

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Промышленное и гражданское строительство»

ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов специальности 1-70 02 01
«Промышленное и гражданское строительство»*

Могилев 2012

УДК 69.05

ББК 38.6

Т 38

Рекомендовано к опубликованию
учебно-методическим управлением
ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Одобрено кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»
«28» мая 2012 г., протокол № 11

Составители: канд. техн. наук, доц. И. Л. Опанасюк;
ст. преподаватель С. В. Данилов

Рецензент д-р техн. наук, доц. С. Д. Семенюк

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине
«Технология строительства в особых условиях» для студентов
специальности 1–70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство».

Учебное издание

ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

Ответственный за выпуск Е. Е. Корбут

Технический редактор А.А. Подошевко

Компьютерная верстка Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60x84 /16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл.-печ. л . Уч.-изд. л . Тираж 56 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»
ЛИ № 02330/375 от 29.06.2004 г.
212000, г. Могилев, пр. Мира, 43

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2012

1 Расчет параметров выдерживания бетонной смеси методом термоса

Цель работы: приобретение практических навыков расчета параметров выдерживания бетонной смеси до набора критической прочности при возведении конструкций в зимних условиях методом термоса.

1.1 Общая часть

Понятие «зимние условия» в технологии монолитного бетона и железобетона несколько отличается от общепринятого календарного. Зимние условия начинаются, когда среднесуточная температура наружного воздуха не ниже плюс 5 °С, и минимальная суточная ниже 0 °С (при отрицательных температурах непрореагировавшая с цементом вода переходит в лед и не вступает в химическое соединение с цементом). В результате этого прекращается реакция гидратации и, следовательно, бетон не твердеет. Одновременно в бетоне развиваются значительные силы внутреннего давления, вызванные увеличением (примерно на 9 %) объема воды при переходе ее в лед. При раннем замораживании бетона его неокрепшая структура не может противостоять этим силам и нарушается. При последующем оттаивании замерзшая вода вновь превращается в жидкость и процесс гидратации цемента возобновляется, однако разрушенные структурные связи в бетоне полностью не восстанавливаются.

Строительное производство располагает обширным арсеналом эффективных и экономичных методов выдерживания бетона в зимних условиях, позволяющих обеспечить высокое качество конструкций. Эти методы можно разделить на три группы: метод, предусматривающий использование начального теплосодержания, внесенного в бетонную смесь при ее приготовлении или перед укладкой в конструкцию, и тепловыделение цемента, сопровождающее твердение бетона, - так называемый метод термоса; методы, основанные на искусственном прогреве бетона, уложенного в конструкцию, - электропрогрев; контактный, индукционный и инфракрасный нагрев; конвективный обогрев; методы, использующие эффект понижения эвтектической точки воды в бетоне с помощью специальных противоморозных химических добавок.

Технологическая сущность метода термоса заключается в том, что имеющая положительную температуру (обычно в пределах 15–30 °С) бетонная смесь укладывается в утепленную опалубку. В результате этого бетон конструкции набирает заданную прочность за счет начального

теплосодержания и экзотермического тепловыделения цемента за время остывания до 0 °С. В процессе твердения бетона выщелачивается экзотермическая теплота, количественно зависящая от вида применяемого цемента и температуры выдерживания. Наибольшим экзотермическим тепловыделением обладают высокомарочные и быстротвердеющие портландцементы.

Метод заключается в использовании тепла, выделяющегося в процессе гидратации цементных зерен, а также тепла, внесенного в бетон в момент его приготовления (нагрев воды и заполнителей). Этот метод эффективен только для массивных конструкций. Массивность определяется модулем поверхности – отношением суммарной площади охлаждающейся поверхности бетона к его объему:

$$M_{\text{п}} = F/V.$$

Для колонн и балок модуль поверхности можно определять как отношение периметра к площади поперечного сечения: $M_{\text{п}} = P/S$ (где P - периметр; S - площадь поперечного сечения).

Чем меньше $M_{\text{п}}$, тем конструкция массивней. Накопленный научный и практический опыт зимнего бетонирования позволяет рекомендовать метод термоса при $M_{\text{п}} = 6-8$ и меньше. В таких конструкциях бетон успевает набрать необходимую прочность к моменту его остывания.

При термосном выдерживании бетона можно решить следующие задачи:

- 1) определить продолжительность остывания бетона и величину набранной им за это время прочности при известном термическом сопротивлении опалубки и ее утеплителя;
- 2) подобрать конструкцию опалубки и ее утеплителя при заданных продолжительности остывания бетона и прочности бетона к моменту остывания.

В основу решения указанных задач положено уравнение теплового баланса, предложенное Б. Г. Скрамтаевым:

$$C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot (t_{\text{б.н.}} - t_{\text{б.к.}}) + Ц \cdot Э = 3,6 \cdot K \cdot M_{\text{п}} \cdot \tau \cdot (t_{\text{б.сп.}} - t_{\text{н.в.}}), \quad (1.1)$$

где $C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость бетона, 1,05 кДж/(кг · °С);

$\gamma_{\text{б}}$ – плотность бетона, кг/м³;

$t_{\text{б.н.}}$ – начальная температура бетона, °С;

$t_{\text{б.к.}}$ – температура бетона к концу остывания, °С;

$Ц$ – расход цемента на 1 м³ бетона, кг;

$Э$ – тепловыделение цемента, кДж/кг за время твердения бетона, принимается по таблице А.5;

K – коэффициент теплопередачи опалубки или укрытия неопалубливаемых поверхностей, Вт/(м² · °С);

$M_{\text{п}}$ – модуль поверхности, м⁻¹;

τ – продолжительность остывания конструкция, ч;

$t_{\text{б.ср.}}$ – средняя температура за время остывания бетона, 0 °С;

$t_{\text{н.в.}}$ – температура наружного воздуха, °С.

При известных материале и толщине слоя ограждения, значение K может быть определено по формуле (1.2)

$$K=1/\left(\frac{1}{\alpha}+\sum_{i=1}^{i=n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right), \quad (1.2)$$

где α – коэффициент теплопередачи у наружной поверхности ограждения, зависящий от скорости ветра (таблица А.2), Вт/(м² · °С);

δ_i – толщина каждого слоя ограждения, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности материала каждого слоя ограждения (принимается по таблице А.4), Вт/(м² · °С).

Если коэффициенты теплопередачи бетона в окружающую среду через ограждения с разным утеплением (например, через деревянную опалубку или неопалубленную поверхность, укрытую толем, минераловатными материалами) существенно различаются между собой, можно суммировать теплотери через все поверхности или пользоваться приведенным коэффициентом теплопередачи

$$K_{\text{пр}}=\frac{F_1 \cdot K_1+F_2 \cdot K_2+\dots+F_n \cdot K_n}{F_1+F_2+\dots+F_n}, \quad (1.3)$$

где F_1, F_2, \dots, F_n – площади соответствующих поверхностей, м²;

K_1, K_2, \dots, K_n – коэффициенты теплопередачи через разные поверхности конструкций, Вт/(м² · °С).

Средняя температура за время остывания бетона определяется по формуле

$$t_{\text{б.ср.}}=t_{\text{б.к.}}+\frac{t_{\text{б.н.}}-t_{\text{б.к.}}}{1,03+0,181 \cdot M_{\text{п}}+0,006 \cdot (t_{\text{б.н.}}-t_{\text{б.к.}})} \quad (1.4)$$

или приближенно принимается равной: $(t_{\text{б.н.}}+5)/2$ – для конструкций с $M_{\text{п}} \leq 4$; $t_{\text{б.н.}}/2$ – с $M_{\text{п}}$ от 5 до 8; $t_{\text{б.н.}}/3$ – с $M_{\text{п}}$ от 9 до 12.

Коэффициенты теплопередачи наиболее распространенных конструкций опалубок и укрытий приведены в таблице А.6.

Для решения задач, связанных с выдерживанием бетона по способу термоса, рекомендуется использовать данные нарастания прочности бетона различных марок на портландцементе и шлакопортландцементе (таблица А.7).

С целью ускорения твердения бетона в его состав вводят добавки – ускорители твердения: сульфат натрия (СН), хлорид кальция (ХК), нитрат кальция (НК), нитрит-нитрат хлорида кальция (ННХК).

При введении добавок их количество не должно превышать массу цемента: СН – на 2 %, НК и ННХК – 4 %; ХК в бетоне армированных конструкций – 2 %, а в бетоне неармированных конструкций – 3 %. Коэффициенты увеличения прочности бетона на портландцементе и шлакопортландцементе в зависимости от вводимых добавок приведены в таблице А.8.

1.2 Определение продолжительности остывания бетона и величины набранной им за это время прочности

Для решения задачи термосного выдерживания бетона необходимо рассчитать:

- объем бетонируемой конструкции V , м³;
- величину поверхности охлаждения конструкции, для чего суммируют площади поверхностей, соприкасающихся с охлаждающим воздухом S , м²;
- модуль поверхности конструкции $M_{\text{п}} = F/V$, м⁻¹;
- начальное теплосодержание бетона Q_1 , кДж.

$$Q_1 = C_6 \cdot \gamma_1 \cdot V \cdot t_{\text{б.н.}}, \quad (1.5)$$

где C_6 – удельная теплоемкость бетона, $C_6 = 1,05$ кДж/(кг · °С);

γ_1 – плотность железобетона, $\gamma_1 = 2500$ кг/м³;

V – объем бетона в одном фундаменте, м³;

$t_{\text{б.н.}}$ – начальная температура бетона (задается условием задачи), °С;

– температуру системы «бетон + арматура»:

$$t' = \frac{C_6 \cdot \gamma_1 \cdot t_{\text{б.н.}} + C_3 \cdot P_1 \cdot t_4}{C_6 \cdot \gamma_1 + C_3 \cdot P_1}, \quad (1.6)$$

где C_3 – теплоемкость арматурной стали (см. таблицу А.4), кДж/(кг·°С);

P_1 – расход стали на 1 м³ бетона (задается условием задачи), кг/м³;

t_4 – температура арматурной стали, численно равная температуре наружного воздуха (задается условием задачи); обозначение остальных символов приведено выше;

– количество тепла, расходуемого на нагрев арматуры, Q_2 , кДж,

$$Q_2 = C_3 \cdot P_1 \cdot V \cdot (t' - t_4); \quad (1.7)$$

– расчетную температуру нагрева опалубки $t_{оп}$, °С,

$$t_{оп} = \frac{t' + t_{н.в.}}{2}; \quad (1.8)$$

– тепло, расходуемое на нагрев опалубки Q_3 , кДж,

$$Q_3 = Q_2 \cdot F_{ох.п.} \cdot \delta_1 \cdot \gamma_2 \cdot (t_{оп} - t_4), \quad (1.9)$$

где C_2 – удельная теплоемкость дерева, из которого выполнена опалубка (таблица А.4), кДж/(кг · °С);

$F_{ох.п.}$ – площадь охлаждаемой поверхности, м²;

δ_1 – толщина опалубки, м;

γ_2 – средняя плотность в сухом состоянии дерева (таблица А.4), кг/м³;

– температуру бетона к началу остывания конструкции:

$$t_{б.н.} = \frac{Q_1 - (Q_2 + Q_3)}{C_6 \cdot \Gamma_1 \cdot V}; \quad (1.10)$$

– среднюю температуру твердения бетона за время остывания конструкции

$$t_{б.ср.} = t_{б.к.} + \frac{t_{б.н.} - t_{б.к.}}{1,03 + 0,181 \cdot M_n + 0,006 \cdot (t_{б.н.} - t_{б.к.})}, \quad (1.11)$$

где $t_{б.к.}$ – температура бетона к концу остывания (задается условием задачи), °С;

– значение коэффициента теплопередачи опалубки, Вт/(м² · °С):

$$K = 1 / \left(\frac{1}{a} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{D_i}{\lambda_i} \right), \quad (1.12)$$

где α – коэффициент теплопередачи у наружной поверхности ограждения, зависящий от скорости ветра, Вт/(м²·°С) (таблица А.2);

δ_i – толщина опалубки или утеплителя, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности материала опалубки или утеплителя (принимается по таблице А.4), Вт/(м²·°С);

– продолжительность остывания конструкции без учета влияния экзотермии цемента:

$$\phi' = \frac{C_{\text{б}} \cdot \Gamma_1 \cdot (t_{\text{б.н.}} + t_{\text{б.к.}})}{3,6 \cdot K \cdot M_n \cdot (t_{\text{б.ср.}} - t_{\text{н.в.}})}, \quad (1.13)$$

где $t_{\text{н.в.}}$ – температура наружного воздуха (задается условием задачи), °С;

– величину (см. таблицу А.5) тепловыделения \mathcal{E} цемента за время τ при средней температуре твердения бетона $t_{\text{б.ср.}}$;

– продолжительность остывания конструкции с учетом влияния экзотермии цемента:

$$\phi = \frac{C_{\text{б}} \cdot \Gamma_1 \cdot (t_{\text{б.н.}} + t_{\text{б.к.}}) + \mathcal{C} \cdot \mathcal{E}}{3,6 \cdot K \cdot M_n \cdot (t_{\text{б.ср.}} - t_{\text{н.в.}})} \quad (1.14)$$

– прочность бетона, которую он наберет за время τ при средней температуре твердения бетона $t_{\text{б.ср.}}$ (см. таблицу А.7).

Таблица 1.1 – Варианты заданий

Номер варианта	Размер, м					Бетон класса	ПЦ марки	Ц, кг/м ³	Р, кг/м ³	t _{н.в.} , °С	Скорость ветра, м/с
	А	В	С	Н	h						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2,4	1,8	1,2	4,2	0,1	C ²⁵ / ₁₅	400	300	110	-18	1
2	2,1	1,5	0,0	2,1	0,3	C ²⁵ / ₁₅	400	310	90	-20	1
3	1,8	1,8	1,2	4,2	0,6	C ²⁵ / ₁₅	400	300	110	-18	1
4	2,1	1,8	1,2	4,0	0,3	C ²⁵ / ₁₅	400	290	100	-18	1
5	2,7	2,1	1,5	3,0	0,6	C ²⁵ / ₁₅	400	300	100	-20	1
6	2,7	2,1	1,5	3,0	0,3	C ²⁵ / ₁₅	400	320	120	-20	1
7	1,8	1,2	1,2	2,1	0,3	C ²⁵ / ₁₅	400	300	100	-18	1
8	1,8	1,2	1,2	2,1	0,3	C ²⁵ / ₁₅	400	310	120	-20	1
9	2,7	2,1	1,5	3,0	0,6	C ²⁵ / ₁₅	400	300	100	-22	3
10	2,4	1,8	1,2	4,0	0,3	C ²⁵ / ₁₅	400	300	90	-20	3
11	2,7	2,1	1,5	2,1	0,3	C ²⁵ / ₃₀	500	250	100	-20	3
12	2,7	2,1	1,5	4,0	0,6	C ²⁵ / ₃₀	500	280	110	-22	3
13	2,7	2,1	1,5	3,0	0,3	C ²⁵ / ₃₀	500	300	100	-24	3
14	2,4	2,1	1,2	1,8	0,3	C ²⁵ / ₃₀	500	290	100	-20	3
15	2,4	2,1	1,5	1,5	0,3	C ²⁵ / ₃₀	500	300	100	-24	3
16	2,4	1,8	1,2	1,8	0,3	C ²⁵ / ₃₀	500	300	110	-25	3
17	2,4	1,8	1,5	1,8	0,3	C ²⁵ / ₃₀	500	250	100	-25	3
18	2,4	1,8	1,5	1,5	0,3	C ²⁵ / ₃₀	500	250	110	-20	5
19	2,1	1,5	1,5	1,5	0,3	C ²⁵ / ₃₀	500	250	100	-18	5
20	2,1	1,5	0,3	1,5	0,3	C ²⁵ / ₃₀	500	300	110	-25	5
21	2,4	1,8	1,2	1,5	0,6	C ²⁵ / ₃₀	500	250	10	-18	5
22	2,4	1,8	1,2	2,4	0,6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	100	-20	5
23	2,4	1,8	1,2	2,4	0,3	C ²⁵ / ₂₅	400	310	120	-25	5
24	2,4	1,8	1,2	2,4	0,3	C ²⁵ / ₂₅	400	300	110	-25	5
25	2,1	1,8	1,2	2,1	0,6	C ²⁵ / ₂₅	400	310	110	-18	5

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
26	2,1	1,5	0,9	3,0	0,3	$C^{25}/_{25}$	400	300	30	-22	10
27	2,4	1,8	1,2	2,1	0,6	$C^{25}/_{25}$	400	300	100	-25	10
28	2,4	1,8	1,2	3,0	0,3	$C^{25}/_{25}$	400	290	110	-25	15
29	1,8	1,2	1,2	3,0	0,3	$C^{25}/_{25}$	400	200	110	-25	15
30	1,8	1,2	1,2	2,1	0,3	$C^{25}/_{25}$	400	300	100	-25	10

Пример 1 – Железобетонный фундамент (рисунок 1.1) с размерами $A = 2,4$ м; $B = 1,8$ м; $C = 1,2$ м; $H = 5,6$ м; $h = 0,6$ м из бетона класса $C^{20/25}$ на портландцементе марки 400 с расходом цемента 300 кг/м^3 и стали 100 кг/м^3 бетонируют в зимнее время. Температура наружного воздуха во время твердения бетона минус $20 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость ветра 10 м/с .

В момент укладки в опалубку бетонная смесь имеет температуру $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Опалубка выполнена из доски толщиной 40 мм .

Определить продолжительность остывания конструкции и прочность бетона к моменту достижения им температуры $4\text{--}5 \text{ }^\circ\text{C}$.

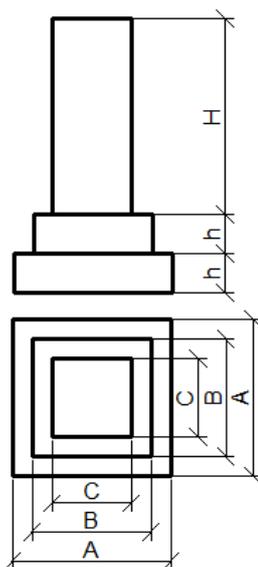


Рисунок 1.1 – Расчетная схема фундамента, бетонируемого методом термоса

Для решения необходимы следующие расчеты:

– объем бетона в одном фундаменте:

$$V = 2,4 \cdot 2,4 \cdot 0,6 + 1,8 \cdot 1,8 \cdot 0,6 + 1,2 \cdot 1,2 \cdot 5,6 = 13,46 \text{ м}^3;$$

– поверхность охлаждения бетона:

$$F = 4 \cdot 2,4 \cdot 0,6 + 4 \cdot 1,8 \cdot 0,6 + 4 \cdot 1,2 \cdot 5,6 + 2,4 \cdot 2,4 = 42,72 \text{ м}^2;$$

– модуль поверхности бетонируемого фундамента

$$M_n = \frac{42,72}{13,46} = 3,17 \text{ м}^{-1};$$

– начальное теплосодержание бетона:

$$Q_1 = 1,05 \cdot 2500 \cdot 13,46 \cdot 70 = 2473275 \text{ кДж};$$

– температура системы «бетон + арматура»:

$$t' = \frac{1,05 \cdot 2500 \cdot 70 + 0,48 \cdot 100 \cdot (-20)}{1,05 \cdot 2500 + 0,48 \cdot 100} = 68,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– количество тепла, расходуемое на нагрев арматуры:

$$Q_2 = 0,48 \cdot 100 \cdot 13,46 \cdot [68,4 - (-20)] = 57113 \text{ кДж};$$

– расчетная температура нагрева опалубки:

$$t_{\text{он}} = \frac{68,4 + (-20)}{2} = 24,2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– тепло, расходуемое на нагрев опалубки:

$$Q_3 = 2,52 \cdot 42,72 \cdot 0,04 \cdot 550 \cdot [24,2 - (-20)] = 104683 \text{ кДж};$$

– температура бетона к началу остывания конструкции

$$t_{\text{б.н.}} = \frac{2473275 - (57113 + 104683)}{1,05 \cdot 2500 \cdot 13,46} = 65,42 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– средняя температура твердения бетона за время остывания конструкции до 5 °С:

$$t_{\text{б.ср.}} = 5 + \frac{65,42 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 3,17 + 0,006 \cdot (65,42 - 5)} = 35,73 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– значение коэффициента теплоотдачи опалубки:

$$K = 1 / \left(\frac{1}{33,18} + \frac{0,04}{0,17} \right) = 3,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

– продолжительность остывания конструкции без учета влияния экзотермии цемента:

$$\Phi = \frac{1,05 \cdot 2500 \cdot (65,42 - 5)}{3,6 \cdot 3,77 \cdot 3,17 \cdot (35,73 - (-20))} = 66 \text{ ч};$$

– величина тепловыделения 1 кг цемента за 66 ч при средней температуре твердения бетона $t_{\text{б.ср.}} = 35,73 \text{ } ^\circ\text{C}$ (см. таблицу А.5):

$\mathcal{E} = 248$ кДж/кг;

– продолжительность остывания конструкции с учетом влияния экзотермии цемента:

$$\phi = \frac{1,05 \cdot 2500 \cdot (65,42 - 5) + 300 \cdot 248}{3,6 \cdot 3,77 \cdot 3,17 \cdot (35,73 - (-20))} = 97 \text{ ч};$$

– прочность бетона, которую он наберет за 97 ч при средней температуре твердения бетона $t_{б,ср.} = 35,73$ °С (см. таблицу А.7), составляет 79 % от гарантируемой прочности в возрасте 28 суток, что выше значения критической прочности (см. таблице А.3). Поэтому набор бетоном требуемой прочности и его сохранность будут обеспечены.

1.3 Подбор конструкции опалубки и ее утеплителя

При решении задачи термосного выдерживания бетона последовательно определяют:

- объем бетона в бетонируемой конструкции V , м^3 ;
- поверхность охлаждения бетонируемой конструкции F , м^2 ;
- модуль поверхности бетонируемой конструкции $M_{\text{п}} = F/V$, м^{-1} ;
- температуру бетона $t_{\text{б.н.}}$ с учетом тепла, израсходованного бетоном на нагрев арматуры, $^{\circ}\text{C}$, согласно формуле (1.6):

$$t' = \frac{C_{\text{б}} \cdot \Gamma_1 \cdot t_{\text{б.н.}} + C_3 \cdot P_1 \cdot t_4}{C_{\text{б}} \cdot \Gamma_1 + C_3 \cdot P_1};$$

– среднюю температуру твердения бетона в процессе его остывания в течение 3 суток можно определить по формуле, как в предыдущем примере, или по таблице А.7, зная требуемую прочность бетона в конце остывания и время его твердения;

- экзотермию цемента по известным данным о средней температуре твердения бетона $t_{\text{б.сп.}}$ и времени твердения бетона (таблица А.5);
- расчетный коэффициент теплопередачи опалубки и утеплителя

$$K_{\text{р}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \Gamma_1 \cdot (t' - t_{\text{б.к.}}) + \text{Ц} \cdot \text{Э}}{\phi \cdot 24 \cdot (t_{\text{б.сп.}} - t_{\text{н.в.}})}; \quad (1.15)$$

– ориентировочно назначают конструкцию опалубки, соблюдая условие $K_{\text{р}} \geq K_{\text{табл}}$ (см. таблицу А.6);

– если расчетный коэффициент теплопередачи значительно отличается от табличного, то требуемую толщину слоя теплоизоляции находят по формуле:

$$D_{\text{из}} = \lambda_{\text{из}} \left(\frac{1}{K_{\text{р}}} - \sum \frac{D_{\text{оп}}}{\lambda_{\text{оп}}} \right), \quad (1.16)$$

где $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ (см. таблицу А.4);

$K_{\text{р}}$ – расчетный коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

$\delta_{\text{оп}}$ и $\lambda_{\text{оп}}$ – толщина и коэффициент теплопроводности отдельных слоев опалубки, соответственно. Например, опалубка может состоять из слоя досок, прокладки толя, слоя минеральной ваты и слоя фанеры. В таком случае нужно суммировать отношения толщин соответствующих слоев к их коэффициентам теплопроводности:

$$\sum \frac{D_{\text{оп}}}{L_{\text{оп}}} = \frac{D_{\text{д}}}{L_{\text{д}}} + \frac{D_{\text{т}}}{L_{\text{т}}} + \frac{D_{\text{в}}}{L_{\text{в}}} + \frac{D_{\text{ф}}}{L_{\text{ф}}}, \quad (1.17)$$

где $\delta_{\text{д}}$, $\delta_{\text{т}}$, $\delta_{\text{в}}$, $\delta_{\text{ф}}$ – толщина слоя досок, толя, ваты и фанеры, соответственно;

$\lambda_{\text{д}}$, $\lambda_{\text{т}}$, $\lambda_{\text{в}}$, $\lambda_{\text{ф}}$ – коэффициенты теплопроводности, соответственно.

Для более точных расчетов используют эмпирическую формулу О. Е. Власова, учитывающую повышение теплопроводности материалов конструкции опалубки, нагретых теплом бетона, укладываемого в опалубку. Расчетная температура нагрева опалубки определяется как среднеарифметическое значение температуры наружного воздуха и начальной температуры бетона:

$$t_{\text{оп}}^{\text{р}} = \frac{t' + t_{\text{н.в.}}}{2} \quad (1.18)$$

Тогда теплопроводность материалов конструкции опалубки

$$L_{\text{т}} = L_0 \cdot (1 + 0,0025 \cdot t_{\text{оп}}^{\text{р}}), \quad (1.19)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности материалов опалубки при 0 °С (принимается по таблице А.4).

Пример 2 – Железобетонная балка размером 0,5·1,2·6,0 м из бетона класса С²⁰/₂₅ на портландцементе марки 500 с расходом цемента 300 кг/м³ и стали 200 кг/м³ бетонируется в зимнее время в условиях стройплощадки при температуре наружного воздуха минус 25 °С и скорости ветра 15 м/с. Температура бетонной смеси в момент укладки ее в опалубку составляет 60 °С. К моменту остывания балки до температуры плюс 5 °С через трое суток прочность бетона должна составлять 70 % от гарантируемой прочности в возрасте 28 суток. Подобрать конструкцию опалубки для обеспечения требуемых условий.

Для решения задачи нужно определить следующие величины:

- объем бетона в балке: $V = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 6,0 = 3,6 \text{ м}^3$;
- поверхность охлаждения бетонируемой балки:

$$F = 2 \cdot 0,5 \cdot 1,2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 6 + 2 \cdot 1,2 \cdot 6 = 21,6 \text{ м}^2 ;$$

- модуль поверхности балки:

$$M_{\text{п}} = 21,6 / 3,6 = 6 \text{ м}^{-1};$$

– температуру бетона с учетом тепла, израсходованного бетоном на нагрев арматуры:

$$t' = \frac{1,05 \cdot 2500 \cdot 60 + 0,48 \cdot 200 \cdot (-25)}{1,05 \cdot 2500 + 0,48 \cdot 200} = 57 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

– среднюю температуру твердения бетона в процессе его остывания в течение трех суток (согласно таблице А.7 бетон класса $C^{20}/_{25}$ на портландцементе марки 500 наберет 70 % от гарантируемой прочности через три дня при температуре $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($t_{\text{б.ср.}} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$));

– тепловыделение цемента марки 500 за трое суток при $t_{\text{б.ср.}} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$, согласно таблице А.5 $\Theta = 266 \text{ кДж/кг}$;

– расчетный коэффициент теплопередачи опалубки и утеплителя:

$$K_p = \frac{1,05 \cdot 2500 \cdot (57 - 5) + 300 \cdot 266}{3 \cdot 24 \cdot 6 \cdot (27 - (-25))} = 9,63 \text{ кДж/кг} = 2,66 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$$

– по таблице А.6 ориентировочно выбираем конструкцию опалубки, соблюдая условие $K_p \geq K_{\text{табл.}}$. Для нашего случая этому условию соответствует четвертый тип опалубки, состоящий из доски толщиной 25 мм, минеральной ваты – 50 мм и слоя фанеры – 4 мм. $K_{\text{табл.}} = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ при скорости ветра 15 м/с;

– в связи с тем, что расчетный коэффициент теплопередачи значительно отличается от табличного, уточним требуемую толщину слоя теплоизоляции (ваты минеральной):

$$d_{\text{из}} = 0,055 \cdot \left(\frac{1}{2,66} - \left(\frac{0,025}{0,17} - \frac{0,004}{0,17} \right) \right) = 0,011 \text{ м} = 11 \text{ мм}$$

В итоге устанавливаем, что конструкция опалубки должна состоять из основной доски толщиной 25 мм, слоя минеральной ваты – 11 мм и фанеры – 4 мм.

Для более точных расчетов применяем эмпирическую формулу О. Е. Власова, учитывающую повышение теплопроводности материалов опалубки от нагрева ее теплом укладываемого бетона.

Расчетная температура нагрева опалубки определится как среднеарифметическое температуры наружного воздуха и начальной температуры бетона:

$$t_{\text{оп}}^p = \frac{57 - (-25)}{2} = 41 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Установим коэффициенты теплопроводности материалов опалубки, нагретых до температуры 41 °С:

– для доски из хвойных пород дерева

$$\lambda'_{\text{д}} = 0,17 \cdot (1 + 0,0025 \cdot 41) = 0,187 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)};$$

– для фанеры клееной

$$\lambda'_{\text{ф}} = 0,17 \cdot (1 + 0,0025 \cdot 41) = 0,187 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)};$$

– для минеральной ваты плотностью 100 кг/м³

$$\lambda'_{\text{в}} = 0,049 \cdot (1 + 0,0025 \cdot 41) = 0,054 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)};$$

С учетом уточненных коэффициентов теплопроводности требуемая толщина слоя минеральной ваты:

$$d_{\text{из}} = 0,054 \cdot \left(\frac{1}{2,66} - \left(\frac{0,025}{0,187} - \frac{0,004}{0,187} \right) \right) = 0,011 \text{ м} = 11 \text{ мм}$$

При методе термоса постоянно следят за температурой бетона в конструкции. Контроль ведется с момента укладки до тех пор, пока температура в конструкции не понизится до минус 2 °С. Контролировать нужно не менее 2 раз в сутки. Измеряют температуру техническими термометрами, которые опускают в специальные скважины глубиной 50 мм, устроенные в бетоне. Результаты замера заносят в журнал. По частному от деления суммы показаний термометра на количество отсчетов устанавливают среднюю температуру твердения бетона.

Распалубливать несущие бетонные и железобетонные конструкции следует после достижения бетоном прочности, указанной в таблице А.3.

Таблица 1.2 – Варианты заданий

Номер варианта	Размер балки, м	Класс бетона	Марка цемента	Ц, кг/м ³	Р, кг/м ³	t _{н.в.}	Скорость ветра, м/с	t _{б.н.}	t _{б.к.}	τ	Процент от R ₂₈
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,5·1,2·6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-25	1	60	5	3	70
2	0,6·1,2·6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-25	1	60	5	3	70
3	0,8·1,2·6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-25	1	70	5	3	70
4	0,5·1,5·6	C ²⁵ / ₃₀	500	310	200	-20	3	60	5	3	70
5	0,6·1,5·6	C ²⁵ / ₃₀	500	310	200	-20	3	60	5	5	90
6	0,8·1,5·6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-20	3	60	5	5	90
7	0,4·1,5·6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-20	3	60	5	7	80
8	0,4·1,2·6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-18	3	60	5	7	80
9	0,3·1,2·6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-18	3	60	5	7	80
10	0,3·1,5·6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-18	3	60	5	7	90
11	0,3·1,2·12	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-18	3	60	5	7	90
12	0,3·1,5·12	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-18	3	60	10	7	90
13	0,3·1,8·12	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-18	3	60	5	7	90
14	0,3·1,8·6	C ²⁵ / ₃₀	500	300	200	-18	3	60	5	7	90
15	0,4·1,8·12	C ²⁵ / ₂₅	500	300	230	-20	5	60	5	7	90
16	0,4·1,5·12	C ²⁵ / ₂₅	500	300	220	-18	5	60	5	5	80
17	0,4·1,5·12	C ²⁵ / ₂₅	500	300	210	-20	10	60	5	5	70
18	0,4·1,2·12	C ²⁵ / ₂₅	500	300	220	-20	10	60	5	5	80
19	0,3·2,1·12	C ²⁵ / ₂₅	500	300	250	-20	10	60	5	5	70
20	0,3·2,1·12	C ²⁵ / ₂₅	500	400	250	-25	5	60	5	7	90
21	0,3·2,1·12	C ²⁵ / ₂₅	400	400	300	-18	5	60	5	7	80
22	0,3·2,1·12	C ²⁵ / ₂₅	400	400	300	-20	10	60	5	7	80
23	0,5·2,1·12	C ²⁵ / ₁₅	400	400	300	-20	10	60	5	7	80
24	0,5·2,1·9	C ²⁵ / ₁₅	400	400	310	-25	10	60	5	7	80

Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	$0,5 \cdot 2,1 \cdot 9$	$C^{25}_{/15}$	400	400	310	-20	10	60	5	7	70
26	$0,4 \cdot 2,1 \cdot 9$	$C^{25}_{/15}$	400	300	310	-18	5	60	5	5	70
27	$0,4 \cdot 2,1 \cdot 9$	$C^{25}_{/15}$	400	300	310	-18	5	60	5	5	70
28	$0,4 \cdot 2,1 \cdot 9$	$C^{25}_{/15}$	400	400	310	-20	5	60	5	7	70
29	$0,4 \cdot 2,1 \cdot 9$	$C^{25}_{/15}$	400	300	320	-18	5	60	5	7	70
30	$0,4 \cdot 2,1 \cdot 9$	$C^{25}_{/15}$	400	300	310	-18	5	60	5	7	70

Контрольные вопросы

- 1 Как влияют отрицательные температуры на свойства составляющей бетона?
- 2 При какой температуре наружного воздуха считается выполнение работ в зимнее время?
- 3 В чем сущность метода термоса?
- 4 Что называют модулем поверхности и как он определяется?
- 5 Поясните составляющие уравнения теплового баланса.
- 6 Как определить величину поверхности охлаждения конструкций?
- 7 Как определить начальное теплосодержание бетона?
- 8 Как определить продолжительность остывания бетона в конструкции?
- 9 Как подобрать конструкцию опалубки и ее утеплителя?

Список литературы

- 1 **Афанасьев, А. А.** Возведение зданий из монолитного железобетона / А. А. Афанасьев. – М. : Стройиздат, 1990. – 440 с.
- 2 **Кузнецов, Ю. П.** Проектирование железобетонных работ / Ю. П. Кузнецов. – Киев: Вища шк., 1986. – 279 с.
- 3 **ТКП 45-5.03-21-2006.** Бетонные работы при отрицательных температурах воздуха. Правила производства. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва РБ, 2006. – 103 с.

Приложение А (справочное)

Данные для расчета процесса производства бетонных и железобетонных работ в зимних условиях

Таблица А.1 – Способы выдерживания

Вид конструкций	Минимальная температура воздуха, °С	Способ выдерживания
Массивные бетонные и железобетонные фундаменты, блоки и плиты с модулем поверхности до 3 м^{-1}	До –15	Термос
	До –25	Термос с применением ускорителей твердения бетона. Термос с применением противоморозных добавок.
Фундаменты под конструкции зданий и оборудование, массивные стены и т. п. с модулем поверхности от 3 до 6 м^{-1}	До –15	Термос, в том числе с применением противоморозных добавок и ускорителей твердения. Обогрев в греющей опалубке
	До –25	Предварительный разогрев бетонной смеси. Периферийный электропрогрев.
Колонны, балки, прогоны, элементы рамных конструкций, свайные ростверки, стены и перекрытия с модулем поверхности от 6 до 10 м^{-1}	До –15	Обогрев в греющей опалубке, греющими проводами с применением ускорителей твердения. Предварительный разогрев бетонной смеси, индукционный обогрев и инфракрасный нагрев.
Колонны, балки, прогоны, элементы рамных конструкций, свайные ростверки, стены и перекрытия с модулем поверхности от 6 до 10 м^{-1}	До –25	Обогрев в греющей опалубке, греющими проводами и термоактивными гибкими покрытиями (ТАГП) с применением противоморозных добавок и ускорителей твердения.
Полы, перегородки, плиты перекрытий, тонкостенные конструкции с модулем поверхности от 10 до 20 м^{-1}	До –25	Обогрев в греющей опалубке, греющими проводами и термоактивными гибкими покрытиями (ТАГП) с применением противоморозных добавок и ускорителей твердения.
<p><i>Примечание</i> — Противоморозные добавки, как правило, следует применять в комплексе с пластифицирующими добавками</p>		

Таблица А.2 – Значения α в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	α , Вт/(м ² ·°С)
0	3,77
1	3,88
3	14,96
5	26,56
10	33,18
15	43,15
20	52,50

Таблица А.3 – Требования к производству бетонных работ

Наименование показателей, технические требования	Значение показателей, единицы измерения
1 Прочность бетона монолитных и сборномонолитных конструкций к моменту замерзания (критическая прочность)	
1.1 Для бетона без противоморозных добавок: конструкций, эксплуатирующихся внутри зданий, фундаментов под оборудование, не подвергающихся динамическим воздействиям, подземных конструкций конструкций, подвергающихся атмосферным воздействиям в процессе эксплуатации, для классов прочности на сжатие: С ⁸ / ₁₀ от С ¹² / ₁₅ до С ²⁰ / ₂₅ С ²⁵ / ₃₀ и выше конструкций, подвергающихся по окончании выдерживания переменному замораживанию и оттаиванию в водонасыщенном состоянии или к бетону которых предъявляются требования по водонепроницаемости более W4 в преднапряженных конструкциях	Не менее 5 МПа % от проектной прочности, не менее 50 40 30 70 80
1.2 Для бетона с противоморозными добавками	К моменту охлаждения бетона до температуры, на которую рассчитано количество добавок, – не менее 20 % от проектной прочности
2 Загрузка конструкций расчетной нагрузкой допускается после достижения бетоном прочности	Не менее проектной

Окончание таблицы А.3

Наименование показателей, технические требования	Значение показателей, единицы измерения
3 Температура воды и бетонной смеси на выходе из смесителя, приготовленной: на портландцементе, шлакопортландцементе, пуццолановом портландцементе марок ниже М600	°С, не более Воды – 70 Смеси – 35
на быстротвердеющем портландцементе и портландцементе марки М600 и выше на глиноземистом портландцементе	Воды – 60 Смеси – 30 Воды – 40 Смеси – 25
4 Температура бетонной смеси, уложенной в опалубку, к началу выдерживания или термообработки: методом термоса с противоморозными добавками при тепловой обработке	Устанавливается расчетом, но не ниже 5 °С Не менее чем на 5 °С выше температуры замерзания раствора затворения Не ниже 0 °С
5 Температура в процессе выдерживания и тепловой обработки для бетона на: портландцементе шлакопортландцементе	Определяется расчетом, но не выше, °С: 80 90
6 Скорость подъема температуры при тепловой обработке бетона: для конструкций с модулем поверхности, м ⁻¹ : до 4 от 5 до 10 включ. св. 10 и скользящих опалубок для стыков	°С/ч, не более 5 10 15 20
7 Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки для конструкций с модулем поверхности, м ⁻¹ : до 4 от 5 до 10 включ. св. 10	Определяется расчетом 5 °С/ч 10 °С/ч
8 Разность температур наружных слоев бетона и воздуха при распалубке с коэффициентом армирования до 1 % включ., св. 1 до 3 % включ. и более 3 % должна быть, соответственно, для конструкций с модулем поверхности, м ⁻¹ : от 2 до 5 включ. св. 5	°С, не более 20, 30, 40 30, 40, 50

Таблица А.4 – Теплотехнические параметры материалов

Материал	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии λ , Вт/(м·°С)	Коэффициент теплопроводности (расчетное значение) λ' , Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость в сухом состоянии c , кДж/(кг·°С)
1	2	3	4	5
Фанера водостойкая ламинированная	700	0,12	0,18	2,3
Этафом	100	0,036	0,04	1,34
Снег рыхлый сухой	300	0,29	—	2,1
Лед	900	2,32	—	1,8
Песчаное и гравийное основание (мерзлое) при $W_m = 5-20\%$	1600	1,10–2,73	1,10–2,73	1,05–1,47
Песчаное и гравийное основание (мерзлое) при $W_m = 5-20\%$	1800	1,51–2,84	1,51–2,84	1,05–1,34
Песчаное и гравийное основание (мерзлое) при $W_m = 5-10\%$	2000	2,14–2,90	2,14–2,90	1,05–1,13
Супеси пылеватые (мерзлые) при $W_m = 5-30\%$	1600	0,87–1,97	0,87–1,97	1,05–1,55
Супеси пылеватые (мерзлые) при $W_m = 5-20\%$	1800	0,99–1,97	0,99–1,97	1,05–1,34
Суглинки и глины (мерзлые) при $W_m = 5-30\%$	1600	0,64–1,97	0,64–1,86	1,05–1,55
Суглинки и глины (мерзлые) при $W_m = 5\%-20\%$	1800	0,75–1,80	0,75–1,80	1,05–1,34
Бетон (тяжелый) мерзлый	2400	1,6	1,9	1,05
Хвойные породы дерева поперек волокна	550	0,093	0,17	2,52
Лиственные породы дерева поперек волокна	700	0,104	0,23	2,52
Пенопласт плиточный	100	0,041	0,043	1,34
Пенопласт плиточный	150	0,046	0,049	1,34
Вата минеральная	100	0,04	0,049	0,76
Вата минеральная	150	0,05	0,06	0,76
Плиты минераловатные прошивные	100	0,044	0,048	0,76
Плиты минераловатные прошивные	200	0,053	0,06	0,76
Маты минераловатные рулонированные на синтетическом связующем	50	0,039	0,046	0,75
Маты минераловатные рулонированные на синтетическом связующем	75	0,043	0,049	0,76
Сталь	7600	52		0,48
Толь	600	0,17	0,17	1,47

Опилки	250	0,069	0,24	-
--------	-----	-------	------	---

Окончание таблицы А.4

1	2	3	4	5
Шлак	600	0,14	0,29	
Шлак	800	0,17	0,34	
<i>Примечания</i>				
1 W_m — влажность материала, соответствующая нормальным и влажностным условиям эксплуатации.				
2 Значения параметров приведены для расчета затрат теплоты на отопление оснований. Промежуточные значения определяют интерполяцией.				

Таблица А.5 – Тепловыделение 1 кг цемента при твердении бетона

Вид и марка цемента	Температура, °С	Удельное тепловыделение цемента* (Э), кДж/кг, за время твердения, сут							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портландцемент марки 400	5	—	—	29	63	109	188	209	251
	10	12	25	50	105	146	209	251	293
	20	42	67	105	167	209	272	314	335
	40	84	134	188	230	272	314	335	—
	60	130	188	230	272	314	335	—	—
Портландцемент марок 500 и 600	5	12	25	42	125	89	188	230	272
	10	25	42	63	105	167	251	293	314
	20	42	84	125	188	251	292	335	377
	40	105	167	209	272	293	356	377	—
	60	188	230	272	314	356	372	—	—
Шлакопортландцемент марки 300	5	—	12	25	42	63	126	167	188
	10	—	25	33	63	105	167	209	230
	20	—	33	62	125	147	209	251	272
	40	42	75	117	167	209	251	272	—
	60	63	105	147	209	230	272	—	—
Примечание – При применении в бетоне химических ускорителей твердения (1–1,5 % от массы цемента) вводят поправочный коэффициент: 1,3; 1,2; 1,15; 1,1 для 1; 2; 3 и 7 сут соответственно.									

Таблица А.6 – Коэффициенты теплопередачи опалубки

Тип опалубки	Материал слоев опалубки	Толщина слоя, мм	Коэффициент K_t , Вт/(м ² ·°С) при скорости ветра, м/с		
			0	5	15
1	2	3	4	5	6
I	Опалубочная система				
I.I	Опалубка перекрытия с палубой из фанеры $\delta = 21$ мм	21	3,64	4,77	4,99
I.П	Опалубка МОДОСТР-КОМБИ с палубой из фанеры $\delta = 12$ мм	12	5,2	6,6	6,77
I.III	Веерная опалубка колонн системы «МОДОСТР» с палубой из фанеры $\delta = 21$ мм	21	3,64	4,69	4,87
I.IV	Стеновая опалубка КАСКАД системы «МОДОСТР» с палубой из фанеры $\delta = 15$ мм	15	5,3	6,63	6,89
II	Доска	25	2,44	5,2	5,98
		40	2,03	3,6	3,94
III	Доска	25	0,67	0,8	0,82
	Пенопласт	30			
	Фанера	4			
IV	Доска	25	0,87	1,07	1,1
	Минеральная вата	50			
	Фанера	4			
V	Металл	3	1,02	1,27	1,33
	Минеральная вата	55			
	Фанера	4			
VI*	Фанера	10	2,44	5,1	5,8
	Асбест	4			
	Фанера	10			

Окончание таблицы А.6

1	2	3	4	5	6
VII	Толь, полиэтиленовая пленка	–	0,74	0,89	0,9
	Опилки	100	0,74	0,89	0,9
VIII	Толь, полиэтиленовая пленка	–	1,26	1,77	1,87
	Шлак	150	1,26	1,77	1,87
IX	Толь, полиэтиленовая пленка	–	1,01	1,31	1,37
	Минеральная вата	50	1,01	1,31	1,37

Примечание — * Применяется с сетчатым нагревателем, расположенным между слоями асбеста. Промежуточные значения K_T определяют интерполяцией.

Таблица А.7 - Зависимость прочности бетона от возраста и средней температуры его твердения

Бетон	Возраст, сут	Прочность бетона, % от проектной, для средней температуры твердения, °С					
		0	5	10	20	30	40
1	2	3	4	5	6	7	8
C ¹² / ₁₅ –C ²⁰ / ₂₅ на ПЦ 400	1	5	9	12	23	35	45
	2	12	19	25	40	55	65
	3	18	27	37	50	65	77
	5	28	38	50	65	80	90
	7	35	48	58	75	90	100
	14	50	62	72	90	100	–
	28	65	77	85	100	–	–
C ²⁵ / ₃₀ на ПЦ 500	1	8	12	18	28	40	55
	2	16	22	32	50	63	75
	3	22	32	45	60	74	85
	5	32	45	58	74	85	96
	7	40	55	66	82	92	100
	14	57	70	80	92	100	–
	28	70	80	90	100	–	–
C ³⁰ / ₃₇ , C ³⁵ / ₄₅ на ПЦ 600	1	8	13	21	32	45	59
	2	17	25	36	52	65	75
	3	23	35	45	62	75	85
	5	34	47	58	75	83	90
	7	42	57	68	85	90	100
	14	58	73	82	95	100	–
	28	71	83	92	100	–	–

Окончание таблицы А.7

1	2	3	4	5	6	7	8
С ¹² / ₁₅ –С ²⁰ / ₂₅ на ШПЦ 400	1	3	6	10	16	30	40
	2	8	12	18	30	40	60
	3	13	18	25	40	55	70
	5	20	27	35	55	65	85
	7	25	34	43	65	70	100
	14	35	50	60	80	96	–
	28	45	65	80	100	–	–
Керамзитобетон С ¹² / ₁₅ на ПЦ 400	1	3	5	10	25	50	61
	2	9	14	24	50	63	75
	3	18	23	37	63	73	85
	7	35	48	58	80	91	97
	28	65	79	63	100	–	–

Таблица А.8 – Удельное электрическое сопротивление бетона на портландцементе разных заводов

Завод-изготовитель	Величина удельного электрического сопротивления бетона ρ , Ом·м	
	начального	минимального
Кричевский	11,9	8,4
Костюковичский	11,6	8,1
Волковыский	12,4	8,6

Примечание – Приведенные величины ориентировочны. Они получены для бетонов с расходом цемента 415 кг/м³ и воды 185 л/м² при скорости подъема температуры 10 °С/ч и температуре изотермического прогрева 70 °С. Величины ρ могут изменяться при поступлении на завод сырья из другого карьера или при изменении схемы отсоса газов и пыли в обжиговых печах