac{1}{70} = 877^{\circ}\text{C}.$$

Снова уточняем средние температуры по основному материалу конструкции и тепловой изоляции

$$t_{cp}^{oc} = \frac{877+634}{2} = 755^{\circ}\text{C},$$

$$t_{cp}^{u3} = \frac{634+201}{2} = 417^{\circ}\text{C}$$

и значения коэффициентов теплопроводности  $\lambda = 1,01 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$  и  $\lambda_1 = 0,58 \text{ ккал}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot{}^{\circ}\text{C}$ . Так как отличие от предыдущего шага меньше чем на 10%, то принимаем эти значения.

Вычисляем значение величины (п. 3.22).

$$m = \frac{0,375}{0,15} = 2,5.$$

Так как  $m > 2$ , распределение температур по сечению I соответствует найденному для двуслойной стенки.

Согласно п. 3.25 (3.10) вычисляем величины

$$\frac{1}{k} = \frac{2 \cdot 0,15}{0,15} = 2, \quad \beta_t = \frac{10 \cdot 0,15}{2 \cdot 1,01} = 0,75.$$

По кривым приложения УП находим поправочный коэффициент  $\beta = 1,03$  и вычисляем эквивалентный ему коэффициент теплообмена  $\alpha_{\text{экв}} = 1,03 \cdot 10 = 10,3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^{\circ}\text{C}$ .

По формуле (29) вычисляем эквивалентный коэффициент тепло-проводности

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{0,15 + 0,15}{\frac{0,15}{1,01} + \frac{0,15}{0,58}} = 0,72 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot {}^{\circ}\text{C}.$$

Учитывая, что  $\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,3 \text{ м}$ , вычисляем параметры (п. 3.5):

$$a_1 = \frac{0,375}{0,3} = 1,25, \quad a_2 = \frac{0,15}{0,3} = 0,5,$$

$$B_{i_1} = \frac{10 \cdot 0,3}{0,72} = 4,17, \quad B_{i_2} = \frac{10 \cdot 3 \cdot 0,3}{1,01} = 3,08.$$

Из графиков приложений У1-У1 определяем величины:

$$\Sigma_1 = S_1(\alpha = 1,25; \beta_i = 4,17) = 0,480; \quad \Sigma_2 = S_1(\alpha = 0,5; \beta_i = 3,08) = 0,875;$$

$$\Sigma_3 = S_2(\alpha = 1,25; \beta_i = 4,17) = 0,330; \quad \Sigma_4 = S_2(\alpha = 0,5; \beta_i = 3,08) = 0,610;$$

$$\Sigma_5 = S_3(\alpha = 1,25; \beta_i = 4,17) = 0,060; \quad \Sigma_6 = S_3(\alpha = 0,5; \beta_i = 3,08) = 0.$$

Согласно п. 3.5 вычисляем величину  $C$

$$C = \frac{10 \cdot 0,375 \cdot 0,480 + 10 \cdot 3 \cdot 0,15 \cdot 0,875}{0,375 \cdot (10 + \frac{0,72}{0,3}) \cdot 0,480 + 0,15 \cdot (10,3 + \frac{1,01}{0,3}) \cdot 0,875} = 0,777$$

и находим величины  $\theta_2^{\text{исп}}$  и  $\theta_3^{\text{исп}}$

$$\theta_2^{\text{исп}} = 1 - 0,777 = 0,223,$$

$$\theta_3^{\text{исп}} = 1 - 0,777 + 0,4 \cdot [0,777 - 3,08 \cdot (1 - 0,777)] \cdot 0,610 = 0,249.$$

Согласно п. 3.21 вычисляем  $\theta_7^{\text{исп}}$ ,  $\theta_8^{\text{исп}}$

$$\theta_7^{\text{исп}} = \frac{0,15 \cdot 0,223 + 0,15}{0,15 + 0,15} = 0,612,$$

$$\theta_8^{\text{исп}} = \frac{0,15 \cdot 0,249 + 0,15}{0,15 + 0,15} = 0,625.$$

По п. 3.22 находим:

$$m = \frac{0,375}{0,15} = 2,5, \quad A = \frac{0,15}{0,15} = 1, \quad P = \frac{0,15}{0,15} = 1;$$

$$\beta_{i_2} = \frac{10 \cdot 3 \cdot 0,15}{1,01} = 1,55, \quad B_{i_1} = \frac{10 \cdot 0,15}{0,58} = 2,54, \quad K = \frac{1,01}{0,58} = 1,73.$$

Из табл. 2 приложения X находим поправочные коэффициенты  $\xi_2 = 1,03$ ;  $\xi_7 = 1,09$ ;  $\xi_3 = 1,07$ ;  $\xi_8 = 1,04$  и вычисляем безразмерные температуры (п. 3.19):

$$\theta_2 = 1,03 \cdot 0,223 = 0,230;$$

$$\theta_3 = 1,07 \cdot 0,249 = 0,267;$$

$$\theta_7 = 1,09 \cdot 0,612 = 0,667;$$

$$\theta_8 = 1,04 \cdot 0,625 = 0,650.$$

По п. 3.26, используя приложения III и IX, вычисляем безразмерные температуры в точках 4, 5:

$$\theta_4 = \frac{0,230 + 0,267}{2} \cdot 0,267 = 0,066,$$

$$\theta_5 = \frac{0,230 + 0,267}{2} \cdot 0,2 = 0,050.$$

По формуле (43) вычисляем истинные температуры в конструкции:

$$t_2 = 40 + 0,230 \cdot 837 = 232^{\circ}\text{C},$$

$$t_3 = 40 + 0,267 \cdot 837 = 263^{\circ}\text{C},$$

$$t_7 = 40 + 0,667 \cdot 837 = 597^{\circ}\text{C},$$

$$t_8 = 40 + 0,650 \cdot 837 = 584^{\circ}\text{C},$$

$$t_4 = 40 + 0,066 \cdot 837 = 95^{\circ}\text{C},$$

$$t_5 = 40 + 0,050 \cdot 837 = 82^{\circ}\text{C}.$$

Вычисляем величины  $\mathcal{Y}_1$  и  $\mathcal{Y}_2$  (п. 3.6):

$$\mathcal{Y}_1 = 0,777 - 0,8 [0,777 - 4,17(1 - 0,777)] \cdot 0,060 = 0,783$$

и  $\mathcal{Y}_2 = 0,777$

и находим  $\eta$

$$\eta = \frac{10,3 + \frac{1,01}{0,3}}{10,3 \cdot 1,01 (0,375 + 0,15)} (0,72 \cdot 0,375 \cdot 0,783 + 1,01 \cdot 0,15 \cdot 0,777) = 0,84.$$

По п. 3.2 вычисляем удельный тепловой поток через плоскую стенку толщиной 0,3 м с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 1,01$  ккал/м·ч· $^{\circ}\text{C}$  (п. 2.1):

$$\varphi = \frac{900 - 40}{\frac{1}{70} + \frac{0,3}{1,01} + \frac{1}{10}} = 2090 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

По формуле (15) вычисляем удельный тепловой поток через ребристую конструкцию

$$\varphi_{\text{реб}} = 0,84 \cdot 2090 = 1760 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

П р и м е р 5.

Исходные данные. Температура дымовых газов в стакане фундамента трубы  $t_g = 650^{\circ}\text{C}$ , материал и размеры элементов фундамента (см. рис. 3):

Стенка:	шамотная футеровка	$\delta_1' = 0,23 \text{ м.}$
	диатомитовая изоляция	$\delta_2' = 0,235 \text{ м.}$
	минераловатная изоляция	$\delta_3' = 0,15 \text{ м.}$
Стенка:	из карбонитного бетона с шамотным заполнителем	$\delta_4' = 0,985 \text{ м.}$
	наружный радиус стакана	$\xi_H = 3,75 \text{ м.}$
	внутренний радиус футеровки	$\xi_B = 2,15 \text{ м.}$
	высота цилиндрической стенки	$h_c = 4,2 \text{ м.}$
Днище:	шамотная футеровка	$\delta_1 = 0,14 \text{ м.}$
	диатомитовая изоляция	$\delta_2 = 0,35 \text{ м.}$
	бетонная плита	$\delta_3 = 1,2 \text{ м.}$

Среднегодовая температура воздуха  $t_H = 0^{\circ}\text{C}$ ;

Вид грунта - песок влажный.

Требуется. Найти распределение максимальных температур в элементах цилиндрической стенки и днища фундамента для случая, когда грунтовая вода находится значительно ниже подошвы фундамента.

а) Расчет температур в цилиндрической стенке  
фундамента

Предварительно задаемся температурами на границах слоёв и принимаем по приложению I коэффициенты теплопроводности (ккал/м·ч·°C) по средней температуре для каждого слоя:

$$\lambda_1 = 0,98, \quad \lambda_2 = 0,24, \\ \lambda_3 = 0,131, \quad \lambda_4 = 0,81.$$

Определяем термические сопротивления (м·ч·°C/ккал) для каждого слоя по формуле (10):

$$R_1' = \frac{I}{6,28 \cdot 0,98} \cdot \ell_n \frac{2,38}{2,15} = 0,0169;$$

$$R_2' = \frac{I}{6,28 \cdot 0,24} \cdot \ell_n \frac{2,615}{2,38} = 0,0630;$$

$$R_3' = \frac{I}{6,28 \cdot 0,131} \cdot \ell_n \frac{2,765}{2,615} = 0,0705;$$

$$R_4' = \frac{I}{6,28 \cdot 0,81} \cdot \ell_4 \cdot \frac{3,75}{2,765} = 0,0596;$$

$$\sum_{i=1}^2 R_i' = 0,0799; \quad \sum_{i=1}^3 R_i' = 0,1504; \quad \sum_{i=1}^4 R_i' = 0,21.$$

Вычисляя термическое сопротивление теплоотдаче от газа к стенке (по формуле II) для  $\alpha_b = 40$  ккал/м<sup>2</sup>·ч·°С (по табл. 2)

$$R_b' = \frac{I}{3,14 \cdot 2 \cdot 3,75 \cdot 40} = 0,001 \text{ м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}/\text{ккал} \quad \text{и параметр}$$

$\alpha = \frac{3,75}{4,2} = 0,893$ . Определяя по приложению XI при  $\beta = 0,3$  значение величины  $\Psi = 9,8$ , а по приложению XII эффективный коэффициент теплопроводности грунта при  $\lambda_{gr.c} = 0,3$  ккал/м·ч·°С и  $\lambda_{gr.b} = 1,0$  ккал/м·ч·°С, и принимая ориентировочно  $t_{c,n} = 350^{\circ}\text{C}$ , получим  $\lambda_{gr.\varphi} = 0,38$  ккал/м·ч·°С, а затем находим температуру на наружной поверхности стенки (по формуле 44).

$$t_{c,n} = \frac{650}{I + 0,38 \cdot 0,893 \cdot 9,8 \cdot (0,001 + 0,21)} = 382^{\circ}\text{C}.$$

Определяем температуру (°С) на границах слоев (по формуле 46):

$$t_{c,1} = 650 - (650 - 382) \cdot \frac{0,001}{0,211} = 649;$$

$$t_{c,2} = 650 - (650 - 382) \cdot \frac{0,0179}{0,211} = 627;$$

$$t_{c,3} = 650 - (650 - 382) \cdot \frac{0,0809}{0,211} = 547;$$

$$t_{c,4} = 650 - (650 - 382) \cdot \frac{0,1514}{0,211} = 458;$$

и среднюю температуру слоев (°С):

$$t_{1,cr} = \frac{649 + 627}{2} = 638,$$

$$t_{2,cr} = \frac{627 + 547}{2} = 587,$$

$$t_{3,cr} = \frac{547 + 458}{2} = 502,$$

$$t_{4,cr} = \frac{458 + 382}{2} = 420.$$

так как принятые коэффициенты теплопроводности с достаточной точностью соответствуют полученным температурам, пересчёт не требуется.

б) Расчет температур в днище фундамента

Принимаем коэффициенты теплопроводности (ккал/м·ч·°С) для каждого слоя днища  $\lambda_1 = 0,96$ ,  $\lambda_2 = 0,22$  и  $\lambda_3 = 0,84$ .

Определяем термические сопротивления слоев ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^0\text{C}/\text{ккал}$ ) по формуле (3):

$$R_1 = \frac{0,14}{0,96} = 0,146, \quad R_2 = \frac{0,35}{0,22} = 1,590, \quad R_3 = \frac{1,2}{0,84} = 1,430,$$

$$\sum_{i=1}^2 R_i = 1,736, \quad \sum_{i=1}^3 R_i = 3,166.$$

Вычисляем термическое сопротивление от раза к днищу по формуле (4)

$$R_g = \frac{1}{40} = 0,025 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot {}^0\text{C}/\text{ккал}$$

и найдя по приложению XII эффективный коэффициент теплопроводности грунта для  $t = 380^0\text{C}$ ;  $\lambda_{\text{гру.эф.}} = 0,38$  ккал/м·час·°С, определяем

$$t_{g_H} = \frac{650}{1 + \frac{4 \cdot 0,38}{3,14 \cdot 2,15} (0,025 + 3,166)} = 372^0\text{C}.$$

Вычисляем температуру ( ${}^0\text{C}$ ) на границах слоёв по формуле (47):

$$t_{g_1} = 650 - (650 - 379) \frac{0,025}{3,191} = 648,$$

$$t_{g_2} = 650 - (650 - 379) \frac{0,171}{3,191} = 635,$$

$$t_{g_3} = 650 - (650 - 379) \frac{1,761}{3,191} = 500.$$

и находим среднюю температуру ( ${}^0\text{C}$ ) слоёв:

$$t_{\text{ср}} = \frac{648 + 635}{2} = 641,$$

$$t_{2,op} = \frac{635+500}{2} = 567,$$

$$t_{3,ep} = \frac{500+382}{2} = 441.$$

Так как принятые коэффициенты теплопроводности слоев днища с допустимым приближением соответствуют полученным температурам, пересчёт не требуется.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

<b>1. Основные расчетные положения .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Теплопередача через плоскую и цилиндрическую многослойные стеки .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Тепловой расчёт конструкций с включениями .....</b>	<b>8</b>
Расчет конструкций со сквозным включением .....	10
Расчёт конструкций со сквозным включением, выступающим за поверхность ограждения, и конструкций с включением на его внешней поверхности .. . . . .	11
Расчет конструкций с несквозным теплопроводным включением .. . . . .	12
Расчёт конструкций с несквозным изоляционным включением	13
Расчет ребристых конструкций .. . . . .	15
<b>4. Расчёт температур в элементах фундаментов дымовых труб с подземным вводом газоходов .....</b>	<b>15</b>
<b>Приложение I. Коэффициенты теплопроводности обычного и жаростойкого бетонов, огнеупоров и изоляционных материалов .....</b>	<b>19</b>
<b>Приложение II. График для расчета плоской стенки .....</b>	<b>вкл.</b>
<b>Приложение III. График для расчёта цилиндрической стенки .....</b>	<b>вкл.</b>
<b>Приложение IV. График для определения величин <math>\Sigma_1</math>, <math>\Sigma_2</math>...</b>	<b>21</b>
<b>Приложение V. График для определения величин <math>\Sigma_3</math>, <math>\Sigma_4</math>...</b>	<b>22</b>
<b>Приложение VI. График для определения величин <math>\Sigma_5</math>, <math>\Sigma_6</math> ..</b>	<b>23</b>
<b>Приложение VII. График для определения поправочного коэффициента <math>\beta</math> .. . . . .</b>	<b>24</b>
<b>Приложение VIII. График для определения величины <math>S_4</math> .. . . . .</b>	<b>25</b>
<b>Приложение IX. График для определения величины <math>S_5</math> .. . . . .</b>	<b>26</b>
<b>Приложение X. Поправочные коэффициенты для расчёта конструкций .. . . . .</b>	<b>27</b>
<b>Приложение XI. График для определения величины <math>\Psi</math> .. . . . .</b>	<b>34</b>
<b>Приложение XII. График для определения эффективного коэффициента теплопроводности влажных грунтов .. . . . .</b>	<b>35</b>
<b>Приложение XIII. Примеры теплового расчёта ограждающих конструкций .. . . . .</b>	<b>56</b>

Редактор Т.Д.Петрякова

Технический редактор Н.А.Низяева

Корректор С.В.Дзасохова

Л-79/24 Подписано в печать 25/III-1974 г. Тираж 300  
Объем 3,0 п.л.+ 2 вкл. Уч.-изд. 3,2 л. Изд. № 6915 Зак. № 2  
Цена 20 коп.

318-73

ОВИТИ ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР