

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

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

**«Исследование внутреннего напряжённого состояния бетона при  
тепловой обработке в среде влажного насыщенного пара»**

**ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**«Теплотехника и теплотехническое оборудование»  
для студентов специальности 70 01 01  
дневной формы обучения**

**Брест 2004**

УДК 621.1 : 536.7

Методические указания предназначены для ознакомления студентов с процессами, происходящими при тепловой обработке тяжелого бетона в среде влажного насыщенного пара. Изучения возникающих напряжений и деформаций для выбора оптимального режима, скорости и условий тепловой обработки.

Составители : Г.В. Сырица, доцент, канд. техн. наук  
А.И. Пикула, ассистент

Рецензент: Зам. директора РУНИП «Сервис» УП «Белстройлицензия» Н.С.Щербач

## «Исследование внутреннего напряжённого состояния бетона при тепловой обработке в среде влажного насыщенного пара»

**Цель работы:** изучение механизма тепломассопереноса и исследование внутренних температурных полей при тепловой обработке тяжёлого бетона в среде влажного насыщенного пара с целью выбора оптимального режима и получения бездефектного изделия.

**Объект исследования:** строительный материал – тяжёлый бетон.

Лабораторная работа состоит из трёх частей:

- 1 - основы тепловой обработки в среде влажного насыщенного пара;
- 2 - теплотехнический расчёт параметров тепловой обработки;
- 3 - экспериментальные исследования температурного поля.

### 1. Тепловлажностная обработка изделий в камерах

Основным агрегатом для тепловлажностной обработки сборных бетонных и железобетонных изделий являются ямные пропарочные камеры.

**Режимы тепловлажностной обработки.** В пропарочных камерах, где в большинстве случаев тепловлажностная обработка происходит при непосредственном контакте открытых поверхностей изделий с теплоносителем, необходимо, чтобы применяемые в качестве теплоносителя насыщенный пар или паровоздушная смесь обеспечивали относительную влажность среды в камере в период изотермического прогрева в пределах 90—100%.

Общий цикл тепловлажностной обработки изделий подразделяется на периоды: предварительное выдерживание — до начала повышения температуры в камере; подъём температуры — до достижения заданного наивысшего уровня температуры; изотермический прогрев — выдерживание при наивысшей заданной температуре; охлаждение — снижение температуры камеры.

Режим твердения выражается суммой отдельных его периодов в часах.

Для получения заданных физико-механических свойств бетона назначение режимов тепловлажностной обработки производится до оптимальной продолжительности отдельных его периодов.

Предварительное выдерживание изделий до начала тепловой обработки улучшает условия прохождения процессов гидратации цементов и формирования начальной структуры бетона (начальной прочности), необходимой для уменьшения потерь преднапряжения в арматуре и предотвращения нарушений структуры бетона при тепловом воздействии.

Время предварительного выдерживания изделий назначается в зависимости от активности цемента, В/Ц бетона, температуры окружающей среды и других факторов, влияющих на температуру начального твердения бетона. При этом оптимальное время предварительного выдерживания тем короче, чем выше марка цемента и бетона и чем выше температура окружающей среды и жесткость бетонной смеси.

При применении добавок ускорителей твердения длительность предварительного выдерживания сокращается и удлиняется при введении в бетонную смесь поверхностно-активных добавок. При тепловлажностной обработке изделий с большими открытыми поверхностями, в том числе изделий, изготовленных с немедленной распушкой, целесообразно удлинять период предварительного выдерживания.

В период подъёма температуры в камере возникает опасность нарушения структуры бетона изделий (появление трещин, усадка, всучивание и т. п.). Эти процессы могут быть снижены за счёт увеличения длительности предварительного выдерживания, применения рациональных скоростей подъёма температуры, создания заданных параметров паровоздушной среды в камере по температуре, относительной влажности и давлению, а также использования горячих бетонных смесей. Скорость подъёма темпе-

ратуры в камере назначается с учетом начальной прочности бетона, достигнутой в период предварительного выдерживания.

В зависимости от величины начальной прочности бетона скорость подъема температуры в камере принимается по таблице 1.1.

**Таблица 1.1**

**Зависимость скорости подъема температуры от начальной прочности.**

Начальная прочность бетона (при сжатии), МПа	Скорость подъема температуры среды камеры, °С /ч
0,1—0,2	10—15
0,2—0,4	15—25
0,4—0,5	25—33
0,5—0,6	35—45
0,6	45—60

Примечания: 1. Начальная прочность бетона определяется на образцах-кубах с ребром не менее 10 см, на прессах, мощностью не более 25 кН.

2. Повышение температуры среды в камере со скоростью более 60 °С в час независимо от начальной прочности бетона не рекомендуется.

При загрузке изделий в пропарочную камеру, подогретую до 30—35 °С, первая ступень подъема температуры обеспечивается за счёт выдерживания изделий в камере без подачи пара в течение 1,5—2 ч.

При тепловлажностной обработке изделий, изготовленных из бетонной смеси с подвижностью более 8 см, скорость подъема температуры в камере уменьшается на 20—30 %, а при жесткости смеси более 60 с увеличивается на 15—20 % по сравнению с приведенными выше рекомендациями.

Относительная влажность среды камеры в период подъема температуры может быть понижена до 40—60 %, что в ряде случаев способствует повышению прочности бетона и улучшению качества открытых поверхностей изделий.

Изотермический прогрев изделий, изготовленных с использованием портландцемента, должен осуществляться при температуре 80—85 °С. Для изделий на шлакопортландцементе и пуццолоновых портландцементе температура изотермического прогрева может быть повышена до 90—95 °С. Однако назначение температуры изотермического прогрева более 80—85 °С должно быть экономически и экспериментально обосновано.

Длительность изотермического выдерживания может быть определена по таблице 1.2, где приведены ориентировочные величины относительной прочности тяжелого бетона различных марок на цементах 400—500 при применении умеренно жестких и подвижных смесей, в зависимости от цикла тепловлажностной обработки, В/Ц бетонов и сроков испытания контрольных образцов.

При применении камер с эффективной теплоизоляцией, когда понижение температуры среды камеры составляет не более 4—6°С в час, целесообразно после прогрева среды камеры до температуры изотермического выдерживания осуществлять термосное выдерживание изделий в камере без подачи пара в летнее время и с частичным пуском пара (2—3 ч) в зимнее.

При среднесуточной температуре наружного воздуха ниже 5°С в целях предотвращения образования трещин в изделиях, связанных с температурно-влажностными напряжениями, изделия после распалубки необходимо выдерживать не менее 12 ч. в помещениях с температурой не ниже 10°С.

Таблица 1.2

Проектная прочность в возрасте 28 суток	Ориентировочные значения В/Ц бетона	Общий цикл тепловлажностной обработки, ч.	Прочность бетона % от проектной при испытании контрольных образцов после окончания цикла ТВО через, ч			
			0,5 (в горячем состоянии)	4	12	24
200	1,5 – 1,3	5	20-30	30-40	34-44	38-48
		7	33-43	40-50	43-53	48-58
		9	41-51	47-57	50-60	55-65
		11	47-57	52-62	55-65	60-70
		13	52-62	56-66	60-70	62-72
		16	55-65	58-68	62-72	64-74
		20	57-67	60-70	63-73	65-75
300	2 – 1,7	5	28-38	35-45	38-48	41-51
		7	38-48	45-55	48-58	50-60
		9	47-57	52-62	55-65	58-68
		11	52-62	57-67	60-70	63-73
		13	56-66	60-70	64-74	66-76
		16	60-70	63-73	66-76	68-78
		20	62-72	65-75	68-78	70-80
400	2,5 – 2,2	5	36-46	40-50	43-53	46-56
		7	46-56	50-60	53-63	55-65
		9	52-62	56-66	60-70	61-71
		11	58-68	60-71	64-74	65-75
		13	62-72	65-75	68-78	69-79
		16	65-75	68-78	70-80	71-81
		20	68-78	70-80	72-82	72-82
500	3 – 2,8	5	42-52	45-55	48-58	50-60
		7	55-62	55-65	58-68	60-70
		9	59-69	62-72	65-75	66-76
		11	64-74	67-77	70-80	71-81
		13	67-77	70-80	73-83	74-84
		16	70-80	73-83	75-85	75-85
		20	72-82	75-85	76-86	76-86

## 2 Теплотехнический расчёт тепловой установки

Теплотехнический расчёт тепловой установки для ТВО тяжелого бетона включает в себя:

- расчёт количества теплоты на нагрев;
- тепловой баланс установки.

### 2.1 Определение расхода тепла на нагрев бетонных и железобетонных изделий

**2.1.1 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  $q_3$  на нагрев  $1\text{ м}^3$  бетона за заданное время  $T_{\text{под}}$  находим по формуле:

$$q_6 = c_6 \cdot \rho_6 \cdot (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \Psi_{\text{пл}} \quad (2.1)$$

Аналогично для неограниченного цилиндра :

$$q_6 = c_6 \cdot \rho_6 \cdot (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \Psi_{\text{ц}} \quad (2.2)$$

и шара :

$$q_6 = c_6 \cdot \rho_6 \cdot (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \Psi_{\text{ш}}, \quad (3.3)$$

где:  $c_6$  – удельная массовая теплоёмкость материала, кДж/кг·°С ;

$\rho_6$  – средняя плотность бетона, кг/м<sup>3</sup>;

$b$  – 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 :

$$q_6 = c_6 \cdot \rho_6 \cdot (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \Psi_{\text{пл}} - c_6 \cdot \rho_6 \frac{\rho \cdot p}{2 \cdot \alpha} \Phi_{\text{п}} + \rho \cdot p \cdot S_1 \cdot \tau_{\text{под}}, \quad (2.4)$$

где:  $\Phi_{\text{п}}$  – известная функция  $Fo$  и  $Bi$ ;

$S_1$  – поверхность испарения панели, отнесенная к 1 м<sup>3</sup> бетона в плотном теле, в м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> бетона.

### 2.1.2 Период изотермической выдержки.

Расход тепла на нагрев 1 м<sup>3</sup> бетона в этот период удобно определить по следующей формуле:

$$q_6 = c_6 \cdot \rho_6 \cdot [(t_{\text{ср.из.}} - t_{\text{ср.под.}}) - \tau_{\text{из.}} \cdot m_{\text{из.}}] \quad (2.5)$$

При испарении влаги с одной стороны панели:

$$q_6 = c_6 \cdot \rho_6 \cdot [(t_{\text{ср.из.}} - t_{\text{ср.под.}}) - \tau_{\text{из.}} \cdot m_{\text{из.}}] + \rho \cdot p \cdot S_1 \cdot \tau_{\text{из.}}, \quad (2.6)$$

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 прогрета, °С.

**2.1.3 Исходные данные для расчёта.** Подсчитать расход тепла на нагрев образца на стадиях подъёма температур и изотермического прогрета при следующих данных :

состав бетона на 1 м<sup>3</sup> :

портландцемент белгородский марки 400

$q_{\text{ц}} = 470$  кг

щебень

$q_{\text{щ}} = 1060$  кг

песок

$q_{\text{пес}} = 715$  кг

вода

$q_{\text{в}} = 185$  кг

средняя плотность бетона

$\rho_6 = 2430$  кг/м<sup>3</sup>

средний коэффициент теплообмена

$\dot{\alpha} = 251.4$  кДж/м<sup>2</sup>·ч·°С

или  $\dot{\alpha} = 69.83$  Вт/м<sup>2</sup>·°С

коэфф. теплопроводности бетона

$\lambda_6 = 1,746$  Вт/м·°С

размеры образца

$\delta_6 = 0,1 \times 0,1 \times 0,1$  м

характерный размер образца

$R = 0,05$  м

объём одного образца

$V = 0,001$  м<sup>3</sup>

температура образца 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 прогрета

$t_{\text{из}} = 85$  °С

продолжительность периода изотермического прогрета  $\tau_{\text{из}} = 2$  ч

**Порядок расчёта :**

1. Определяем теплоёмкость бетона, принимая во внимание, что вес сухих составляющих :
- $$g_{\text{сух}} = g_{\text{ц}} + g_{\text{ш}} + g_{\text{п}} (\text{кг} / \text{м}^3), \quad (2.7)$$

тогда удельная массовая теплоёмкость бетона :

$$C_{\text{б}} = \frac{0.838 \cdot g_{\text{сух}} + 4.19 \cdot g_{\text{в}}}{g_{\text{сух}} + g_{\text{в}}} (\text{кДж/кг}^\circ\text{С}) \quad (2.8)$$

2. Вычисляем коэффициент температуропроводности бетона :

$$a = \frac{\lambda_{\text{б}}}{C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}}} (\text{м}^2/\text{ч}) \quad (2.9)$$

и величину:  $\frac{R^2}{a}$  (ч). (2.10)

3. Вычисляем величину  $A$ , принимая во внимание, что  $Q_{\text{э2в}} = 419 \text{ кДж/кг}$  (определено по приложению 2).

$$A = 0.0023 Q_{\text{э2в}} (B / \text{Ц})^{0.44} (\text{кДж/кг}) \quad (2.11)$$

4. Вычисляем критерии  $Fo$  и  $Bi$  :

$$Fo = \frac{a \cdot \tau_{\text{под}}}{R^2} \quad (2.12)$$

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} \quad (2.13)$$

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

$$m = \frac{A \cdot \text{Ц} \cdot \left( t_0 + \frac{bR^2}{a} \cdot C_2 \right)}{c \cdot \rho} (\text{}^\circ\text{С} / \text{ч}) \quad (2.14)$$

6. По приложению 1 при известном значении  $Fo$ , находим  $\psi_{\text{пл}}$  для шара. Тогда удельный расход тепла на нагрев бетона:

$$q_{\text{б.п.}} = c_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} (b - m) \cdot \tau_{\text{под}} \psi_{\text{пл}} (\text{кДж/м}^3) \quad (2.15)$$

7. Расход тепла на нагрев образца :

$$Q_{\text{н}} = q_{\text{б.п.}} \cdot V_{\text{п}} (\text{кДж}) \quad (2.16)$$

8. По номограмме в приложении 4 для известных значений :

$$t_{\text{под}}; \quad \frac{R^2}{a} \quad \text{и} \quad b - m \quad (2.17)$$

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

определим по приложению 4 значение разности температур между поверхностью бетона и средой, величину  $T(t_c - t(R; 2))$ , откуда :

$$t_{\text{п}} = t(R; 2) = t_c - (t_c - t(R; 2)) = t_0 + b \cdot \tau - (t_c - t(R; 2)) (\text{}^\circ\text{С}) \quad (2.18)$$

и температуру центра панели при  $\left(\frac{x}{R} = 0\right)$ , имеем по приложению 4 значение  $T(t_c - t(0; 2))$ ,

откуда :  $t_{\text{ц}} = t(0; 2) = t_c - (t_c - t(0, 2)) = t_0 + b \cdot \tau - (t_c - t(0, 2)) (\text{}^\circ\text{С})$  (2.19)

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

$$t_{\text{ср. под.}} = \frac{t_{\text{п}} + 2t_{\text{ц}}}{3} (\text{}^\circ\text{С}) \quad (2.20)$$

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

$$t_6 = \frac{t_0 + t_{\text{ср.под.}}}{2} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.21)$$

11. За весь период подъёма температуры панель будет иметь :

$$V_{\text{под.}} = t_6 \cdot \tau \text{ (}^\circ\text{C ч)} \quad (2.22)$$

12. По графикам в приложении 5 находим, что при  $V_{\text{под.}}$  ( $^\circ\text{C ч}$ ), В/Ц и марке цемента 400 тепловыделение 1 кг. цемента составит  $Q_3$  (кДж/кг), а для 1 м<sup>3</sup> бетона :

$$Q_{\text{под.}} = g_{\text{ц}} \cdot Q_{\text{экз}} \text{ (кДж/м}^3\text{)} \quad (2.23)$$

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

$$T_{\text{из}}=3; \quad \frac{R^2}{a} \quad \text{и} \quad \frac{t_{\text{из}} - t_{\text{п}}^0}{t_{\text{п}}^0 - t_{\text{ц}}^0}, \quad (2.24)$$

$$\text{находим } A_{\text{пл}} \text{ при } \frac{x}{R} = 0 \quad \text{и} \quad A_{\text{пл}} \text{ при } \frac{x}{R} = 1 \quad (2.25)$$

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

$$t_{\text{ц}} = t(0;3) = t_{\text{с}} - (t_{\text{п}}^0 - t_{\text{ц}}^0) \cdot A_{\text{пл}} \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (2.26)$$

а температура поверхности :

$$t_{\text{п}} = t(R;3) = t_{\text{с}} - (t_{\text{п}}^0 - t_{\text{ц}}^0) \cdot A_{\text{пл}} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.27)$$

15. Средняя температура панели в конце периода изотермической выдержки:

$$t_{\text{ср.из.}} = \frac{t_{\text{п}} + 2t_{\text{ц}}}{3} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.28)$$

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

$$t_6 = \frac{t_{\text{ср.под.}} + t_{\text{ср.из.}}}{2} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.29)$$

17. Определяем количество градусо-часов за период изотермического прогресса :

$$V_{\text{из.}} = t_6 \cdot \tau_{\text{из}} \text{ (}^\circ\text{C ч)} \quad (2.30)$$

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

$$V = V_{\text{под.}} + V_{\text{из.}} \text{ (}^\circ\text{C ч)} \quad (2.31)$$

19. По приложению 2 находим, что для полученных градусо-часов, и марки цемента 400 тепловыделение 1 кг цемента составит  $Q_{\text{экз}}$  (кДж/кг), а для 1 м<sup>3</sup> бетона :

$$Q_{\text{из+под.}} = g_{\text{ц}} \cdot Q_{\text{экз}} \text{ (кДж)} \quad (2.32)$$

20. Вычисляем  $m$  по формуле :

$$m_{\text{из.}} = \frac{Q_{\text{из+под.}} - Q_{\text{под.}}}{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot \tau_{\text{из}}} \text{ (}^\circ\text{C / ч)} \quad (2.33)$$

21. Удельный расход тепла в период изотермической выдержки :

$$q_{\text{б.из.}} = C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot [(t_{\text{ср.из.}} - t_{\text{ср.под.}}) - \tau_{\text{из}} \cdot m_{\text{из.}}] \text{ (кДж/м}^3\text{)} \quad (2.34)$$

22. Расход тепла в этот период на панель :

$$Q_{\text{из.}} = q_{\text{б.из.}} \cdot V_{\text{п}} \text{ (кДж)} \quad (2.35)$$

## 2.2 Тепловой баланс установки.

Тепловой баланс различен для установок периодического действия и непрерывно действующих. Основное отличие состоит в том, что в установках периодического дейст-

вия 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  $T_0 = 0^\circ\text{C}$  и  $T_0 = T_u$  ( $T_u$  - температура среды в цехе). В последнем все приходные статьи баланса, содержащие разность  $(T_u - T_0)$ , 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.

В данной лабораторной работе необходимо составить тепловой баланс относительно  $0^\circ\text{C}$  для камеры периодического действия размерами  $50 \times 30 \times 20$  см и определить необходимую мощность электрических элементов для нагрева этой камеры.

### 2.2.1 Приходные статьи теплового баланса

1. Теплота, вносимая материалом в установку:

$$Q'_1 = C_{\text{см}} \cdot M_{\text{см}} \cdot (T_u - T_0) = C_{\text{см}} \cdot M_{\text{см}} \cdot T_u \quad (\text{кДж}) \quad (2.36)$$

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

$M_{\text{см}}$  - масса материала в установке, кг;

$T_u$  - температура материала,  $^\circ\text{C}$ ;

$C_i$  - удельная массовая теплоёмкость  $i$ -го компонента,  $\text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$M_i$  - масса  $i$ -го компонента, кг.

2. Теплота экзотермии вяжущего :

$$Q'_2 = q_{\text{экс}} \cdot M_{\text{ц}} \quad (\text{кДж}), \quad (2.37)$$

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

$M_{\text{ц}}$  - масса вяжущего в изделиях, загружаемых в камеру, кг.

Тепловыделение цемента при тепловой обработке можно рассчитать по формуле :

$$q_{\text{экс}} = 9.64 \cdot 10^{-4} \cdot M_{\text{ц}} \cdot \left(\frac{B}{C}\right)^{0.44} \cdot f \sum_{\tau=0}^{\tau} (\bar{T}_0, \tau) \quad (\text{кДж/кг}) \quad (2.38)$$

В выражении (5.5) обозначены :

$M_{\text{ц}}$  - марка цемента;

$$f \sum_{\tau=0}^{\tau} (\bar{T}_0, \tau) = 0.5 \cdot (T_{\text{Кн}} + T_u) \cdot \tau_{\text{н}} + T_{\text{Киз}} \cdot \tau_{\text{из}} \quad (2.39)$$

$T_{\text{Кн}}$  - температура бетона в конце периода нагрева,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_{\text{Киз}}$  - температура бетона в конце периода изотермической выдержки,  $^\circ\text{C}$ ;

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

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

При расчёте  $q_{\text{экс}}$  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, учитывается экзотермия цемента.

3. Теплота, вносимая теплоносителем (зависит от рода теплоносителя).

- Теплота, вносимая влажным насыщенным паром :

$$Q'_3 = M_n \cdot h'' \cdot x \quad (\text{кДж}), \quad (2.40)$$

где:  $M_n$  - 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

$$Q''_3 = Q_n^p \cdot B \quad (\text{кДж}) \quad (2.41)$$

где:  $Q_n^p$  - низшая теплотворность топлива, кДж/кг;  
 $B$  - расход топлива за цикл тепловой обработки, кг.

Теплота, вносимая электрическими нагревателями :

$$Q'''_3 = N \cdot \tau \quad (\text{кДж}), \quad (2.42)$$

где:  $N$  - установочная мощность нагревателей, кВт;  
 $\tau$  - время цикла, ч.

4. Теплота, вносимая в установку подсосываемым воздухом через открытые проёмы или отверстия :

$$Q'_4 = C_v \cdot M_a \cdot (T_u - T_0) = C_v \cdot M_a \cdot T_u \quad (\text{кДж}), \quad (2.43)$$

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

$M_a$  - масса воздуха, подсосываемого в камеру, кг.:

$$M_a = 6900 \cdot b \cdot \sqrt{h^3} \cdot A \cdot k_{пр} \cdot n \cdot \tau, \quad (2.44)$$

где:  $A = \sqrt{\frac{(\rho_0 - \rho_k) \cdot \rho_0 \cdot \rho_k}{(\sqrt[3]{\rho_0} + \sqrt[3]{\rho_k})^3}}$  коэффициент (2.45)

$b$  - ширина проема, м;

$h$  - высота проема, м;

$k_{пр}$  - 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  $T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

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

$\rho_k$  - плотность воздуха в установке,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\tau$  - время открытия проёма, ч.

5. Теплота конструкций ограждения:

$$Q'_5 = \sum_{i=1}^n C_i \cdot M_i \cdot (T_i - T_0) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot M_i \cdot T_i \quad (\text{кДж}), \quad (2.46)$$

где:  $i$  - число слоёв в ограждении;

$M_i$  - масса  $i$ -го слоя ограждения, кг;

$T_i$  - температура  $i$ -го слоя ограждения,  $^\circ\text{C}$ ;

$C_i$  - удельная массовая теплоёмкость  $i$ -го слоя ограждения,  $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{C}$ ;

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

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

## 2.2.2 Расходные статьи теплового баланса

1. Теплота нагрева материала.

Расчет расхода теплоты на нагрев изделий приведен в разделе 2.1.

2. Теплота, затрачиваемая на испарение влаги:

$$Q_2 = r_n \cdot M_{\text{исп}}, \quad (\text{кДж}) \quad (2.47)$$

где:  $r_n$  – 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:

$$M_{\text{исп}} = q_m \cdot F_m \cdot \tau_{\text{из}}, \quad (\text{кг}) \quad (2.48)$$

где:

$F_m$  – массоотдающая поверхность изделия,  $\text{м}^2$ ;

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

$$q_m = A \cdot \exp(-r/R \cdot T_n), \quad (\text{кг/м}^2\text{ч}) \quad (2.49)$$

где:  $R$  – газовая постоянная для воды;

$T_n$  – температура поверхностного слоя материала,  $^{\circ}\text{C}$ ;

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

3. Теплота нагрева испарённой влаги:

$$Q_3 = C_n \cdot (M_{\text{исп}}^{\text{H}} + M_{\text{исп}}^{\text{из}}) \cdot (T_r - T_0), \quad (\text{кДж}) \quad (2.50)$$

где:  $C_n$  – удельная массовая теплоемкость водяного пара,  $\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$ ;

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

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

$T_r$  – температура паровоздушной смеси на выходе из установки,  $^{\circ}\text{C}$ .

4. Теплота нагрева подсасываемого воздуха в установку:

$$Q_4 = C_{\text{в}} \cdot M_{\text{в}} \cdot (T_r - T_0) \quad (\text{кДж}), \quad (2.51)$$

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

$T_r$  – температура теплоносителя,  $^{\circ}\text{C}$ .

5. Теплота, уносимая из установки отработавшим теплоносителем:

$$Q_5 = C \cdot M_r \cdot (T_r - T_0) \quad (\text{кДж}) \quad (2.52)$$

где:  $M_r$  – масса теплоносителя, фазовое состояние и количество которого зависят от способа теплоподвода,  $\text{кг}$ .

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

$$Q_5 = M_n \cdot h' = 4.19 \cdot T_n \cdot M_n \quad (\text{кДж}) \quad (2.53)$$

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

$$M_k = M_n - (0.1 \dots 0.05) \cdot M_n = (0.90 \dots 0.85) \cdot M_n \quad (\text{кг})$$

а количество теплоты, выносимое конденсатом:

$$Q_5 = (0.9 \dots 0.85) \cdot 4.19 \cdot T_n \cdot M_n \quad (\text{кДж}) \quad (2.54)$$

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

$$Q_5 = (4.19 \cdot T_n + 0.15 \cdot M_n \cdot h'') \cdot M_n \quad (\text{кДж}) \quad (2.55)$$

При тепловой обработке материала продуктами сжигания органического топлива:

$$Q_5 = C_r \cdot V_r \cdot V \cdot (T_r - T_{отх}) \quad (\text{кДж}), \quad (2.56)$$

где:  $C_r$  - средняя удельная объемная теплоемкость газовой смеси при  $T_r$ , кДж/кг $^{\circ}$ С;  
 $V_r$  - выход продуктов горения при сжигании 1 кг ( $\text{м}^3$ ) топлива;  
 $T_{отх}$  - температура отходящих газов при низкотемпературной тепловой обработке ( $T_r = 90^{\circ}\text{C}$ )  $T_{отх} = 35 \dots 40^{\circ}\text{C}$ . При высокотемпературной обработке ( $T_r \approx 150 \dots 300^{\circ}\text{C}$ ) температура  $T_{отх} = 35 \dots 40^{\circ}\text{C}$ .

6. Теплота, расходуемая на нагревание конструкций камеры

$$Q_6 = \sum_{i=1}^p C_i \cdot M_i \cdot (T_{к,i} - T_{н,i}) \quad (\text{кДж}), \quad (2.57)$$

где:  $p$  - число слоев в ограждении;

$M_i$  - масса  $i$ -го слоя, кг;

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

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

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

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^p \delta_i}{\sum_{i=1}^p \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}) \quad (2.58)$$

При этом температура внутренней поверхности стенки при тепловой обработке в среде влажного насыщенного пара принимается при  $\tau = 0$ ,  $T_{н1} = T_{н}$ . Аналогично принимается температура внутренней поверхности ограждения при лучистом теплоподводе, т.е.  $T_{н1} = T_{н}$ . В камерах с конвективным теплоподводом от движущихся газов температуру внутренней поверхности ограждения  $T_{н1}$  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 аккумулированную теплоту.

$$Q_6 = \sum_{i=1}^p 7.2 \cdot \lambda_i \cdot F_r \cdot (T_{к,i} - T_{н,i}) \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\pi \cdot a_i}} \quad (\text{кДж}), \quad (2.59)$$

где:  $F_r = \sqrt{F_{н1} \cdot F_{вн}}$  - площадь поверхностного слоя в ограждении;

$F_{вн}$  - площадь внутренней поверхности,  $\text{м}^2$ ;

$F_{н1}$  - площадь наружной поверхности ограждения,  $\text{м}^2$ ;

$\tau$  - время нагрева, ч;

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

7. Теплотери через ограждающие конструкции установок:

$$Q_7 = K \cdot F_r \cdot (T_{н1} - T_0) \cdot \tau \quad (\text{кДж}), \quad (2.60)$$

где:  $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^p \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$  - коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт/м}^2\text{C}$ ; (2.61)

$\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи от среды в установке к внутренней поверхности ограждения камеры, Вт/м<sup>2</sup>°С;

$\alpha_2$  - коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности ограждения в окружающую среду, Вт/м<sup>2</sup>°С;

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

$$\frac{1}{\alpha_1} \ll \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (2.62)$$

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

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.63)$$

Аналогично рассчитывается К 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<sup>2</sup>°С, для второй зоны, лежащей ниже первой, -  $K = 0.23$  Вт/м<sup>2</sup>°С; для более заглубленной зоны (включая дно установки)  $K = 0.12$  Вт/м<sup>2</sup>°С.

8. Неучтенные потери теплоты установкой:

$$Q_8 = (0.05 \dots 0.1) \cdot \sum Q_{расх} \quad (\text{кДж}) \quad (2.64)$$

Уравнение теплового баланса:

$$\sum Q_{пр} = \sum Q_{расх} \quad (2.65)$$

Вид этого уравнения зависит от рода теплоносителя.

- Для влажного насыщенного пара:

$$M_n \cdot (h'' \cdot x - h') = M_n \cdot r \cdot x = \sum Q_{расх} - q_{эвк} \cdot M_{ц}, \quad (2.66)$$

$$\text{отсюда:} \quad M_n = \frac{\sum Q_{расх} - q_{эвк} \cdot M_{ц}}{r \cdot x} \quad (\text{кг}) \quad (2.67)$$

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

$$3.6 \cdot N \cdot \tau = \sum Q_{расх} - q_{эвк} \cdot M_{ц} \quad (2.68)$$

Отсюда установленная мощность:

$$N = \frac{\sum Q_{расх} - q_{эвк} \cdot M_{ц}}{3.6 \cdot \tau} \quad (\text{кВт}) \quad (2.69)$$

Результаты расчёта теплового баланса сводятся в таблицу 2.1

Таблица 2.1 **Тепловой баланс установки**

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

### 3 Экспериментальные исследования температурного поля в бетоне

Целью исследований является экспериментальное изучение температурных деформаций, возникающих в бетоне при его нагреве в среде влажного насыщенного пара.

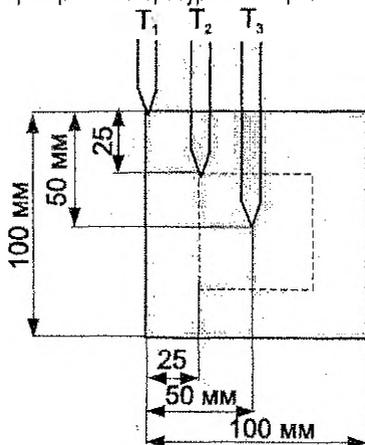
#### 3.1 Испытательное оборудование и средства измерений

- пропарочная камера;
- термометр от 0 °С до 200 °С с ценой деления 1 °С;
- образец с замонтированными в характерных точках термопарами;
- потенциометр ;
- термопреобразователи – термопары типа ХК.

#### 3.2 Подготовка образцов

Изготавливается образец из тяжелого бетона, в который заделываются 3 термопары: в центре, на поверхности и на 1/4L от поверхности образца. Затем образец устанавливается в пропарочную камеру.

Проверяется работоспособность камеры, термопар и потенциометра. Измеряется начальная температура образца и температура в камере.



#### 3.3 Методика проведения эксперимента

После подготовительных операций и измерения начальных параметров включается пропарочная камера. Через каждые 5 мин. производятся измерения температуры в различных точках образца.

Температура среды в камере должна быть  $90 \pm 5^\circ\text{C}$

Процесс нагрева образца ведут до  $80 \pm 5^\circ\text{C}$  ( температура поверхности) и прогрева его по сечению (температура центра) с максимальной разностью в  $5^\circ\text{C}$ .

В каждом промежутке рассчитывают разность температур между слоями и температурный градиент, возникающий в образце.

#### 3.4 Обработка результатов

Все результаты измерений заносят в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 Экспериментальные данные

N п/п	Время		Температура в слоях									Градиент температуры °С/м				
	Час. мин.	Δ мин	Датчик 1			Датчик 2			Датчик 3			град ΔT <sub>1</sub> T <sub>2</sub>	град ΔT <sub>2</sub> T <sub>3</sub>	град ΔT <sub>1</sub> T <sub>3</sub>		
			mV	T <sub>1</sub> °C	ΔT <sub>1</sub> °C	mV	T <sub>2</sub> °C	ΔT <sub>2</sub> °C	mV	T <sub>3</sub> °C	ΔT <sub>3</sub> °C					
1																
n																

По полученным значениям разницы температур и времени её изменения определяют температурный градиент.

По определённым значениям строят графики : зависимость  $T$  от времени (для каждого датчика) и  $\text{grad } T$  от времени (послойно для образца). На графиках выделяют периоды : нагрева материала, и изотермической выдержки.

### 3.5 Выводы.

По результатам проведённой работы делается заключение о температурных деформациях в бетоне на стадии подъёма температур и изотермического выдерживания. Необходимости изменения и выборе оптимального режима тепловой обработки для получения бездефектного изделия.

Оценку напряжённого состояния проводят по величине накопления энтропии:

$$d_e S = \frac{1}{T} d(q_n - q_m r)$$

$$d_e S = j_n \text{grad} \frac{1}{T} - j_c \text{grad} \frac{\mu}{T}$$

$\mu$  - химический потенциал (принимается по табличным данным)

Для проведения бездефектного режима ТВО необходимо, чтобы:

$$d_e S = d_e S,$$

где:  $j_n$  - поток теплоты, может быть определён по формуле:

$$j_n = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

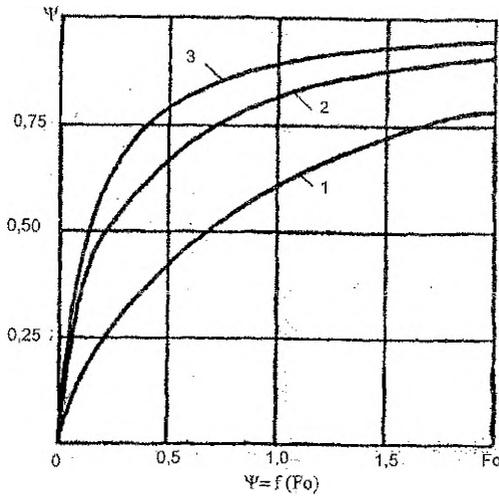
$j_c$  - поток массы, может быть определён по формуле:

$$j_c = -a_m \rho_0 \frac{dc}{dx}$$

### Литература:

1. Дыков 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. Лариков В.В. Теплотехника. Учебник для вузов. - Москва: Стройиздат, 1985, 432с.
10. Мапинина Л.В. Тепловлажностная обработка тяжёлого бетона. - Москва: Стройиздат, 1977, 128с.

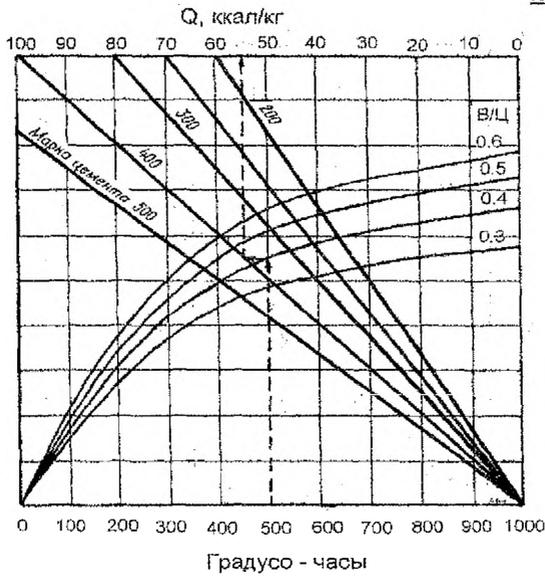
**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**



Кривые  $\psi = f(Fo)$

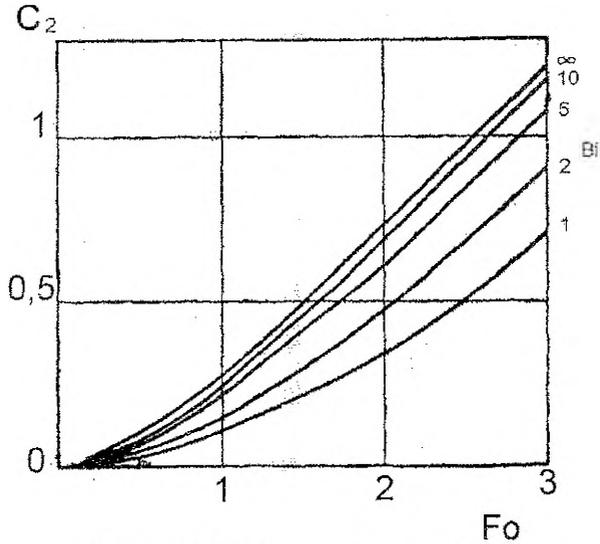
1- неограниченная пластина; 2- неограниченный цилиндр; 3- шар.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**



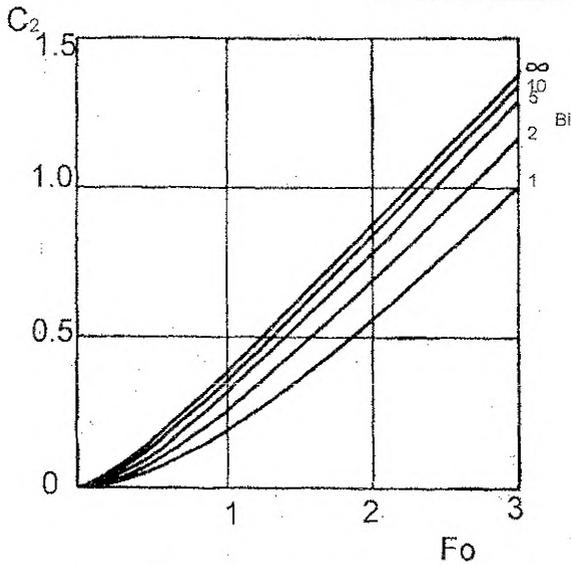
Номограмма для определения тепловыделения бетона, изготовленного на портландцементе, при тепловой обработке.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

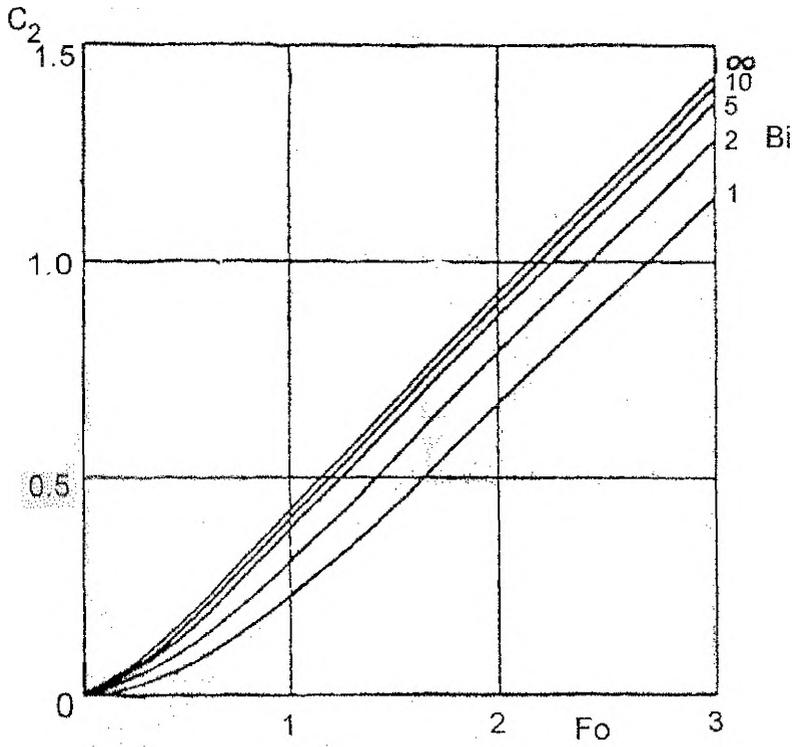


Кривые  $C_2=f_2(Fo;Bi)$  для неограниченной пластины.

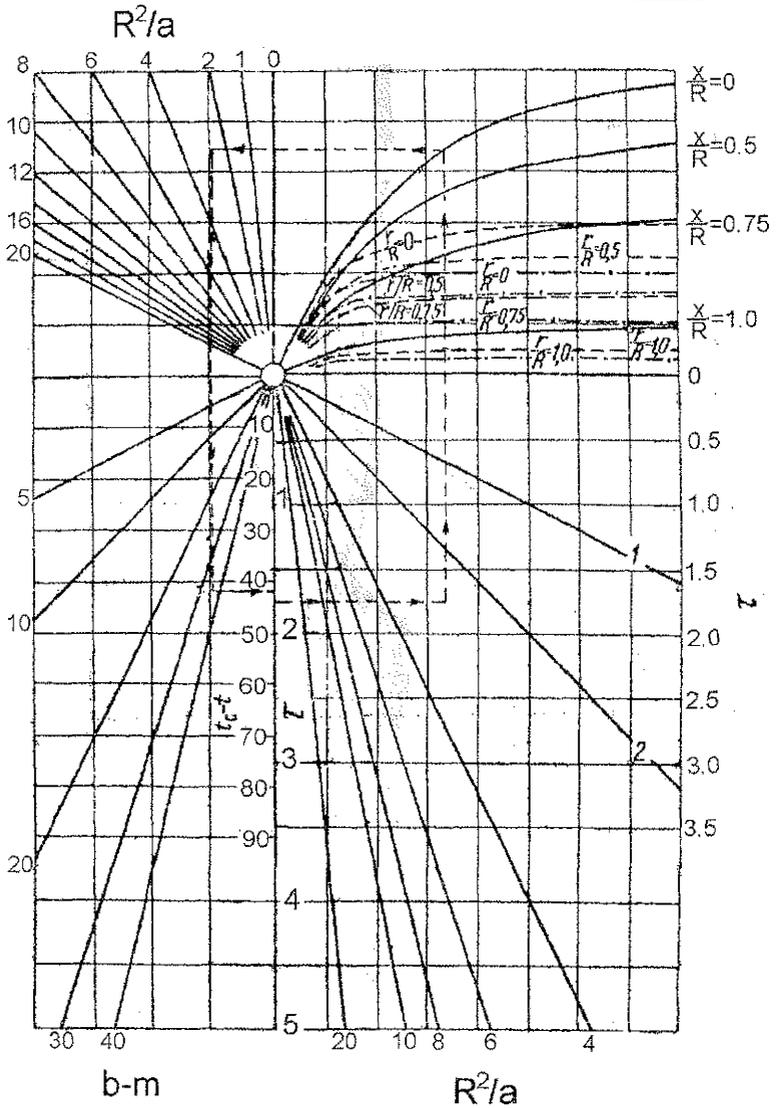
ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 3



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

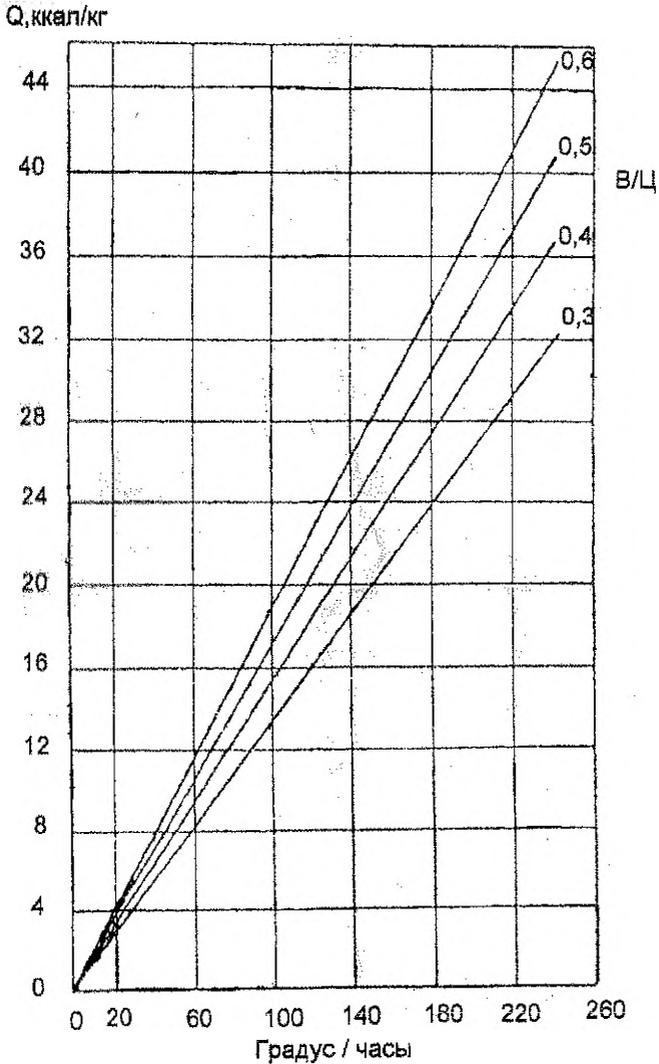


Кривые  $C_2=f_2(Fo;Bi)$  для шара.



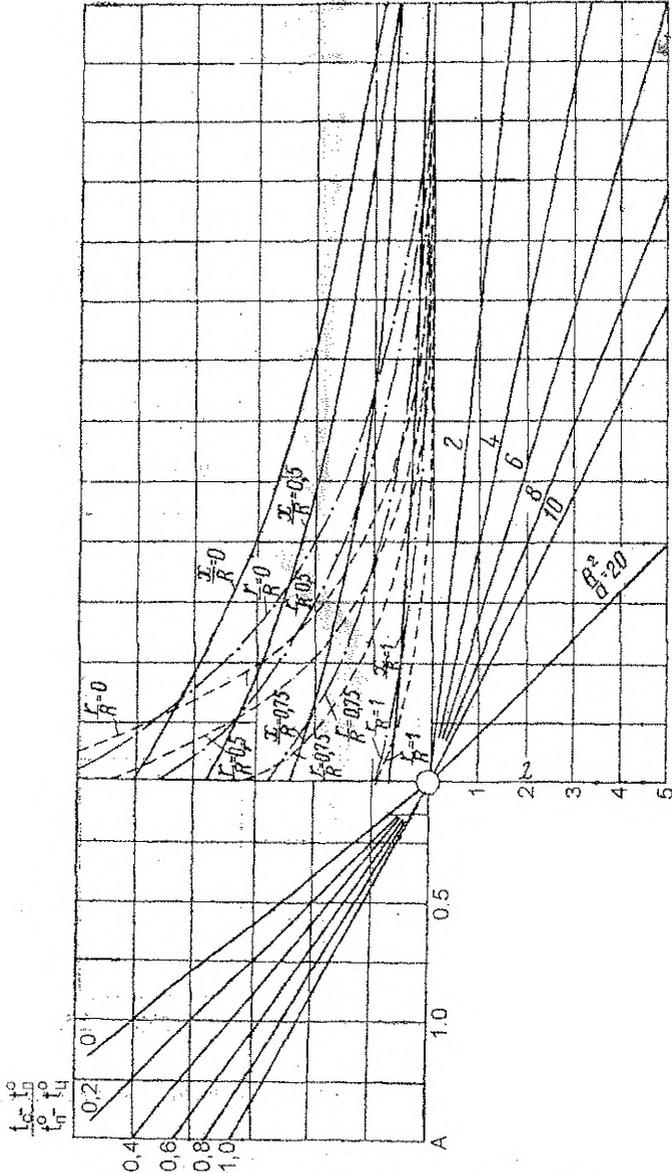
Номограмма для определения температуры и времени нагрева железобетонных изделий при изменении температуры паровоздушной среды по линейному закону: ——— неограниченная пластина; - - - неограниченный цилиндр; - · - · шар.

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	кал	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 кал	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.

Учебное издание

Составители: Сырица Галина Васильевна  
Пикула Александр Иванович

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

**«Исследование внутреннего напряжённого состояния бетона при тепловой обработке в среде влажного насыщенного пара»**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Теплотехника и теплотехническое оборудование»  
для студентов специальности 70 01 01

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

---

Подписано к печати 30.09.2004 г. Формат 60x84 1/16. Бумага писчая. Гарнитура Arial Narrow. Усл. п. л. 1.4. Уч. изд. л. 1.5. Тираж 100 экз. Заказ № 974. Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный технический университет», 224017, Брест, ул. Московская, 267.