

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА НА ТЕМУ

«Разработка технологии тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий»

ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«Теплотехника и теплотехническое оборудование»
для студентов специальности 70.01.01
«Производство строительных изделий и конструкций»

Брест 2022

В методических указаниях изложены основные требования к выполнению курсового проекта по технологическому проектированию тепловых установок для производства бетонных и железобетонных изделий.

Излагаются теоретические основы, характеризующие процессы тепломассообмена. Приводятся основные расчёты, необходимые для определения оптимальных режимов тепловой обработки железобетонных изделий и оптимальных параметров работы тепловых установок.

Составители :

Г.В. Сырица, доцент, канд. техн. наук

А.И. Пикула, ассистент

А.В. Павлюкевич, ассистент

Рецензент:

Зам. директора РУНИП «Сергис» УП «Белстройлицензия» Н.С.Щербач

ВВЕДЕНИЕ

Переход к рыночной экономике требует резкого снижения себестоимости продукции за счет создания новых технологических процессов, повышения качества изделий при значительном уменьшении трудовых и материальных затрат и при сохранении чистоты окружающей среды. Решение этих проблем определяется общей компетентностью инженерно-технического персонала отрасли. Поэтому студенты как будущие творцы новых технологий, должны хорошо знать основные положения ресурсосберегающих технологических процессов в производстве строительных материалов.

Курсовое проектирование является частью учебного процесса, способствующего использованию основных положений теории в заводской практике. В данном проекте, используя теоретические основы термодинамики и теплообмена, необходимо разработать технологию тепловой обработки заданного изделия, определить устройство для её осуществления и выполнить тепловой расчёт этого устройства. В связи с изложенным пояснительная записка должна содержать следующие разделы:

- Введение.
- Выбор и обоснование технологии производства и способа тепловой обработки заданного изделия.
- Определение основных габаритов установки.
- Теплотехнический расчёт ограждающих конструкций установки.
- Материальный и тепловой балансы установки.
- Гидравлический расчёт трубопроводов.
- Выбор способа использования вторичных материальных и энергоресурсов.
- Мероприятия по охране труда, природы и техники безопасности.

В конце пояснительной записки приводится перечень использованной литературы.

Графическая часть проекта должна содержать планировку технологической линии, общий вид тепловой установки в разрезе и дополнительные поясняющие виды, схему подвода теплоносителя и дополнительные сведения, объясняющие работу установки. Всё указанное размещается на 1,0... 1,5 листах формата А1.

Во введении расчётно-пояснительной записки описывается назначение изделия в здании или сооружении и условия его работы (теплозащита, звукоизоляция, водонепроницаемость, влажность среды и т.д.). В связи с этим необходимо подробно описать технологические требования, предъявляемые изделию и способы их обеспечения с указанием условий тепловой обработки.

В задании приводятся только изделия и производительность. Состав бетонной смеси, марка бетона, толщина изделия, материал и другие данные следует выбирать из каталогов типовых изделий, справочных пособий и рекомендаций.

1 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СПОСОБА ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ

Тепловая обработка является наиболее энергоёмкой, самой длительной и ответственной операцией технологического процесса изготовления строительных материалов. При этом режимы тепловой обработки зависят от вида вяжущего, способа формования, типа заполнителя, В/Т отношения и ряда других факторов. Например, вибропрессованием изделия формируются с $V/C \approx K_{нт}$, и поэтому обработку следует вести при отсутствии массообмена с окружающей средой, и, наоборот, гипсобетонные изделия необходимо сушить. Таким образом, каждое изделие или конструкция требует свой индивидуальный режим тепловой обработки, который следует обосновать.

Несмотря на разнообразие режимов тепловой обработки все они имеют следующие периоды - нагрев изделия, изотермическое выдерживание и охлаждение, т.е. общее время тепловой обработки.

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{из}} + \tau_{\text{охл}} \quad (1.1)$$

где: $\tau_{\text{н}}$ - время нагревания изделий, ч;

$\tau_{\text{из}}$ - время изотермического выдерживания (постоянной скорости сушки), ч;

$\tau_{\text{охл}}$ - время охлаждения изделий, ч.

Продолжительность первого периода - нагрева изделий - необходимо рассчитать, ибо в этом периоде материал имеет относительно малую прочность и под действием возникающих при нагреве температурного градиента и градиента влагосодержания может разрушаться.

Время охлаждения изделий в камере без внешнего теплового воздействия принимается два часа. При принудительном охлаждении время этого периода может быть уменьшено.

В этом параграфе записки следует определить назначение тепловой обработки в технологическом процессе изготовления изделия. Выполнить анализ существующих способов тепловой обработки подобных материалов, отметить положительное и отрицательное влияние этих способов на качество материала и соответствие с требованиями нормативных документов, выявить энергопотребление и пути экономии энергоресурсов и материалов, условия труда. Назначить способ тепловой обработки и показать его положительные характеристики: ожидаемый удельный расход теплоты, использование вторичных энергоносителей, влияние на окружающую среду и условия труда.

2 МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС УСТАНОВОК

Материальный баланс составляется для веществ, масса которых в процессе тепловой обработки изменяется. К ним относится влага в материале и в теплоносителе. Баланс массы влаги в материале:

$$M_{\text{вл}} + M_{\text{к}} = M_{\text{г}} + M_{\text{ост}} + M_{\text{исп}} \quad (2.1)$$

где: $M_{\text{вл}}$ - масса воды, введенной в смесь при затворении, кг.;

$M_{\text{к}}$ - масса влаги, мигрирующая в материал при тепловой обработке, кг.;

$M_{\text{г}}$ - масса влаги, расходуемая на физико-химические процессы, кг.;

$M_{\text{ост}}$ - масса влаги в материале после тепловой обработки, кг.;

$M_{\text{исп}}$ - масса испарённой влаги, кг.

Численное значение статей баланса зависит от ρ материала, способа теплоподвода и параметров среды. Если процесс совершается в среде влажного насыщенного пара, то при обработке тяжёлого бетона $M_{\text{к}} \approx 0$, $M_{\text{исп}} \approx 0$, тогда:

$$M_{\text{вл}} = M_{\text{г}} + M_{\text{ост}} \quad (2.2)$$

При обработке лёгких бетонов в такой среде образующийся конденсат мигрирует в материал и тогда

$$M_{\text{вл}} + M_{\text{к}} = M_{\text{г}} + M_{\text{ост}} \quad (2.3)$$

Тепловая обработка в среде с относительной влажностью $\varphi_{\text{ж}} < 0.75$ и температурой $T_{\text{ж}} > 75^{\circ}\text{C}$ всегда сопровождается испарением влаги:

$$M_{\text{вл}} = M_{\text{г}} + M_{\text{ост}} + M_{\text{исп}} \quad (2.4)$$

Расход воды на гидратацию вяжущего в процессе тепловой обработки составляет $M_{\text{г}} \approx 0.15M_{\text{ц}}$ ($M_{\text{ц}}$ - масса вяжущего). Остаточная влажность для тяжелого бетона $M_{\text{ост}} = 0.1M_{\text{изд}}$ ($M_{\text{изд}}$ - масса изделия), а для лёгких бетонов, гипсовых и гипсобетонных изделий – $M_{\text{ост}} \approx 0.12M_{\text{изд}}$. Таким образом, по балансу влаги всегда можно определить $M_{\text{ост}}$ и $M_{\text{изд}}$, значение которых необходимы при составлении теплового баланса. Баланс теплоносителя в установках, в которых используется влажный насыщенный пар:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{отх}} + M_{\text{к}} \quad (2.5)$$

где: $M_{\text{отх}}$ - масса конденсата, покидающего установку, кг.

Если пар конденсируется в регистрах, то $M_{\text{к}} = 0$ и баланс принимает вид $M_{\text{п}} = M_{\text{отх}}$.

Баланс парогазовой смеси в установке:

$$M_{\text{см}} = M_{\text{т}} + M_{\text{исп}} \quad (2.6)$$

где: $M_{\text{т}}$ - масса теплоносителя, поступающего в установку, кг.

Масса теплоносителя $M_{\text{т}}$ рассчитывается по двум параметрам - подвода необходимого количества тепла для нагрева изделия и обеспечения выноса из камеры испарённой влаги (по I_d - диаграмме).

При лучистом теплоподводе $M_{\text{т}} = 0$

$$M_{\text{см}} = M_{\text{с.в.}} + M_{\text{исп}} \quad (2.7)$$

где: $M_{\text{с.в.}}$ - масса сухого воздуха, кг.

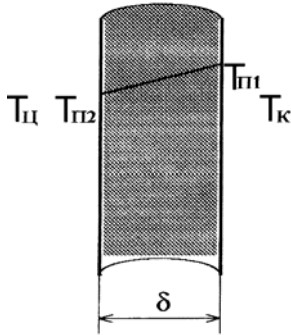
Во избежание конденсации пара из смеси в установке ее следует удалять, а затем подавать свежий воздух. При температуре на выходе из установки $T_{\text{см}}=100... 115 \text{ }^{\circ}\text{C}$ с каждым килограммом сухого воздуха выносятся до 4 кг пара

$$M_{\text{с.в.}} = \frac{M_{\text{исп}}}{4} \quad (2.8)$$

3 ВЫБОР ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ УСТАНОВОК

Важную роль при тепловой обработке выполняет выбор ограждающих конструкций установки. От правильно выбранной ограждающей конструкции зависит качество тепловой обработки.

Для расчёта используем метод последовательных приближений.



Исходные данные: стенка камеры керамзитобетонная,
 $\delta = 0,3\text{ м}$; $\lambda = 0,47\text{ Вт/м}^0\text{С}$
 $T_{\text{ц}} = 16\text{ }^\circ\text{С}$, $T_{\text{к}} = 85\text{ }^\circ\text{С}$ – температура в камере $^\circ\text{С}$
 $T_{\text{п2}}$ - менее $40\text{ }^\circ\text{С}$;

$$\text{Коэффициент теплопередачи равен : } K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \sum_{i=1}^i \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}} \quad (3.1)$$

где: $\alpha_{\text{вн}}$ - коэффициент теплоотдачи от среды в установке к внутренней поверхности ограждения камеры, $\text{Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{С}$;

$\alpha_{\text{нар}}$ - коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности ограждения в окружающую среду, $\text{Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{С}$.

$$\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} \ll \sum_{i=1}^n \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}} \quad (3.2)$$

ПОЭТОМУ $T_{\text{вн}} \approx T_{\text{к}}$

$$\text{отсюда: } K = \frac{1}{\sum_{i=1}^i \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}} \quad (3.3)$$

где:

$$\alpha_{\text{нар}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}} \quad (3.4)$$

$\alpha_{\text{л}}$ - коэффициент теплоотдачи при лучистом потоке, $\text{Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{С}$;

$\alpha_{\text{к}}$ - коэффициент теплоотдачи при конвективном потоке, $\text{Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{С}$.

Задаёмся произвольным $\alpha'_{\text{нар}}$ (6...10) и при этом значении рассчитываем температуру наружной поверхности камеры:

$$T_{\text{нар}} = \frac{K}{\alpha'_{\text{нар}}} (T_{\text{вн}} - T_{\text{ц}}) + T_{\text{ц}} \quad (3.5)$$

Для полученной температуры определяем $\alpha_{л}$ и $\alpha_{к}$ и сравниваем с принятым значением.

$$\alpha_{л} = \frac{q_{л}}{T_{пар} + T_{ц}} \quad (3.6)$$

$$q_{л} = \varepsilon_{пр} \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T_{п2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ц}}{100} \right)^4 \right] \quad (3.7)$$

$\alpha_{к}$ - определяем из критериального уравнения (3.8).

$$Nu = c(Gr \times Pr)^n \quad (3.8)$$

где: $Nu = \frac{\alpha_{к} \cdot x}{\lambda}$ - критерий Нуссельта; (3.9)

$$\alpha_{к} = \frac{Nu \cdot \lambda}{x} = \frac{c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot \lambda}{x} \quad (3.10)$$

x - линейный размер тела по направлению потока среды (теплоносителя), м;
 λ - коэффициент теплопроводности среды, омывающей наружную поверхность ограждения, Вт/м^{°С};

c и n - коэффициенты, зависящие от произведения $Gr Pr$;

$$Gr = \frac{g \cdot \Delta T \cdot x^3}{T_{ж} \cdot \nu^2} \quad \text{- критерий Грасгофа;} \quad (3.11)$$

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения;

ΔT - разность температуры между поверхностью тела и окружающей средой ($T_{п} - T_{ж}$ - при охлаждении тела, $T_{ж} - T_{п}$ при нагревании тела);

$T_{п}$ - температура поверхности тела, °С;

$T_{ж}$ - температура окружающей среды, °С;

ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

$$Pr = \nu / a \quad \text{- критерий Прандтля.} \quad (3.12)$$

Табл. 3.1. Зависимость c и n от произведения $Gr Pr$

$Gr \times Pr$	c	n
От 0.001 до 500	1,18	1/8
От 500 до $2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
От $2 \cdot 10^7$ до 10^{13}	0,135	1/3

Температура наружной поверхности камеры должна быть менее 40°С. В противном случае необходимо изменить толщину теплоизоляции в сторону её увеличения. В случае если полученное значение $\alpha''_{нар} = \alpha_{л} + \alpha_{к}$ близко к

принятому, то принятое значение верно, в противном случае принимаем :

$$\alpha_{\text{нар}} = (\alpha'_{\text{нар}} + \alpha''_{\text{нар}})/2$$

Рассчитываем значение K , $T_{\text{нар}}$, $\alpha_{\text{л}}$ и $\alpha_{\text{к}}$ при вновь принятом коэффициенте теплоотдачи от наружной поверхности ограждения. Данный расчёт осуществляется до момента, когда значение коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности принятого и полученного при расчёте, будет приблизительно равно. Далее принимаются значения, полученные в последнем расчёте ($T_{\text{нар}}$, K).

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГАБАРИТОВ УСТАНОВКИ

Расчёт размеров рабочего пространства установок зависит от режима работы - периодического или непрерывного действия.

4.1 Расчёт размеров установок периодического действия

Размеры рабочего пространства установок зависят от размера форм, количества их в камере и схемы их укладки. В камерах для крупногабаритных изделий (панели наружных и внутренних стен, плиты перекрытий и другие), как правило, они укладываются в одну стопку (по одному изделию в плане). В малогабаритных - по несколько стопок в плане.

Габариты форм ориентировочно определяются:

$$l_{\phi} = l_{и} + 2 \cdot \Delta l_{\phi} \quad (4.1)$$

$$b_{\phi} = b_{и} + 2 \cdot \Delta b_{\phi} \quad (4.2)$$

$$h_{\phi} = h_{и} + 2 \cdot \Delta h_{\phi} \quad (4.3)$$

где: $l_{и}$, $b_{и}$, $h_{и}$ - соответственно длина, ширина и высота изделия, м.

Δl_{ϕ} - ширина торцевого борта, а также участка для размещения упоров, м;

Δb_{ϕ} - ширина бокового борта, м;

Δh_{ϕ} - высота поддона, м.

Табл. 4.1. Значения величин Δl_{ϕ} , Δb_{ϕ} , Δh_{ϕ} для расчета габаритов форм

Формы	Армирование	Рекомендуемые величины, см		
		Δl_{ϕ}	Δb_{ϕ}	Δh_{ϕ}
Поддоны для формования пустотных плит	- обычное	20...25	20...25	18...20
	- напрягаемое на упоры поддона	40...80	20...25	18...20
Наружные стеновые панели и другие плоские изделия	- обычное	25...30	25...30	25...30
Лестничные марши, площадки	- обычное	20	20	30

Размеры рабочего пространства камеры выбираются так, чтобы обеспечить циркуляцию теплоносителя между изделиями и возможность работы автоматической траверсы. В этом случае, при расположении одного изделия в камере (в плане), ширина камеры:

$$B = b_{\phi} + 2 \cdot b_3 \quad (4.4)$$

где: b_{ϕ} - ширина формы, м;

$b_3 = 0,25.. .0,30$ (м) - расстояние между формой и стенкой камеры.

Длина камеры:

$$L = l_{\phi} + l_3 \quad (4.5)$$

где: l_{ϕ} - длина формы, м;

$l_3 = 0,10.. .0,12$ (м) - зазор между формой и стенкой камеры.

Высота камеры:

$$H = h_1 + (h_{\phi} + h_2) \cdot (n - 1) + h_3 \quad (4.6)$$

где: $h_1 = 0,16.. .0,20$ (м) - расстояние от пола камеры до днища нижней формы;

h_{ϕ} - высота формы с изделием, м;

$h_2 = 0,05.. .0,075$ (м) - расстояние между формами по высоте;

n - число форм по высоте;

$h_3 = 0,15.. .0,20$ (м) - расстояние между верхом верхней формы (изделия) и крышкой камеры.

Общая высота камеры при подаче пара через перфорированные трубопроводы во избежание значительного перепада температуры по высоте не должна превышать 3,0...3,5 м. При применении интенсивной циркуляции можно высоту увеличить до 4,0... 4,5 м.

При укладке изделий в камеры в несколько стопок длина камеры:

$$L = n_1 \cdot l_{\phi} + 2l_3 + (n_1 - 1) \cdot l_1 \quad (4.7)$$

где: n_1 - число стопок по длине камеры;

$l_1 = 0,10.. .0,12$ (м) - расстояние между стопками по длине камеры.

Ширина камеры:

$$B = n_2 \cdot b_{\phi} + 2b_3 + (n_2 - 1) \cdot b_2 \quad (4.8)$$

где: n_2 - число стопок по ширине камеры;

$b_3 = 0,10.. .0,12$ (м) - расстояние между стенкой камеры и формой;

$b_2 = 0,10.. .0,12$ (м) - расстояние между стопками изделий в плане.

Высота камеры H рассчитывается по формуле (4.6).

Количество изделий в камере:

$$K = n_1 \cdot n_2 \cdot n \quad (4.9)$$

Объем материала в камере:

$$V_M = K \cdot V_{\text{изд}} \quad (4.10)$$

Количество установок для обеспечения годовой производительности цеха:

$$N = 1.1 \cdot \left(\frac{V_{\text{год}}}{V_{\text{к.г.}}} \right) \quad (4.11)$$

где: $V_{\text{год}}$ - годовая производительность цеха, м³/год;

$V_{\text{к.г.}}$ - годовой выпуск продукции одной камерой, м³/год.

$$V_{к.г.} = V_M \frac{\tau_{год}}{\tau_{общ}} \quad (4.12)$$

где: $\tau_{год}$ - годовой фонд времени, ч;

$\tau_{общ}$ - общее время для совершения одного цикла тепловой обработки, ч.

Общее время одного цикла работы установки:

$$\tau_{общ} = \tau_{загр} + \tau_{т.о.} + \tau_{разгр} \quad (4.13)$$

где: $\tau_{загр}$ - время загрузки камеры, ч;

$\tau_{т.о.}$ - время тепловой обработки, ч;

$\tau_{разгр}$ - время разгрузки камеры, ч.

Время загрузки камеры:

$$\tau_{загр} = \left(\frac{K}{n_{\phi}} \right) \cdot \tau_{\phi} \quad (4.14)$$

где: n_{ϕ} - количество изделий, одновременно формуемых на формовочных установках;

τ_{ϕ} - цикл одной формовки, ч.

Коэффициент загрузки камеры:

$$\eta_k = \frac{V_M}{V_k} = \frac{K \cdot V_{изд}}{L \cdot B \cdot H} \quad (4.15)$$

4.2 Расчёт размеров рабочего пространства установок непрерывного действия

Количество изделий, подвергаемых тепловой обработке одновременно:

$$N = \frac{K_{исп} \cdot V_{год} \cdot \tau_{т.о.}}{\tau_{год} \cdot V_{изд}} \quad (4.16)$$

где: $K_{исп} = 0.85 \dots 0.95$ - коэффициент использования установки;

$V_{год}$ - годовая производительность цеха, м³/год;

$\tau_{т.о.}$ - общее время тепловой обработки, ч;

$\tau_{год}$ - годовой фонд времени, ч;

$V_{изд}$ - объём материала в одном изделии, м³.

Количество изделий, находящихся одновременно в одной камере:

$$n_i = n_y \cdot \tau_{т.о.} \quad (4.17)$$

где: n_y - часовая производительность камеры;

$\tau_{т.о.}$ - общее время тепловой обработки, ч;

Требуемое количество камер:

$$N_k = \frac{N}{n_i} \quad (4.18)$$

Длина камеры:

$$L = n_i \cdot l_\phi \quad (4.19)$$

где: l_ϕ - длина формы, которая превышает на 0.4... 0.5 м изделие.

Длина камеры не должна превышать 100... 120 м.

Ширина камеры:

$$B = b_\phi + 2 \cdot b_3 \quad (4.20)$$

где: b_ϕ - ширина формы (на 0,3...0,4 м шире изделия), м;

$b_3 = 0,15...0,2$ - расстояние между формой и стенкой, м.

Высота камеры:

$$H = 2 \cdot h_1 + h_2 + h_3 + h_p + h_\phi \quad (4.21)$$

где: h_1 - расстояние от пола (потолка) установки до оси регистра, м;

h_2 - расстояние от оси регистра до верха изделия, м;

h_3 - расстояние от оси регистра до нижней полки рельса, м;

$h_p = 0,12$ (м) - высота рельса;

h_ϕ - высота формы с изделием, м.

Длина зоны нагрева изделий:

$$L_I = L \cdot \left(\frac{\tau_n}{\tau_{\text{общ}}} \right) \quad (4.22)$$

где: τ_n - расчётное время нагревания изделий, ч.

Длина зоны изотермического выдерживания:

$$L_{II} = L \cdot \left(\frac{\tau_{\text{из}}}{\tau_{\text{общ}}} \right) \quad (4.23)$$

где: $\tau_{\text{из}}$ - время изотермического выдерживания, ч.

Длина зоны охлаждения:

$$L_{III} = L \cdot \left(\frac{\tau_{\text{охл}}}{\tau_{\text{общ}}} \right) \quad (4.24)$$

где: $\tau_{\text{охл}}$ - время охлаждения изделий, ч.

5 ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС УСТАНОВКИ

Тепловой баланс различен для установок периодического действия и непрерывно действующих. Основное отличие состоит в том, что в установках периодического действия ограждающие конструкции камер нагреваются и охлаждаются в каждом цикле их работы, а непрерывно действующие работают в квазистационарном тепловом состоянии. Поэтому в первом случае теплота затрачивается на нагрев конструкций, а во втором - эта статья отсутствует. Статьи баланса изменяются от исходного значения температуры окружающей среды T_0 . Баланс может быть составлен относительно $T_0 = 0$ °С и $T_0 = T_{ц}$ ($T_{ц}$ - температура среды в цехе). В последнем все приходные статьи баланса, содержащие разность $(T_{ц} - T_0)$, обращаются в ноль и из баланса исключаются.

Тепловой расчёт камеры позволяет определить максимальный часовой расход теплоты на камеру, удельный расход теплоты на единицу объёма изделий в плотном теле и др.

Тепловой баланс составляется отдельно для периода подъёма температуры и изотермического выдерживания.

5.1 Приходные статьи теплового баланса

5.1.1 Теплота, вносимая материалом в установку:

$$Q'_1 = C_{см} \cdot M_{см} \cdot (T_{ц} - T_0) = C_{см} \cdot M_{см} \cdot T_{ц} \quad (5.1)$$

где: $C_{см} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$ удельная массовая теплоёмкость материала, кДж/кг·°С

$M_{см}$ – масса материала в установке, кг.;

$T_{ц}$ – температура материала, °С;

C_i - удельная массовая теплоёмкость i -го компонента, кДж/кг·°С;

M_i – масса i -го компонента, кг.

5.1.2 Теплота арматуры и закладных деталей:

$$Q'_2 = C_m \cdot M_m \cdot (T_{ц} - T_0) = C_m \cdot M_m \cdot T_{ц} \quad (5.2)$$

где: $C_m = 0,45$ кДж/кг·°С – удельная массовая теплоёмкость металла;

M_m – масса закладных деталей и арматуры, загружаемых в камеру, кг.

5.1.3 Теплота, вносимая формами и транспортом :

$$Q'_3 = C_m \cdot M_{ф} \cdot (T_{ц} - T_0) = C_m \cdot M_{ф} \cdot T_{ц} \quad (5.3)$$

где: M_{ϕ} – масса форм и транспорта, кг.

5.1.4 Теплота экзотермии вяжущего :

$$Q'_4 = q_{\text{ЭКЗ}} \cdot M_{\text{Ц}} \quad (5.4)$$

где : $q_{\text{ЭКЗ}}$ – теплота экзотермии, выделяемая при гидратации 1 кг вяжущего, кДж/кг;

$M_{\text{Ц}}$ – масса вяжущего в изделиях, загружаемых в камеру, кг.

Тепловыделение цемента при тепловой обработке можно рассчитать по формуле :

$$q_{\text{ЭКЗ}} = 9.64 \cdot 10^{-4} \cdot M_{\text{Ц}} \cdot \left(\frac{B}{\text{Ц}} \right)^{0.44} \cdot f \sum_{\tau=0}^{\tau} (\bar{T}_0, \tau) \quad (5.5)$$

В выражении (5.5) обозначены :

$M_{\text{Ц}}$ – марка цемента;

$$f \sum_{\tau=0}^{\tau} (\bar{T}_0, \tau) = 0.5 \cdot (T_{\text{КН}} + T_{\text{Ц}}) \cdot \tau_{\text{Н}} + T_{\text{Киз}} \cdot \tau_{\text{из}} \quad (5.6)$$

$T_{\text{КН}}$ – температура бетона в конце периода нагрева, °С;

$T_{\text{Киз}}$ – температура бетона в конце периода изотермической выдержки, °С;

$\tau_{\text{Н}}$ - время периода нагрева, ч;

$\tau_{\text{из}}$ - время изотермического выдерживания, ч.

При расчете $q_{\text{ЭКЗ}}$ следует иметь в виду, что согласно правилу Ле - Шателье-Брауна, тепловыделение проявляется только при отсутствии теплового воздействия, т.е. когда изотермическое выдерживание осуществляется без теплоподвода.

При расчёте теплоты расходуемой на нагрев бетона, пункт 6.1, учитывается экзотермия цемента.

5.1.5 Теплота вносимая теплоносителем (зависит от рода теплоносителя).

- Теплота, вносимая влажным насыщенным паром :

$$Q'_5 = M_{\text{П}} \cdot h'' \cdot x \quad (5.7)$$

где: $M_{\text{П}}$ - расход пара за полный цикл тепловой обработки, кг;

h'' - энтальпия сухого насыщенного пара при принятом давлении P ;

$x = 0.75 \dots 0.8$ - степень сухости пара.

- Теплота, вносимая продуктами сжигания органического топлива :

$$Q''_5 = Q_{\text{Н}}^{\text{П}} \cdot V \quad (5.8)$$

где: $Q_{\text{Н}}^{\text{П}}$ - низшая теплотворность топлива, кДж/кг;

V - расход топлива за цикл тепловой обработки, кг.

- Теплота, вносимая электрическими нагревателями :

$$Q_5''' = N \cdot \tau \quad (5.9)$$

где: N - установочная мощность нагревателей, кВт;

τ - время цикла, ч.

5.1.6 Теплота воздуха, используемого для сжигания топлива :

$$Q_6' = \alpha \cdot L_0 \cdot V \cdot C'_V \cdot (T_{\text{ц}} - T_0) = \alpha \cdot L_0 \cdot V \cdot C'_V \cdot T_{\text{ц}} \quad (5.10)$$

где: α - коэффициент расхода воздуха;

L_0 - расход воздуха для сжигания 1 кг (м^3) топлива;

C'_V - удельная объемная теплоемкость воздуха при $T = T_{\text{ц}}$, кДж/кг $^{\circ}\text{C}$.

5.1.7 Физическая теплота топлива:

$$Q_7' = C_T \cdot V \cdot (T_{\text{ц}} - T_0) = C_T \cdot V \cdot T_{\text{ц}} \quad (5.11)$$

где: C_T - удельная массовая теплоемкость твердого и жидкого топлива или удельная объемная теплоемкость для газообразного топлива, кДж/кг $^{\circ}\text{C}$.

5.1.8 Теплота, вносимая в установку подсасываемым воздухом через открытые проёмы или отверстия :

$$Q_8' = C_V \cdot M_V \cdot (T_{\text{ц}} - T_0) = C_V \cdot M_V \cdot T_{\text{ц}} \quad (5.12)$$

где: $C_V = 1.0048 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ - удельная массовая теплоемкость воздуха;

M_V - масса воздуха, подсасываемого в камеру, кг. :

$$M_V = 6900 \cdot b \cdot \sqrt{h^3} \cdot A \cdot k_{\text{пр}} \cdot n \cdot \tau \quad (5.13)$$

где: $A = \sqrt{\frac{(\rho_0 - \rho_k) \cdot \rho_0 \cdot \rho_k}{(\sqrt[3]{\rho_0} + \sqrt[3]{\rho_k})^3}}$ коэффициент (5.14)

b - ширина проема, м;

h - высота проема, м;

$k_{\text{пр}}$ - коэффициент, учитывающий перекрытие проёма изделием, заслонкой, шторой и другими препятствиями;

n - число проемов или отверстий;

$\rho_0 = 1.293 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - плотность воздуха при $T = 0^{\circ}\text{C}$;

$\rho_{18} = 1.211 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; при $T = 18^{\circ}\text{C}$.

ρ_k - плотность воздуха в установке, кг/м 3 ;

τ - время открытия проёма, ч.

5.1.9 Теплота конструкций ограждения:

$$Q'_9 = \sum_{i=1}^n C_i \cdot M_i \cdot (T_i - T_0) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot M_i \cdot T_i \quad (5.15)$$

где: i - число слоёв в ограждении;

M_i - масса i -го слоя ограждения, кг;

T_i - температура i -го слоя ограждения, °С;

C_i - удельная массовая теплоёмкость i -го слоя ограждения, кДж/кг°С;

$$C_{\text{мин}} = 0.84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}; \quad C_{\text{стали}} = 0.482 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}};$$

$$\rho_{\text{мин}} = 50 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho_{\text{стали}} = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

5.2 Расходные статьи теплового баланса

5.2.1 Теплота нагрева материала.

Расчет расхода теплоты на нагрев изделий приведен в разделе 6.

5.2.2 Теплота нагрева арматуры и закладных деталей:

$$Q_2 = C_M \cdot M_M \cdot (T_{\text{ср(п,из)}} - T_0) \quad (5.16)$$

где: $T_{\text{ср(п,из)}}$ - средняя температура бетона в конце периода подъема температуры или изотермической выдержки, °С.

Теплота расходуемая на нагрев арматуры и закладных деталей учитывается при расчёте теплоты на нагрев изделий в разделе 6.

5.2.3 Теплота нагрева форм и транспортных средств:

$$Q_3 = C_M \cdot M_M \cdot (T_{\text{п(п,из)}} - T_0) \quad (5.17)$$

где: $T_{\text{п(п,из)}}$ - температура поверхности бетона в конце периода подъема температуры или изотермической выдержки, °С.

5.2.4 Теплота, затрачиваемая на испарение влаги:

$$Q_4 = r_{\text{п}} \cdot M_{\text{исп}} \quad (5.18)$$

где: $r_{\text{п}}$ - теплота парообразования при температуре поверхностного слоя материала (выбирается из таблиц водяного пара).

Количество испарённой влаги в периоде нагрева можно принять равным нулю. В период изотермической выдержки (постоянной скорости сушки) количество испарённой влаги:

$$M_{\text{исп}} = q_m \cdot F_m \cdot \tau_{\text{из}} \quad (5.19)$$

где:

F_m - массоотдающая поверхность изделия, м²;

q_m - плотность потока влаги с открытой поверхности изделия, определяемая по формуле :

$$q_m = A \cdot \exp(-r/R \cdot T_{\Pi}) \quad (5.20)$$

где: R- газовая постоянная для воды;

T_{Π} – температура поверхностного слоя материала, °С;

A – опытный коэффициент, зависящий от структуры порового пространства материала.

5.2.5 Теплота нагрева испарённой влаги:

$$Q_5 = C_{\Pi} \cdot (M_{\text{исп}}^{\text{H}} + M_{\text{исп}}^{\text{из}}) \cdot (T_{\Gamma} - T_0) \quad (5.21)$$

где: C_{Π} - удельная массовая теплоемкость водяного пара, КДж/кг°С;

$M_{\text{исп}}^{\text{H}}$ - масса влаги, испарённой в периоде нагрева, кг;

$M_{\text{исп}}^{\text{из}}$ - масса влаги, испаренной в периоде изотермической выдержки, кг;

T_{Γ} - температура паровоздушной смеси на выходе из установки, °С.

5.2.6 Теплота нагрева подсасываемого воздуха в установку:

$$Q_6 = C_{\text{В}} \cdot M_{\text{В}} \cdot (T_{\Gamma} - T_0) \quad (5.22)$$

где: $M_{\text{В}}$ - масса воздуха, рассчитанная по формуле (5.13), кг;

T_{Γ} - температура теплоносителя, °С.

5.2.7 Теплота, уносимая из установки отработавшим теплоносителем:

$$Q_7 = C \cdot M_{\text{T}} \cdot (T_{\Gamma} - T_0) \quad (5.23)$$

где: M_{T} - масса теплоносителя, фазовое состояние и количество которого зависят от способа теплоподвода, кг.

При тепловой обработке тяжелого бетона в среде влажного насыщенного пара из камеры отводится конденсат:

$$Q_7 = M_{\Pi} \cdot h' = 4.19 \cdot T_{\text{H}} \cdot M_{\Pi} \quad (5.24)$$

При тепловой обработке легкого бетона часть влаги поглощается бетоном, масса которого определяется материальным балансом. Поэтому количество конденсата составит:

$$M_{\text{к}} = M_{\Pi} - (0.1 \dots 0.05) \cdot M_{\Pi} = (0.90 \dots 0.85) \cdot M_{\Pi}$$

а количество теплоты, выносимое конденсатом:

$$Q_7 = (0.9 \dots 0.85) \cdot 4.19 \cdot T_{\text{H}} \cdot M_{\Pi} \quad (5.25)$$

При конденсации пара в регистрах в конденсате содержится до 15% пара. В этом случае:

$$Q_7 = (4.19 \cdot T_{\text{H}} + 0.15 \cdot M_{\Pi} \cdot h'') \cdot M_{\Pi} \quad (5.26)$$

При тепловой обработке материала продуктами сжигания органического топлива:

$$Q_7 = C_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma} \cdot B \cdot (T_{\Gamma} - T_{\text{отх}}) \quad (5.27)$$

где: C_{Γ} - средняя удельная объемная теплоемкость газовой смеси при T_{Γ} , кДж/кг $^{\circ}$ С;

V_{Γ} - выход продуктов горения при сжигании 1 кг (м^3) топлива;

$T_{\text{отх}}$ - температура отходящих газов при низкотемпературной тепловой обработке ($T_{\Gamma} \approx 90^{\circ}\text{С}$) $T_{\text{отх}} = 35 \dots 40^{\circ}\text{С}$. При высокотемпературной обработке ($T_{\Gamma} \approx 150 \dots 300^{\circ}\text{С}$) температура $T_{\text{отх}} = 35 \dots 40^{\circ}\text{С}$.

5.2.8 Теплота, расходуемая на нагревание конструкций камеры

$$Q_8 = \sum_{i=1}^i C_i \cdot M_i \cdot (T_{\text{к},i} - T_{\text{н},i}) \quad (5.28)$$

где: n - число слоев в ограждении;

M_i - масса i -го слоя, кг;

$T_{\text{к},i}$ - средняя температура материала i -го слоя в конце нагрева, $^{\circ}\text{С}$;

$T_{\text{н},i}$ - начальная температура i -го слоя, $^{\circ}\text{С}$;

Для периодически действующих установок температура в слоях ограждения рассчитывается, как правило, методом конечных разностей, при этом вводится понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_{\text{эkv}} = \frac{\sum_{i=1}^i \delta_i}{\sum_{i=1}^i \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (5.29)$$

При этом температура внутренней поверхности стенки при тепловой обработке в среде влажного насыщенного пара принимается при $\tau = 0$, $T_{\text{п}} = T_{\text{н}}$. Аналогично принимается температура внутренней поверхности ограждения при лучистом теплоподводе, т.е. $T_{\text{п}} \approx T_{\text{н}}$. В камерах с конвективным теплоподводом от движущихся газов температуру внутренней поверхности ограждения $T_{\text{п}}$ следует рассчитывать методом постепенных приближений с учетом теплового потока через ограждение.

В непрерывно действующих установках нагрев ограждений происходит только при их разогреве (один раз в неделю или только после капитального ремонта). Поэтому температура в слоях рассчитывается при стационарной работе установки.

Затраченную теплоту при нагреве можно рассчитывать как аккумулярованную теплоту.

$$Q_8 = \sum_{i=1}^i 7.2 \cdot \lambda_i \cdot F_{\text{T}} \cdot (T_{\text{к},i} - T_{\text{н},i}) \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\pi \cdot a_i}} \quad (5.30)$$

где: $F_{\text{T}} = \sqrt{F_{\text{h}} \cdot F_{\text{bh}}}$ - площадь поверхностного слоя в ограждении;

F_{bh} - площадь внутренней поверхности, м^2 ;

F_h – площадь наружной поверхности ограждения, m^2 ;

τ - время нагрева, ч;

$a_i = \frac{\lambda_i}{C_i \cdot \rho_i}$ - коэффициент температуропроводности, $m^2/ч$.

5.2.9 Теплотери через ограждающие конструкции установок:

$$Q_9 = K \cdot F_T \cdot (T_H - T_0) \cdot \tau \quad (5.31)$$

где: $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$ - коэффициент теплопередачи, $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$; (5.32)

α_1 - коэффициент теплоотдачи от среды в установке к внутренней поверхности ограждения камеры, $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$;

α_2 - коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности ограждения в окружающую среду, $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$;

В случае, когда теплоносителем в установке является влажный насыщенный пар, то:

$$\frac{1}{\alpha_1} \ll \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (5.33)$$

Поэтому можно принимать температуру внутренней поверхности ограждения $T_n \approx T_H$, а коэффициент теплопередачи принимает вид:

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (5.34)$$

Аналогично рассчитывается K при использовании в качестве теплоотдающих элементов регистров или электрических нагревателей.

Если тепловая установка заглублена в землю, то коэффициент теплопередачи принимается по зонам в зависимости от заглубления. Для первой зоны шириной 2 м коэффициент $K = 0.47$ $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$, для второй зоны, лежащей ниже первой, $K = 0.23$ $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$; для более заглубленной зоны (включая дно установки) $K = 0.12$ $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$.

Полученное значение коэффициента теплопередачи необходимо перевести в $кДж/м^2 \cdot ^\circ C$ (см. приложение 7)!

5.2.10 Неучтенные потери теплоты установкой:

$$Q_{10} = (0.05 \dots 0.1) \cdot \sum Q_{расх} \quad (5.35)$$

Уравнение теплового баланса:

$$\sum Q_{\text{пр}} = \sum Q_{\text{расх}} \quad (5.36)$$

Вид этого уравнения зависит от рода теплоносителя.

- Для влажного насыщенного пара:

$$M_{\text{п}} \cdot (h'' \cdot x - h') = M_{\text{п}} \cdot r \cdot x = \sum Q_{\text{расх}} - q_{\text{экз}} \cdot M_{\text{ц}} \quad (5.37)$$

отсюда:
$$M_{\text{п}} = \frac{\sum Q_{\text{расх}} - q_{\text{экз}} \cdot M_{\text{ц}}}{r \cdot x} \quad (5.38)$$

- При использовании в качестве теплоносителя электроэнергии расходные статьи по пункту 7 отсутствуют. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$3.6 \cdot N \cdot \tau = \sum Q_{\text{расх}} - q_{\text{экз}} \cdot M_{\text{ц}} \quad (5.39)$$

Отсюда установленная мощность:

$$N = \frac{\sum Q_{\text{расх}} - q_{\text{экз}} \cdot M_{\text{ц}}}{3.6 \cdot \tau} \quad (5.40)$$

Результаты расчёта теплового баланса сводятся в таблицу 5.1

Таблица 5.1 Тепловой баланс установки

Приходные статьи				Расходные статьи			
№	Наименование статьи	КДж	%	№	Наименование статьи	КДж	%
1				1			
2				2			
n				n			
	ИТОГО	$\sum Q_{\text{прих}}$	\sum		ИТОГО	$\sum Q_{\text{расх}}$	\sum

6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТЕПЛА НА НАГРЕВ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

6.1 Период подъёма температуры. Для обеспечения заданного режима подъёма температур в камере необходимо знать расход тепла на нагрев изделий и форм в этот период. Рассмотрим 3 группы изделий: неограниченная пластина, неограниченный цилиндр и шар.

Тела 1 группы (неограниченная пластина) – все изделия, у которых два любых измерения «бесконечно велики» по отношению к третьему, конечному. Характерный пример таких изделий: различные плиты и панели.

Тела 2 группы (неограниченный цилиндр) – все изделия, у которых одно измерение «бесконечно большое», а два других конечны. Характерный пример таких изделий : балки, колонны, ригели.

Тела 3 группы (шар) – изделия, у которых все три размера конечны. Характерный пример – кубы, массивные фундаменты и т.п..

В первом случае расход тепла q_b на нагрев 1 м^3 бетона за заданное время $\tau_{\text{под}}$ находим по формуле :

$$q_b = c_b \cdot \rho_b \cdot (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \Psi_{\text{пл}} \quad (6.1)$$

Аналогично для неограниченного цилиндра :

$$q_b = c_b \cdot \rho_b \cdot (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \Psi_{\text{ц}} \quad (6.2)$$

и шара :

$$q_b = c_b \cdot \rho_b \cdot (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \Psi_{\text{ш}} \quad (6.3)$$

где: c_b – удельная массовая теплоёмкость материала, кДж/кг·°С ;

ρ_b - средняя плотность бетона, кг/м³;

b - скорость подъёма температуры в камере, °С/ч;

m – скорость подъёма температуры изделия за счёт экзотермии вяжущего, °С/ч;

$\Psi_{\text{пл}}$, $\Psi_{\text{ц}}$, $\Psi_{\text{ш}}$ – известные функции от критерия Fo определяемые по приложению 1;

Для панелей, у которых испарение влаги в процессе тепловой обработки происходит только с одной стороны :

$$q_b = c_b \cdot \rho_b \cdot (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \Psi_{\text{пл}} - c_b \cdot \rho_b \frac{\rho \cdot p}{2 \cdot \alpha} \Phi_n + \rho \cdot p \cdot S_i \cdot \tau_{\text{под}} \quad (6.4)$$

где: Φ_n – известная функция Fo и Bi ;

S_i – поверхность испарения панели, отнесенная к 1 м^3 бетона в плотном теле, в м²/м³ бетона.

6.2 Период изотермической выдержки.

Расход тепла на нагрев 1 м^3 бетона в этот период удобно определить по следующей формуле :

$$q_b = c_b \cdot \rho_b \cdot [(t_{\text{ср.из.}} - t_{\text{ср.под.}}) - \tau_{\text{из.}} \cdot m_{\text{из.}}] \quad (6.5)$$

При испарении влаги с одной стороны панели:

$$q_6 = c_6 \cdot \rho_6 \cdot [(t_{\text{ср.из.}} - t_{\text{ср.под.}}) - \tau_{\text{из.}} \cdot m_{\text{из.}}] + \rho \cdot p \cdot S_1 \tau_{\text{из.}} \quad (6.6)$$

где: $t_{\text{ср.под}}$ — средняя температура бетона в конце режима подъема температур, °С;

$t_{\text{ср.из.}}$ — средняя температура бетона в конце рассматриваемого промежутка времени изотермического прогрева, °С.

Пример. Подсчитать расход тепла на нагрев панели в форме на стадиях подъёма температур и изотермического прогрева при следующих данных :

состав бетона на 1 м³ :

портландцемент белгородский марки 400	$g_{\text{ц}} = 470$ кг
щебень	$g_{\text{щ}} = 1060$ кг
песок	$g_{\text{пес}} = 715$ кг
вода	$g_{\text{в}} = 185$ кг
вес арматуры	$g_{\text{ар}} = 40$ кг
средняя плотность бетона	$\rho_6 = 2470$ кг/м ³
средний коэффициент теплообмена	$\alpha = 251.4$ кДж/м ² ·ч·°С
	или $\alpha = 69.83$ Вт/м ² ·°С
коэфф. теплопроводности бетона	$\lambda_6 = 1,746$ Вт/м·°С
толщина панели	$\delta_6 = 0,25$ м
характерный размер панели	$R = 0.125$ м
объём одной панели	$V = 3$ м ³
вес формы	$G_{\text{м}} = 3000$ кг
удельная теплоёмкость металла форм	$C_{\text{м}} = 0,481$ кДж/кг·°С
температура панели до поступления в камеру	$t_0 = 15$ °С
скорость подъёма температуры в камере	$b = 35$ °С/ч
продолжительность режима подъёма температуры	$\tau_{\text{под}} = 2$ ч
температура режима изотермического прогрева	$t_{\text{из}} = 85$ °С
продолжительность периода изотермического прогрева	$\tau_{\text{из}} = 3$ ч

Порядок расчёта :

1. Определяем теплоёмкость бетона, принимая во внимание, что вес сухих составляющих :

$$g_{\text{сух}} = g_{\text{ц}} + g_{\text{щ}} + g_{\text{п}} = 470 + 1060 + 715 = 2245 \text{ кг / м}^3 \quad (6.7)$$

тогда имеем :

$$C_6 = \frac{0.838 \cdot g_{\text{сух}} + 4.19 \cdot g_{\text{в}} + 0.481 \cdot g_{\text{ар}}}{g_{\text{сух}} + g_{\text{в}} + g_{\text{ар}}} = \text{кДж/кг} \cdot \text{°С} \quad (6.8)$$

$$= \frac{0.838 \cdot 2245 + 4.19 \cdot 185 + 0.481 \cdot 40}{2245 + 185 + 40} = 1.083$$

2. Вычисляем коэффициент температуропроводности бетона :

$$a = \frac{\lambda_{\text{б}}}{C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}}} = \frac{1.746 \cdot 3600}{1083 \cdot 2470} = 0.00235 \text{ м}^2/\text{ч} \quad (6.9)$$

и величину:

$$\frac{R^2}{a} = \frac{0.125^2}{0.00235} = 6.6 \text{ ч.} \quad (6.10)$$

3. Вычисляем величину A , принимая во внимание, что $Q_{\text{Э} 28} = 419$ кДж/кг (определено по приложению 2).

$$A = 0.0023 Q_{\text{Э} 28} (B/\text{Ц})^{0.44} = 0.0023 \cdot 419 \cdot (185/470)^{0.44} = 0.639 \text{ кДж/кг} \quad (6.11)$$

4. Вычисляем критерии F_0 и Bi :

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau_{\text{под}}}{R^2} = \frac{0.00235 \cdot 2}{0.125^2} = 0.303 \quad (6.12)$$

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} = \frac{69.83 \cdot 0.125}{1.746} = 5 \quad (6.13)$$

5. Для найденных значений F_0 и Bi по приложению 3 находим $C_2 = 0,03$. Находим величину m , характеризующую тепловыделение бетона за счёт экзотермии вяжущего :

$$m = \frac{A \cdot \text{Ц} \cdot \left(t_0 + \frac{bR^2}{a} \cdot C_2 \right)}{c \cdot \rho} = \frac{0.639 \cdot 470 \left(15 + \frac{35 \cdot 0.125^2}{0.00235} \cdot 0.03 \right)}{1.083 \cdot 2470} = 2.47 \text{ }^\circ\text{C} / \text{ч} \quad (6.14)$$

6. По приложению 1 находим , что для неограниченной пластины при $F_0=0.303$, $\psi_{\text{пл}} = 0,33$. Тогда находим удельный расход тепла на нагрев бетона:

$$q_{\text{б.п.}} = c_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \psi_{\text{пл}} = 1,083 \cdot 2470 \cdot (35 - 2.47) \cdot 2 \cdot 0.33 = 57431 \text{ кДж/м}^3 \quad (6.15)$$

7. Так как панель имеет объём $V = 3 \text{ м}^3$, то на её нагрев расходуется тепла :

$$Q_{\text{п}} = q_{\text{б.п.}} \cdot V_{\text{п}} = 57430 \cdot 3 = 172290 \text{ кДж} \quad (6.16)$$

8. По номограмме в приложении 4 для известных значений :

$$\tau_{\text{под}}; \quad \frac{R^2}{a} \quad \text{и} \quad b - m \quad (6.17)$$

найдем температуру поверхности бетона $t(R; 2)$ для пластины при $\frac{x}{R} = 1$

$$t_c - t(R; 2) = 15$$

$$\text{откуда : } t_{\text{п}} = t(R; 2) = t_c - 15 = t_0 + b \cdot \tau - 15 = 15 + 32 \cdot 2 - 15 = 70 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6.18)$$

и температуру центра панели при ($\frac{x}{R} = 0$), имеем :

$$t_c - t(0; 2) = 55$$

$$\text{откуда : } t_{\text{ц}} = t(0;2) = t_c - 55 = t_0 + b \cdot \tau - 55 = 15 + 32 \cdot 2 - 55 = 30^\circ\text{C} \quad (6.19)$$

9. Находим расход тепла на нагрев формы :

$$q_{\text{мет}} = g_{\text{мет}} c_{\text{мет}} [t(R, \tau) - t_0] = 3000 \cdot 0.481 \cdot (70 - 15) = 79365 \text{ кДж} \quad (6.20)$$

10. Общее количество тепла, необходимое для нагрева панели и формы в период подъёма температуры, равно :

$$q_{\text{об}} = q_{\text{п}} \cdot q_{\text{мет}} = 172290 + 79365 = 251655 \text{ кДж} \quad (6.21)$$

11. Определим среднюю температуру панели в конце периода подъёма температур :

$$t_{\text{ср.под.}} = \frac{t_{\text{п}} + 2t_{\text{ц}}}{3} = \frac{70 + 2 \cdot 30}{3} = 43,3^\circ\text{C} \quad (6.22)$$

12. Средняя температура бетона за весь период подъёма температур равна :

$$t_{\text{б}} = \frac{t_0 + t_{\text{ср.под.}}}{2} = \frac{15 + 43,3}{2} = 29,1^\circ\text{C} \quad (6.23)$$

13. За весь период подъёма температуры панель будет иметь :

$$V_{\text{под}} = t_{\text{б}} \cdot \tau = 29,1 \cdot 2 = 58,2^\circ\text{C ч} \quad (6.24)$$

14. По графикам в приложении 5 находим, что при $58,2^\circ\text{C ч}$, $V/\text{Ц}=0,395$ и марке цемента 400 тепловыделение 1 кг. цемента составит $Q_3 = 39,8 \text{ кДж/кг}$, а для 1 м^3 бетона :

$$Q_{\text{под}} = g_{\text{ц}} \cdot Q_{\text{экз}} = 470 \cdot 39,8 = 18708 \text{ кДж/м}^3 \quad (6.25)$$

15. Определяем среднюю температуру панели в конце периода изотермической выдержки. Для этого по номограмме в приложении 6 находим для :

$$\tau_{\text{из}}=3 ; \quad \frac{R^2}{a}=6,64 \quad \text{и} \quad \frac{t_{\text{из}} - t_{\text{п}}^0}{t_{\text{п}}^0 - t_{\text{ц}}^0} = \frac{85 - 70}{70 - 30} = 0,376 \quad (6.26)$$

$$A_{\text{пл}} = 0,6 \quad \text{при} \quad \frac{x}{R} = 0 \quad \text{и} \quad A_{\text{пл}} = 0 \quad \text{при} \quad \frac{x}{R} = 1 \quad (6.27)$$

16. Температура центра панели без учёта экзотермии в конце изотермической выдержки :

$$t_{\text{ц}} = t(0;3) = t_c - (t_{\text{п}}^0 - t_{\text{ц}}^0) \cdot A_{\text{пл}} = 85 - (70 - 30) \cdot 0,6 = 51^\circ\text{C} \quad (6.28)$$

а температура поверхности :

$$t_{\text{п}} = t(R;3) = t_c - (t_{\text{п}}^0 - t_{\text{ц}}^0) \cdot A_{\text{пл}} = 85 - (70 - 30) \cdot 0 = 85^\circ\text{C} \quad (6.29)$$

17. Средняя температура панели в конце периода изотермической выдержки:

$$t_{\text{ср.из.}} = \frac{t_{\text{п}} + 2t_{\text{ц}}}{3} = \frac{85 + 2 \cdot 51}{3} = 62,5^\circ\text{C} \quad (6.30)$$

18. Средняя температура панели за весь период изотермической выдержки равна :

$$t_{\text{б}} = \frac{t_{\text{ср.под.}} + t_{\text{ср.из.}}}{2} = \frac{43.3 + 62.5}{2} = 52.9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.31)$$

19. Определяем количество градусо-часов за период изотермического прогрева :

$$V_{\text{из}} = t_{\text{б}} \cdot \tau_{\text{из}} = 52.9 \cdot 3 = 158.7 \text{ } ^\circ\text{C ч} \quad (6.32)$$

20. Определяем общее количество градусо-часов за периоды подъёма температур и изотермической выдержки :

$$V = V_{\text{под}} + V_{\text{из}} = 58.2 + 158.7 = 216.9 \text{ } ^\circ\text{C ч} \quad (6.33)$$

21. По приложению 2 находим, что для полученных градусо-часов, В/Ц=0.4 и марки цемента 400 тепловыделение 1 кг цемента составит $Q_{\text{эжз}} = 134$ кДж/кг, а для 1 м³ бетона :

$$Q_{\text{из+под}} = g_{\text{ц}} \cdot Q_{\text{эжз}} = 470 \cdot 134 = 62980 \text{ кДж} \quad (6.34)$$

22. Вычисляем m по формуле :

$$m_{\text{из}} = \frac{Q_{\text{из+под}} - Q_{\text{под}}}{c_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot \tau_{\text{из}}} = \frac{62980 - 18708}{1.083 \cdot 2470 \cdot 3} = 5.51 \text{ } ^\circ\text{C / ч} \quad (6.35)$$

23. Удельный расход тепла в период изотермической выдержки :

$$\begin{aligned} q_{\text{б.из.}} &= c_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot [(t_{\text{ср.из.}} - t_{\text{ср.под.}}) - \tau_{\text{из}} \cdot m_{\text{из}}] = \\ &= 1.083 \cdot 2470 [(62.5 - 43.3) - 3 \cdot 5.51] = 7142 \text{ кДж / м}^3 \end{aligned} \quad (6.36)$$

24. Расход тепла в этот период на панель :

$$Q_{\text{из}} = q_{\text{б.из.}} \cdot V_{\text{п}} = 7142 \cdot 3 = 21426 \text{ кДж} \quad (6.37)$$

7 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДОВ

Гидравлический расчёт составляется по тепловому балансу расхода пара для определения диаметров подводящих паропроводов и необходимого давления пара, поступающего в систему. Такой же расчет делается и для конденсатоотводящих систем.

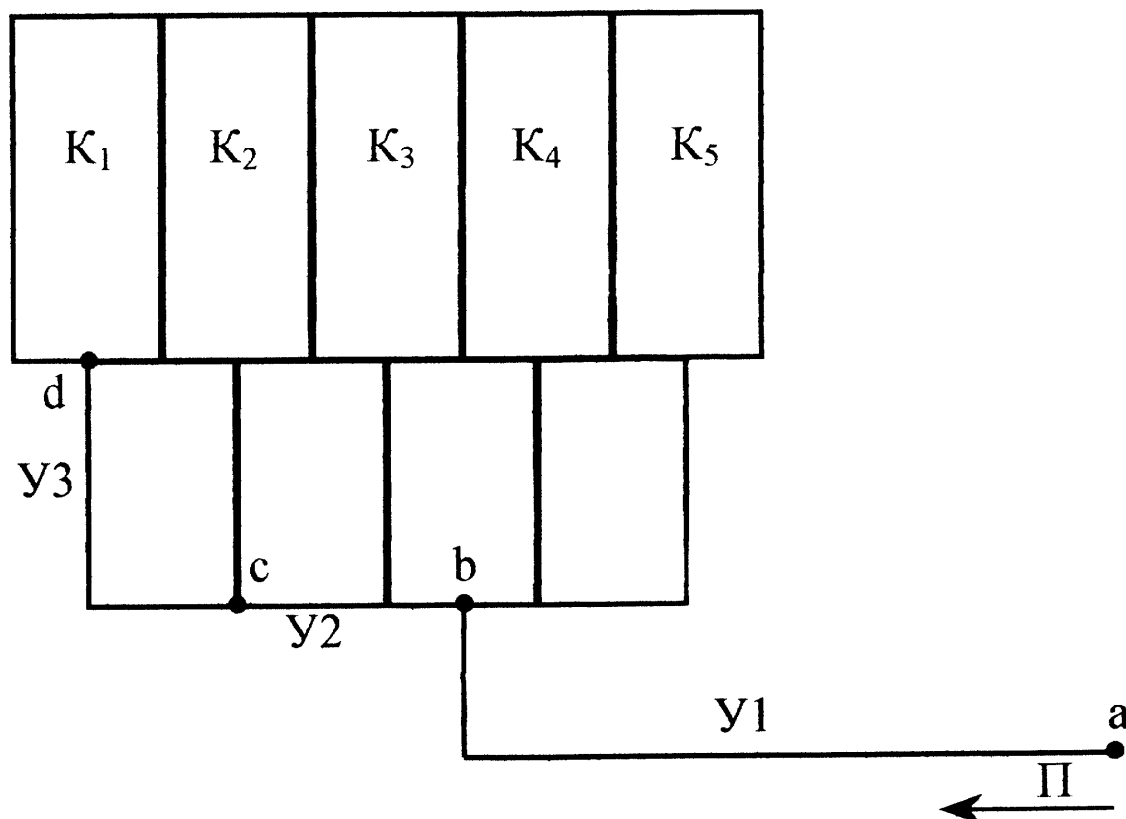


Рис. 7.1 Схема подводящего паропровода к блоку из пяти камер.

Для подводящего пара составляют схему. Для примера выбран блок из пяти камер (рис. 7.1). Предположим, согласно режиму завода, в блоке нагреваются две камеры, изотермическая выдержка происходит также в двух камерах, а охлаждение - в одной. Тогда общее количество пара, которое необходимо подавать в паропровод для пяти камер начиная с точки а, составит:

$$\sum G_i = G_{\text{пч}} \cdot 2 + G'_{\text{пч}} \cdot 2 \quad (7.1)$$

где: $G_{\text{пч}}$ - часовое количество пара на нагревание, по формуле:

$$G_{\text{пч}} = \frac{Q_{\text{ч}}}{(h''_{\text{п}} - h''_{\text{к}})} \quad (7.2)$$

$h''_{\text{п}}$ - энтальпия подаваемого пара в камеру;

h''_k - энтальпия отбираемого конденсата;

$G'_{пч}$ - часовое количество пара на изотермическую выдержку, определяемое для $Q'_ч$ по формуле:

$$Q'_ч = \frac{Q'_и}{t_{из}} \quad (7.3)$$

$t_{из}$ - длительность изотермического периода, ч.

По аналогии с формулой:

$$G_{пч} = \frac{(Q_{и} + Q'_{и})}{(h''_{пч} - h''_k)} \quad (7.4)$$

получим:

$$G'_{ч} = \frac{Q'_ч}{(h''_{пч} - h''_k)} \quad (7.5)$$

Для удобства расчета подводящих паропроводов составляют таблицу по следующей форме (табл. 7.1). Здесь также дан пример заполнения для участка У 1.

Расчет сопротивлений производят следующим образом. Например, на участке У 1 транспортируется пара $\sum G_1 : G_{пч} \times 2$ (часовой расход пара на нагрев в камерах K_1 и K_2) и $G'_{пч} \times 2$ (часовой расход пара на изотермическую выдержку в камерах K_3 и K_4). Подставляют этот расход для участка У1 как $\sum G_1$. Далее определяют количество теплоты Q_1 для У1, умножая $\sum G_1$ на энтальпию транспортируемого пара, $Q_1 = \sum_1 i$. Это значение вписывают в табл. 7.1.

По Q_1 выбирают из справочников (с учетом выбранной скорости $\omega_1 = 30...40$ м/с) необходимый диаметр паропровода и подставляют его значение в табл. 7.1. Длина участка выбирается по чертежу. На участке ab (см. рис. 7.1) есть поворот под углом 90° , сопротивление которого по указанному справочнику равно, например, 1.2; других сопротивлений нет. Указывают эту цифру в табл. 7.1.

Сопротивление трению на 1 м берется из справочников при данном диаметре и скорости; подставим R_1 . Помножив R_1 на длину участка l_1 , получают для табл. 7.1 значение $R_1 l_1$. Величину Z определяют по формуле:

$$z_1 = \sum \zeta \omega^2 \rho / 2 = 1.2 \cdot \omega_1^2 \cdot \rho / 2 \quad (7.6)$$

где: ρ - плотность пара.

Величину z также подставляют в табл. 7.1, $R_1 l_1 + z$ получают сложением $R_1 l_1 + Z_1$.

Такие расчеты по табл. 7.1 проводят по всем участкам паропровода и определяют гидравлические потери на трех участках, т. е. $\sum_1^3 Rl + z$.

Эти потери и определяют падение напора в паропроводе от а до d (на входе в камеру).

Расчет разводки пара по камере можно не делать, а учесть его как небольшое избыточное давление пара (например, 0.05 МПа), тогда подаваемое давление пара в камеру составит 0.15 МПа. Прибавив к 0.15 МПа значение выражения $\sum_1^3 Rl + z$, получают давление пара, которое необходимо подавать в систему.

Таблица 7.1

Участок (см.рис.7.1)	$\sum G$	d	l	$\sum \zeta$	R	ω	Rl	z	Rl+z	Q
У1=ab	$\sum G_1$	d ₁	l ₁	1.2	R ₁	ω_1	R ₁ l ₁	z ₁	R ₁ l ₁ +z ₁	Q ₁
У2=bc	$\sum G_2$									
У3=cd	$\sum G_3$									

$\sum G_1$ - часовой расход пара на участке У 1;

d₁ - выбираемый по теплотехническому справочнику внутренний диаметр паропровода, мм;

l₁ - длина паропровода на участке У 1, м;

1.2- значение коэффициента местного сопротивления при повороте трубопровода на 90° (см. рис. 7.1);

R₁ - потери на трение 1 м паропровода (по указанному справочнику);

ω_1 - скорость движения пара, м/с;

R₁l₁ - суммарные потери на трение на участке У1;

z₁ - потери на местные сопротивления на участке;

R₁l₁+z₁ - полное сопротивление на участке У1;

Q₁ = $\sum G_1 i_{п}$ - количество теплоты, транспортируемое с паром на участке У 1.

8 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ ВТОРИЧНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ И МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Согласно тепловому балансу установку покидают отработавший теплоноситель, выпар (смесь пара испаренной влаги и воздуха) и нагретый материал, который необходимо охлаждать до заданной температуры.

Количество теплоты, уносимое отработавшим теплоносителем при тепловой обработке водяным паром рассчитывается по формулам (5.21 -5.24); при тепловой обработке в среде продуктов сжигания органического топлива по (5.25). Теплота выпара рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{исп}} = r \cdot M_{\text{исп}} \quad (8.1)$$

где: r - теплота парообразования при $P = 0.1$ МПа.

Теплота, отдаваемая материалом и формами при охлаждении, рассчитывается по формулам:

$$Q_{\text{мат}} = C_{\text{мат}} \cdot M_{\text{мат}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{в}}) \quad (8.2)$$

$$Q_{\text{ф}} = C_{\text{м}} \cdot M_{\text{м}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{в}}) \quad (8.3)$$

где: $C_{\text{мат}}$ - удельная массовая теплоемкость материала в конце тепловой обработки, кДж/кг $^{\circ}$ С;

$M_{\text{мат}}$ - масса материала, ч;

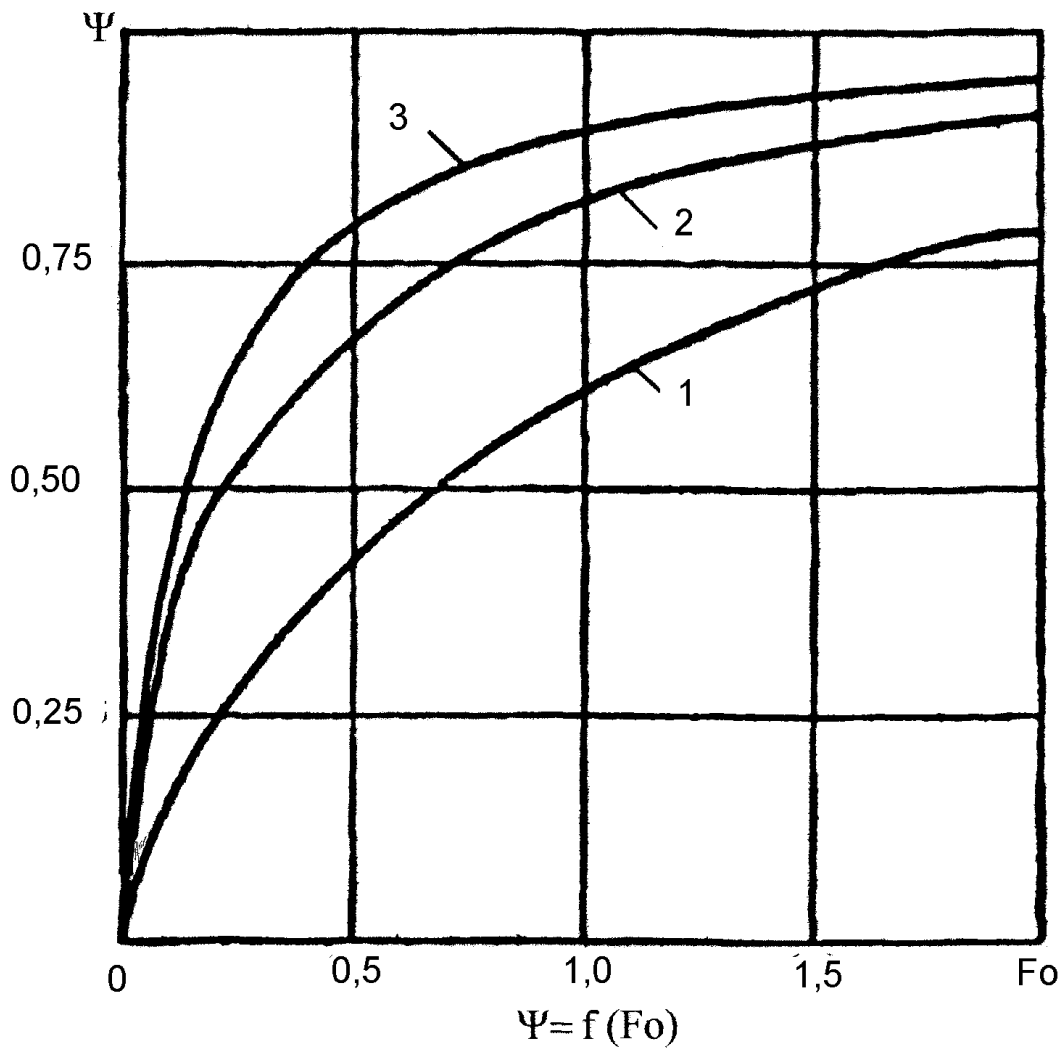
$T_{\text{в}}$ - средняя температура материала и форм в конце охлаждения (она должна быть на поверхности $T_{\text{в}} \approx 40$ $^{\circ}$ С). (Теплоту при охлаждении материала и форм возможно использовать только в непрерывнодействующих установках).

Общее количество теплоты вторичных энергоносителей рассчитывается как сумма теплот отдельных источников и относится, как правило, к одному часу, т.е.:

$$Q_{\text{вэр}} = \frac{Q_{\text{охл}} + Q_{\text{исп}}}{\tau} \quad (8.4)$$

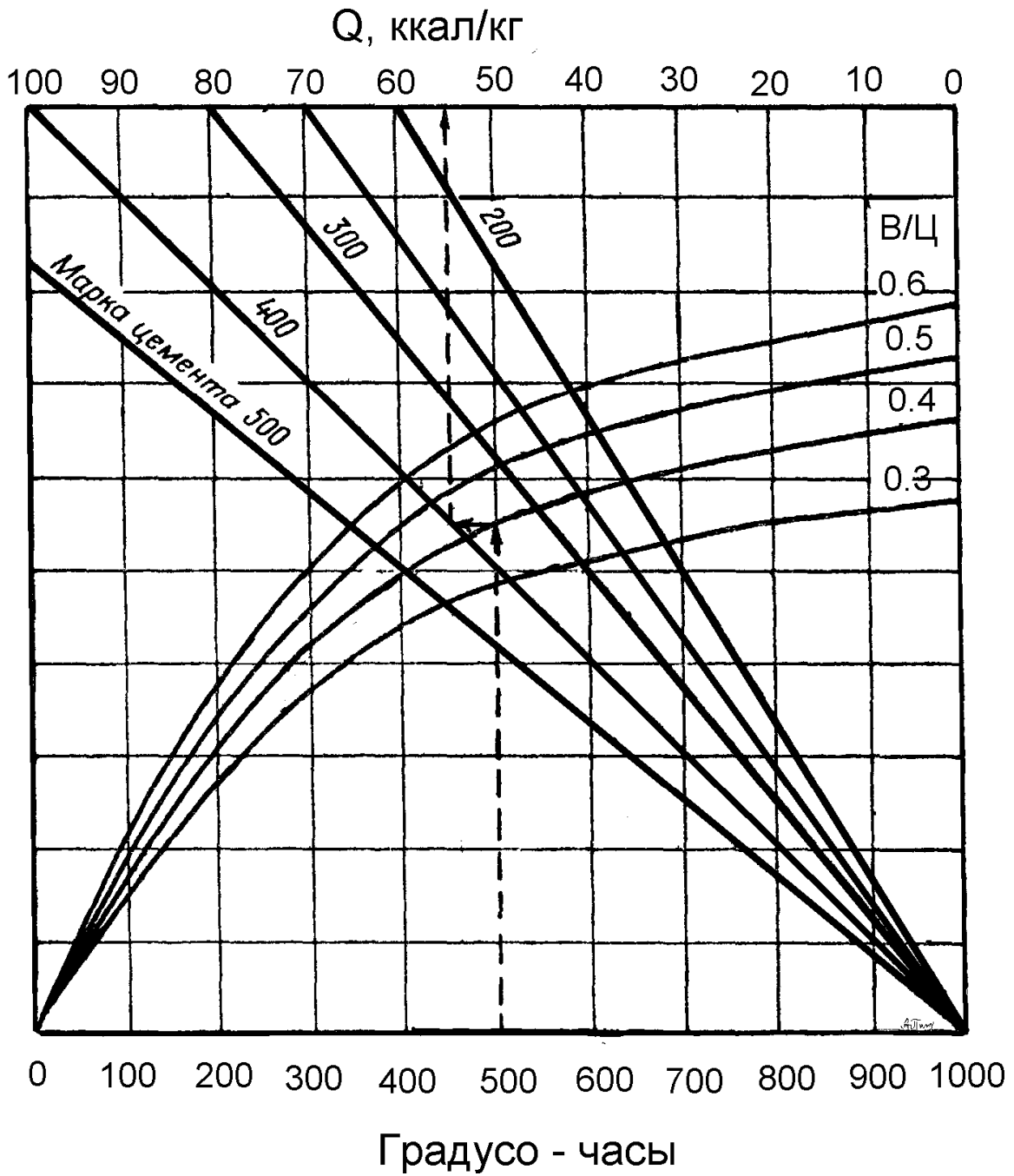
где: $Q_{\text{охл}}$ - теплота, полученная при охлаждении отработавших теплоносителей, кДж;

$Q_{\text{исп}}$ - теплота конденсации испаренной влаги, кДж.



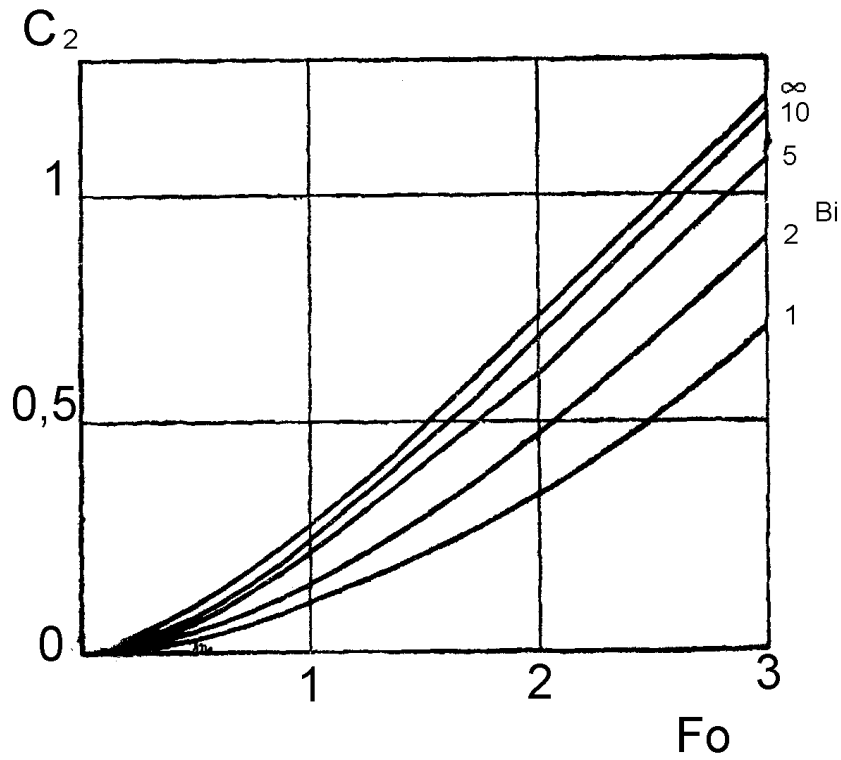
Кривые $\psi = f(Fo)$

1- неограниченная пластина; 2- неограниченный цилиндр; 3- шар.

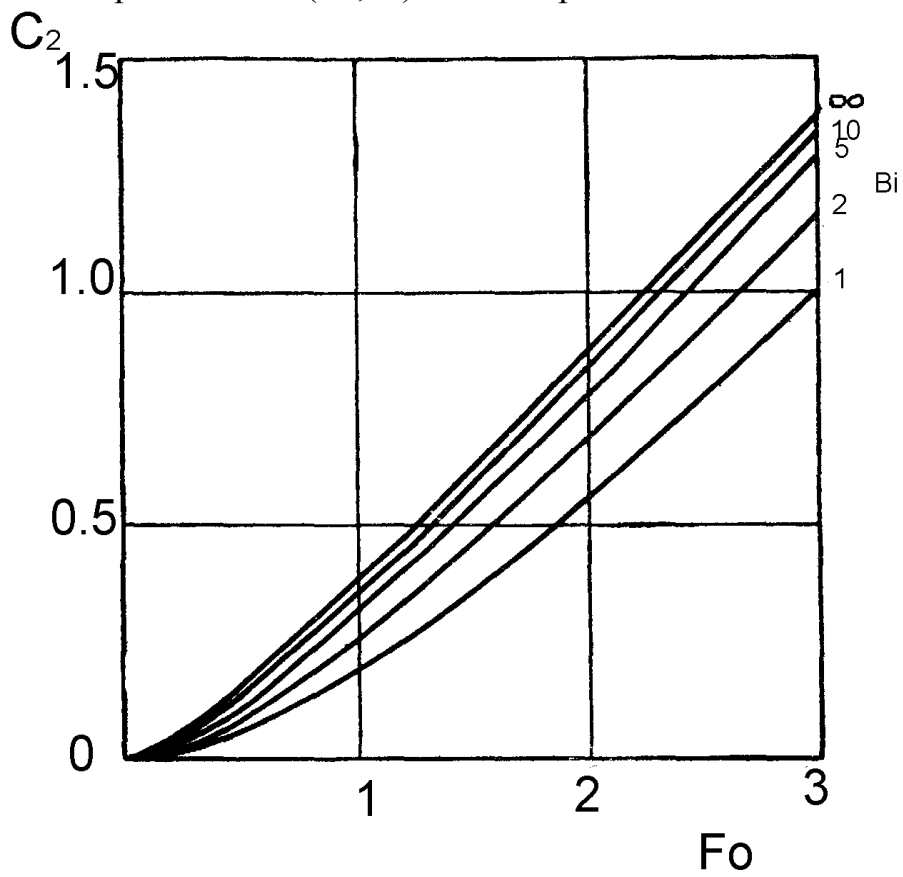


Номограмма для определения тепловыделения бетона, изготовленного на портландцементе, при тепловой обработке.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

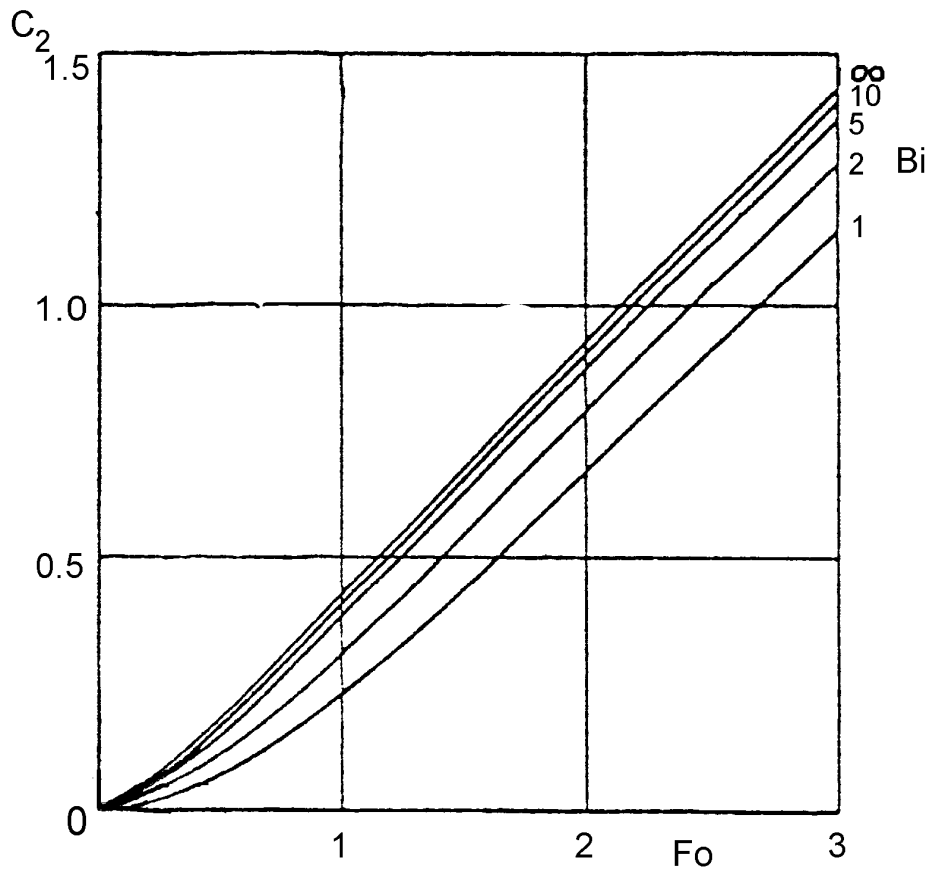


Кривые $C_2=f_2(Fo;Bi)$ для неограниченной пластины.

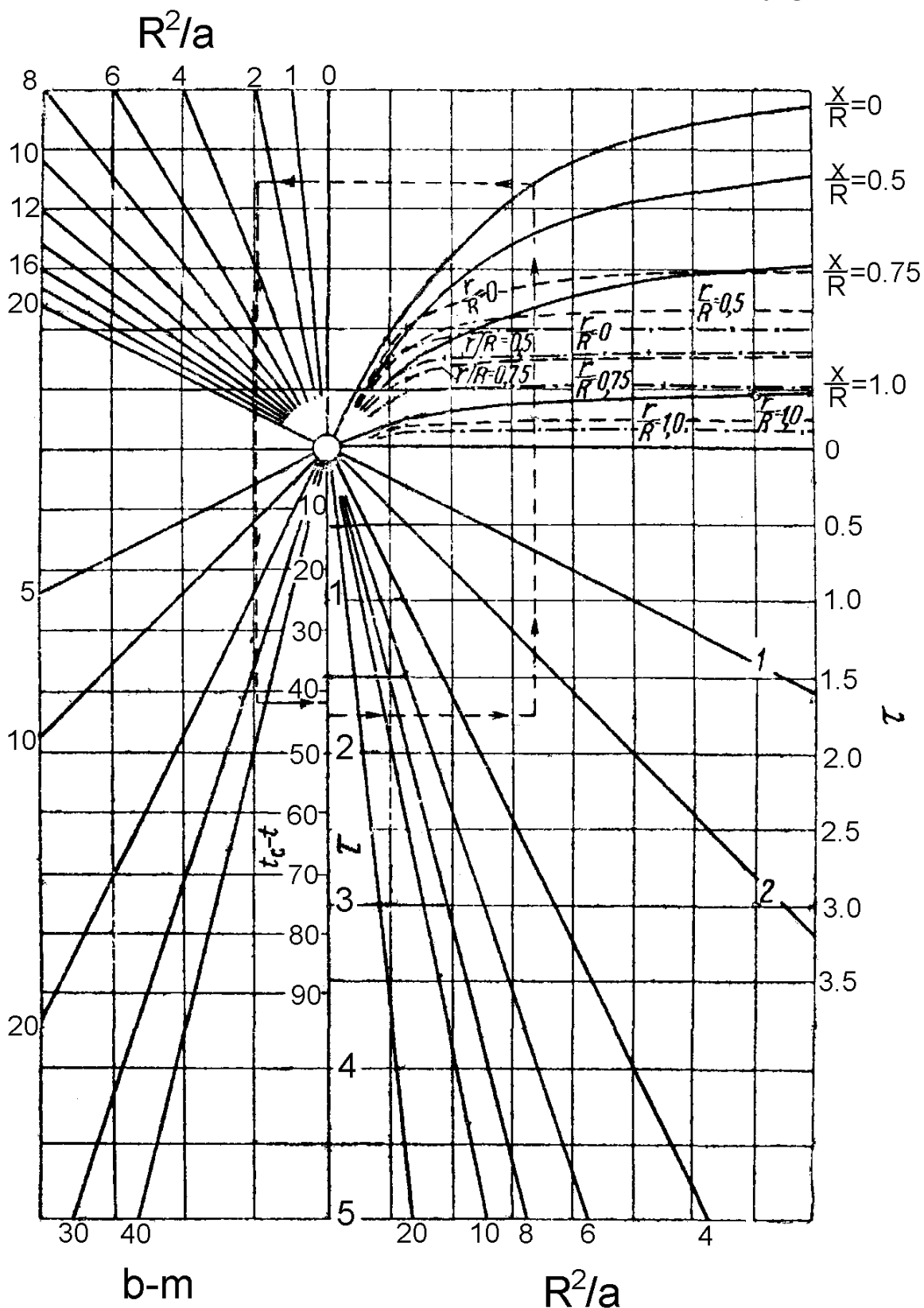


Кривые $C_2=f_2(Fo;Bi)$ для неограниченного цилиндра.

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 3

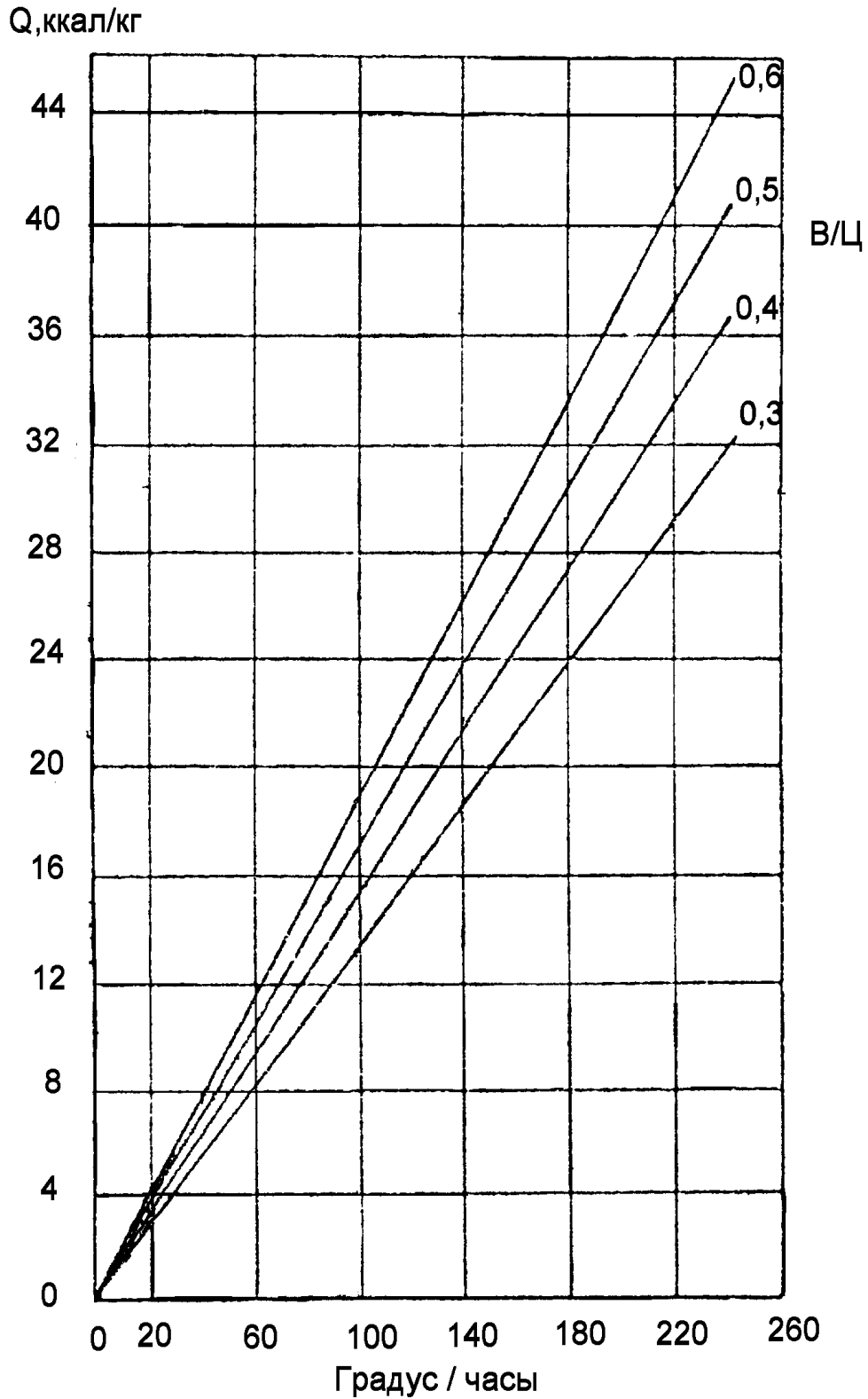


Кривые $C_2=f_2(Fo;Bi)$ для шара.



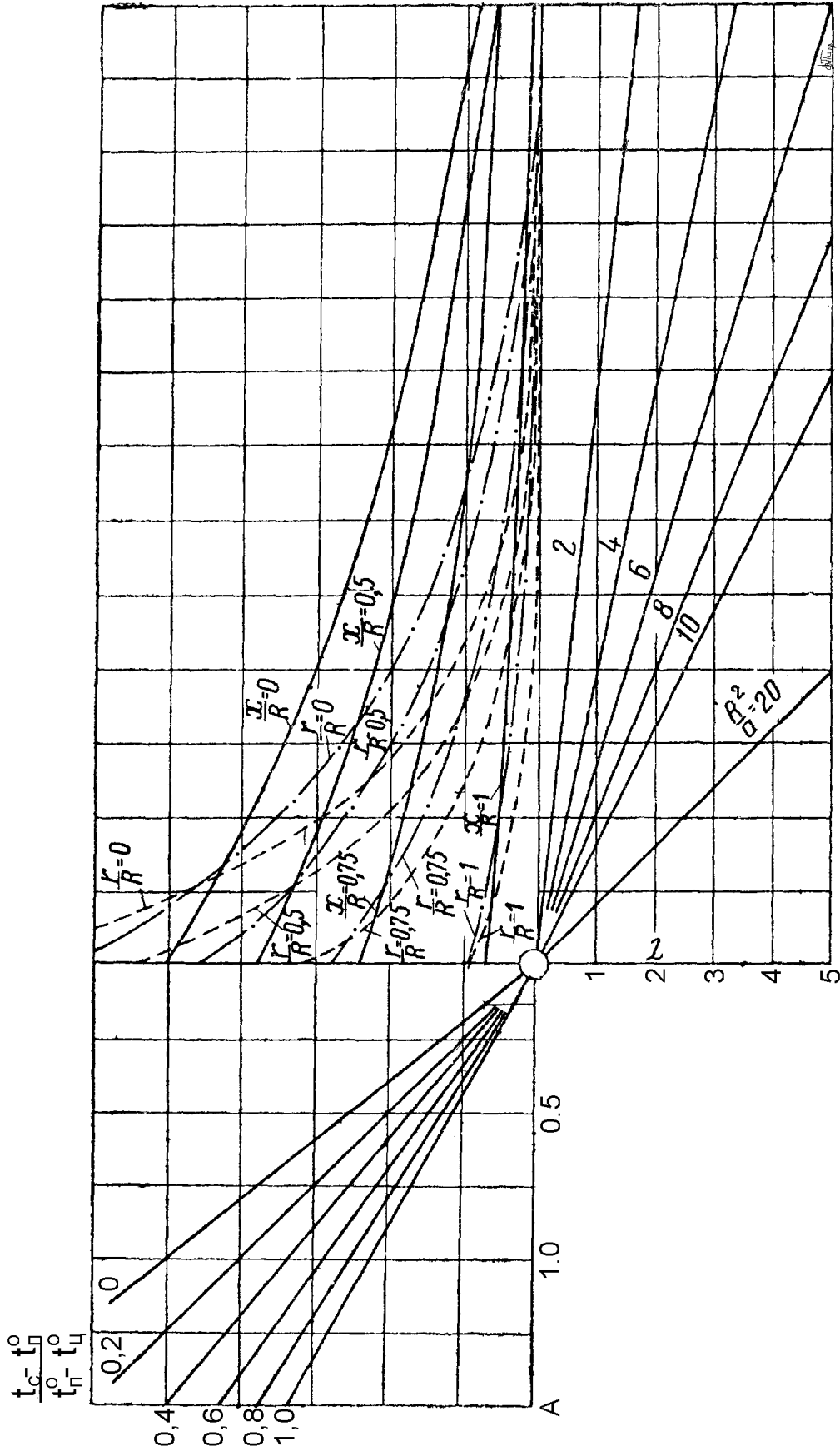
Номограмма для определения температуры и времени нагрева железобетонных изделий при изменении температуры паровоздушной среды по линейному закону: — неограниченная пластина; - - - неограниченный цилиндр; - · - · шар.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5



Тепловыделение портландцемента марки 400 в зависимости от градусо-часов.

Марка цемента	500	400	300	200
Поправочный коэффициент	1,2	1,0	0,8	0,6



Номограмма для определения величин $A_{пл}$; $A_{ц}$; $A_{ш}$

— неограниченная пластина; — · — неограниченный цилиндр; - - - шар

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Соотношения между единицами энергии (работы).

Единицы энергии (работы)	Дж	кгс·м	эрг	ккал	Вт·ч	эВ
1 Дж	1	0,102	10^7	0,239	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$6,24 \cdot 10^{18}$
1 кгс·м	9,81	1	$9,81 \cdot 10^7$	2,34	$2,72 \cdot 10^{-3}$	$6,12 \cdot 10^{19}$
1 эрг	10^{-7}	$1,02 \cdot 10^{-8}$	1	$2,39 \cdot 10^{-8}$	$2,78 \cdot 10^{-11}$	$6,24 \cdot 10^{11}$
1 ккал	4,19	0,427	$4,19 \cdot 10^7$	1	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$2,61 \cdot 10^{19}$
1 Вт·ч	3600	367	$3,6 \cdot 10^{10}$	860	1	$2,25 \cdot 10^{22}$
1 эВ	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$1,63 \cdot 10^{-20}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$3,83 \cdot 10^{-20}$	$4,45 \cdot 10^{-23}$	1

Примечание: 1 кВт·ч = 3,6 МДж (точно) = $3,6 \cdot 10^6$ Дж = $3,6 \cdot 10^{13}$ эрг = 367098 кгс·м = $224,71 \cdot 10^{23}$ эВ = 859,845 ккал = 1,3596 л.с.·ч;

1 ккал = 4186,8 Дж (точно) = 10^{-3} Мкал = $4,1868 \cdot 10^{10}$ эрг (точно) = 426,935 кгс·м = $2,6147 \cdot 10^{22}$ эВ = $1,163 \cdot 10^{-3}$ кВт·ч = $1,5812 \cdot 10^{-3}$ л.с.·ч.

Литература:

1. Лыков А.В. Теория сушки. – Москва: Энергия, 1976, 422с.
2. Перегудов В.В., Роговой М.И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и конструкций. Учебник для вузов. – Москва: Стройиздат, 1983, 416с.
3. Ерёмин И.Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. Учебник для вузов.- Москва: Высшая школа, 1986, 280с.
4. Теплотехника (под редакцией В.И. Крутова) М., Машиностроение, 1986, 462с.
5. Теоретические основы теплотехники. Книга 2. М., Энергоатомиздат, 1988г., 560с.
6. Перегудов В.В. Теплотехника и теплотехническое оборудование. Учебник для техникумов (под редакцией И.Ф. Ерёмина) М., Стройиздат, 1990г., 336с.
7. Марьямов Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона. Москва: Стройиздат, 1989г.
8. Кучеренко А.А. Тепловые установки заводов сборного железобетона. Учебное пособие для вузов. Киев, Вища Школа, 1977, 277с.
9. Ларионов В.В. Теплотехника. Учебник для вузов. Москва: Стройиздат, 1985, 432с.
10. Малинина Л.В. Тепловлажностная обработка тяжёлого бетона. Москва: Стройиздат, 1977, 128с.

Учебное издание

Составители: Сырица Галина Васильевна
Пикула Александр Иванович
Павлюкевич Аркадий Владимирович

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА НА ТЕМУ

«Разработка технологии тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий»

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Теплотехника и теплотехническое оборудование»

для студентов специальности 70.01.01

«Производство строительных изделий и конструкций»

Ответственный за выпуск : А.И. Пикула
Редактор: Т.В. Строкач
Технический редактор: А.Д. Никитчик
Корректор: Е.В. Никитчик

Подписано к печати Формат 1/16 Бумага писч. Гарнитура Times
New Roman. Усл. п. л. Уч. изд. л. Тираж экз. Заказ № Отпечатано
на ризографе Брестского государственного технического университета.
224017, Брест, ул. Московская, 267.