



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Технология бетона и строительные материалы»

ТЕХНОЛОГИЯ МОНОЛИТНОГО И ПРИБЪЕКТНОГО БЕТОНИРОВАНИЯ

Пособие к практическим работам

**Минск
БНТУ
2013**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Технология бетона и строительные материалы»

ТЕХНОЛОГИЯ МОНОЛИТНОГО И ПРИОБЪЕКТНОГО БЕТОНИРОВАНИЯ

Пособие к практическим работам для студентов
специальности 1-70 01 01
«Производство строительных изделий
и конструкций»

М и н с к
Б Н Т У
2 0 1 3

УДК 693.54(076.5)(075.8)

ББК 38.626.1я7

Т38

Авторы:

*Э. И. Батяновский, А. В. Бусел
А. И. Бондарович, П. В. Рябчиков*

Рецензенты:

В. В. Бабицкий, В. М. Пилипенко

Технология монолитного и приобъектного бетонирования :
Т38 пособие к практическим работам для студентов специальности
1-70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций» /
Э. И. Батяновский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2013. – 63 с.
ISBN 978-985-550-190-0.

В методических указаниях изложены задачи, решаемые студентами дневной и заочной форм обучения при проведении практических работ по дисциплине «Технология монолитного и приобъектного бетонирования»; цель выполнения и основные теоретические положения разделов дисциплины, отражаемых тематикой практических работ; последовательность их выполнения.

УДК 693.54(076.5)(075.8)

ББК 38.626.1я7

ISBN 978-985-550-190-0

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

Введение

Целью практических занятий является закрепление студентами учебного материала по дисциплине «Технология монолитного и приобъектного бетонирования» и приобретение ими навыков ведения технологических расчетов. В частности, студенты осваивают практические расчеты:

- по обеспечению транспортирования бетонных смесей в зимний период;

- созданию надлежащего температурного режима при различных видах (вариантах) твердения бетона с целью обеспечения роста его прочности и достижения расчетных физико-технических характеристик;

- по оценке применимости или выбору опалубок по критериям прочности и жесткости;

- режимам предварительного электроразогрева бетона на объекте перед укладкой в опалубку.

Приобретенные навыки ведения расчетов студенты затем используют в процессе самостоятельной работы при курсовом проектировании по данному предмету и дипломном проектировании по соответствующей тематике.

Практическая работа № 1

РАСЧЕТ ОПАЛУБКИ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОЧНОСТИ, ЖЕСТКОСТИ И НА ОПРОКИДЫВАНИЕ

Задание: произвести проверочный расчет опалубки по критериям прочности, жесткости и на опрокидывание для разрабатываемого варианта возведения (устройства) монолитной конструкции; привести эскизы расчетной схемы опалубки и расстояний свободного пролета палубы.

Методика проверочного расчета палубы опалубки

1. Максимальное удельное боковое давление бетонной смеси в статическом состоянии на опалубку

$$P_{\max}^{\text{уд.ст}} = K_p \cdot \rho_{\text{б.с}} \cdot g \cdot h_{\max}, \text{ Па,}$$

где K_p – коэффициент бокового давления (распора) бетонной смеси на опалубку;

$\rho_{\text{б.с}} \cdot g$ – удельная сила тяжести, Н/м^3 , бетонной смеси средней плотности $\rho_{\text{б.с}}$ при $g = 9,80665$. Значение $\rho_{\text{б.с}}$ соответствуют нормативным: тяжелый бетон – 2400 кг/м^3 , легкий – 1800 кг/м^3 и т. д., если фактические ее значения не превышают нормативного показателя;

h_{\max} – расчетная высота слоя несхватившейся бетонной смеси, обладающей подвижностью и оказывающей боковое давление на опалубку:

$$h_{\max} = \tau_{\text{сх}} \cdot V_{\text{бет}}, \text{ м,}$$

где $\tau_{\text{сх}}$ – время схватывания бетонной смеси примененного состава в час;

$V_{\text{бет}}$ – скорость бетонирования, т. е. скорость укладки смеси относительно высоты бетонируемой конструкции, м/ч.

В случае если h_{\max} больше, чем заданная высота опалубки $h_{\text{оп}}$, далее используют величину $h_{\max} = h_{\text{оп}}$.

Для литой бетонной смеси, т. е. при максимальной величине бокового давления, K_p принимают по табл. 1.1.

Таблица 1.1

Коэффициент K_p

Значения, м:		Меньше или равно 0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	Больше или равно 2,8
K_p	Тяжелый бетон	0,99	0,98	0,97	0,93	0,86	0,76	0,64
	Керамзитобетон	0,98	0,965	0,95	0,91	0,84	0,73	0,60

Величина удельного бокового давления с учетом динамических нагрузок на опалубку при ее подаче (свободное падение) и уплотнении глубинными вибраторами

$$P_{\max}^{\text{уд}} = 1,2P_{\max}^{\text{уд.ст}}, \text{ МПа,}$$

а при подаче смеси нагнетанием

$$P_{\max}^{\text{уд}} = 1,5P_{\max}^{\text{уд.ст}}, \text{ МПа.}$$

2. Расчет величины свободного пролета палубы по критерию прочности осуществляют по формуле

$$l_{\text{пр}} = 1,3 \cdot b_{\text{п}} \cdot \sqrt{R / P_{\max}^{\text{уд}}}, \text{ см,}$$

где $b_{\text{п}}$ – толщина палубы (лицевой стенки опалубки), см;

R – нормативное сопротивление материала, из которого выполнена палуба опалубки (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Вид материала палубы	Ст.3	Доска сосновая (ель)	Фанера	
			рядовая	высокопрочн.
Значения R , МПа:	210	18	22	50
Значения $b_{п}$, см	0,2	1,6	1,0	1,0
	0,3	1,9	1,2	1,2
	0,4	2,5	1,6	1,6
		3,2	1,8	1,8
		4	1,9	1,9
Модуль упругости E , МПа	$21 \cdot 10^4$	10^4	$0,85 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$

3. Расчет величины свободного пролета палубы по критерию жесткости (допустимому прогибу):

$$l_{ж} = 1,71 \cdot b_{п} \cdot \sqrt[3]{E / (P_{\max}^{уд} \cdot 200)}, \text{ см}; \quad (1.1)$$

$$l_{ж} = 1,71 \cdot b_{п} \cdot \sqrt[3]{E / (P_{\max}^{уд} \cdot 400)}, \text{ см}. \quad (1.2)$$

Зависимость (1.1) относится к допускаемым наибольшим прогибам: $l = 1/200$; ее применяют к опалубкам для неотделяемых поверхностей.

Опалубки, предназначенные для возведения (устройства) отделяемых поверхностей (например, внутренних поверхностей стен зданий), рассчитывают по зависимости (1.2).

В формулах (1.1), (1.2) $b_{п}$ – толщина палубы, см;

E – модуль упругости материала палубы, МПа;

200, 400 – показатель прогиба.

4. Выбор межжосевого расстояния ребер жесткости палубы.

Сопоставляют расчетные значения $l_{пр}$ и $l_{ж}$ и принимают меньшее из полученных значений l .

Приводят эскиз принятого размещения ребер жесткости палубы с указанием расстояний свободного пролета.

Расчет опалубки на устойчивость (опрокидывание)

1. Расчетная схема элемента опалубки при $h_{\max} < h_{\text{оп}}$ дана на рис. 1.1.

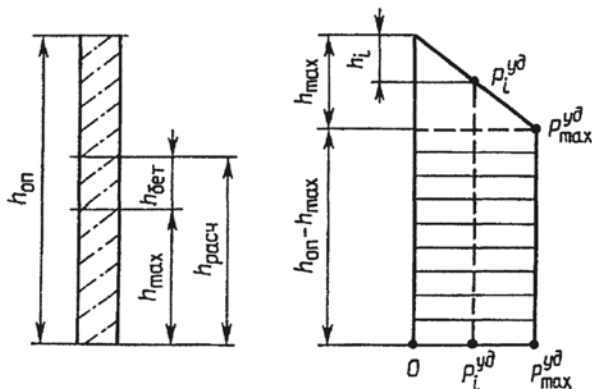


Рис. 1.1. Расчетная схема элемента опалубки при $h_{\max} < h_{\text{оп}}$

Расчетное усилие опрокидывания

$$N_{\text{расч}} = P_{\text{макс}}^{\text{уд}} \cdot b_{\text{зах}} \cdot h_{\text{расч}}, \text{ Н,}$$

где $P_{\text{макс}}^{\text{уд}}$ – максимальное боковое давление бетонной смеси, Па;

$b_{\text{зах}}$ – ширина опалубки (захватки), для которой выполняется расчет, м;

$h_{\text{расч}}$ – наибольшая расчетная высота слоя бетонной смеси, обладающей подвижностью (боковым давлением):

$$h_{\text{расч}} = h_{\text{макс}} + h_{\text{бет}}, \text{ м,}$$

при $h_{\text{бет}}$, равной высоте слоя при послойной укладке смеси, м.

2. Расчетная схема элемента опалубки при $h_{\max} > h_{\text{оп}}$ дана на рис. 1.2.

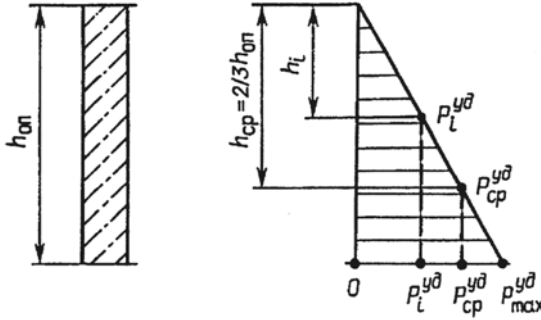


Рис. 1.2. Расчетная схема элемента опалубки при $h_{\max} \geq h_{\text{оп}}$

Расчетное усилие опрокидывания:

$$N_{\text{расч}} = P_{\text{ср}}^{\text{уд}} \cdot b_{\text{зах}} \cdot h_{\text{оп}}, \text{ Н},$$

где $P_{\text{ср}}^{\text{уд}}$ – среднее расчетное удельное давление бетонной смеси на опалубку.

Удельное давление бетонной смеси в любой (i -й) точке опалубки

$$P_i^{\text{уд}} = K_{pi} \cdot \rho_{\text{б.с}} \cdot g \cdot h_i, \text{ Па}. \quad (1.3)$$

Среднее расчетное удельное давление высотой $h_{\text{оп}}$ для опалубки из зависимости (1.3) с учетом динамических нагрузок (поправочный коэффициент $K_{\text{д}} = 1,2$ для подачи бетонной смеси свободным падением, $K_{\text{д}} = 1,5$ для нагнетания) будет

$$P_{\text{ср}}^{\text{уд}} = K_{\text{д}} \cdot K_{\text{р.ср}} \cdot \rho_{\text{б.с}} \cdot g \cdot h_{\text{ср}}, \text{ Па},$$

где $K_{\text{р.ср}}$ – коэффициент бокового давления для $h_{\text{ср}}$ (табл. 1.1);

$h_{\text{ср}}$ – высота приложения $P_{\text{ср}}^{\text{уд}}$, соответствует $h_{\text{ср}} = (2/3) h_{\text{оп}}$, м.

Полученные данные позволяют определить усилия в деталях крепежа опалубки (например, замковых соединений, раскосах, стяжках и пр.) и рассчитать их количество сечения силовых (несущих) элементов.

Практическая работа № 2

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И УКЛАДКИ БЕТОННОЙ СМЕСИ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

При работе в зимний период требуемую температуру бетонной смеси на выходе из смесителя $t_{см}$, которая обеспечит нормальные условия ее транспортирования на объект и укладки в опалубку, необходимо рассчитать по формуле

$$t_{см} = \frac{t_{б.н} - t_{н.в} \sum_{i=1}^n \Delta t_i}{1 - \sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.1)$$

где $t_{б.н}$ – температура бетонной смеси нормативная, $^\circ\text{C}$, то есть требуемый нижний предел температуры смеси по завершении ее укладки в опалубку либо выгрузки из транспортного средства в приемный бункер для разогрева перед подачей в опалубку:

$t_{б.н} \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ (рекомендуется $2\text{--}5 \text{ } ^\circ\text{C}$) в случае последующей тепловой интенсификации твердения бетона или применения предварительного разогрева смеси перед укладкой в опалубку (кроме нагнетательных способов подачи);

$t_{б.н} \geq 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ в случаях подачи бетонной смеси в опалубку нагнетательными способами на момент ее выгрузки в приемное устройство нагнетающей установки;

$t_{н.в}$ – температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$;

$\sum_{i=1}^n \Delta t_i$ – потери температуры бетонной смесью на протяжении

технологического цикла, включающего все операции: от выгрузки ее из смесителя в транспортное средство до отделки и влаго-, теплоизоляции поверхности забетонированной конструкции или до перегрузки смеси из транспортного средства в бункер для разогрева перед укладкой в опалубку, если используется предварительный разогрев бетона, доли ед.

Потери температуры бетонной смеси на каждой отдельной (*i*-й) операции технологического цикла от приготовления до полного завершения работ (в случае предварительного разогрева – включая выгрузку в бадьи) определяют по формуле

$$\Delta t_i = \Delta t'_i \cdot \tau_i, \text{ доли ед.}, \quad (2.2)$$

где $\Delta t'_i$ – относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения *i*-й операции за 1 минуту при разнице температур смеси и наружного воздуха в 1 °С (°С/°С · мин), значения которого приведены в табл. 2.1;

τ_i – продолжительность *i*-й операции, мин.

Таблица 2.1

Значения $\Delta t'_i$

№ п/п	Наименование и условия выполнения операций	$\Delta t'_i$, °С/°С · мин
1	2	3
1	Загрузка (погрузка или перегрузка) смеси один раз	0,032
2	Транспортирование смеси: самосвалами: до 2 м ³ до 3,2 м ³ автобетоновозом с теплоизоляцией кузова (до 3,2 м ³) автобадьевозом (до 1,6 м ³) автобетоносмесителями: до 2,5 м ³ до 3,5 м ³ до 5 м ³ более 5 м ³ то же в зимнем исполнении	0,003 0,0025 0,00022 0,0009 0,0024 0,0019 0,0014 0,001 0,0004
3	Подача смеси к месту укладки в опалубку: – нагнетательные методы, по бетоноводу на 1 м длины без утепления – с утеплением – в поворотных (неповоротных) бункерах (бадьях) краном на высоту <i>H</i> , м, на каждый метр – шахтным подъемником в утепленной шахте высотой <i>H</i> , м, на каждый метр	0,003 0,001 0,0022 0,001

Окончание табл. 2.1

1	2	3
4	Укладка и уплотнение бетона в конструкцию с минимальным размером или толщиной слоя бетона, м: 0,06 0,10 0,15 0,2 0,3 0,4 0,5 от 0,6	0,03 0,018 0,012 0,009 0,007 0,006 0,004 0,003
5	Отделка (заглаживание) и гидротеплоизоляция поверхности на 1 м ² ; установка электродов после укладки бетона за 1 мин	0,001
6	Подключение электродов, греющих проводов, намотка провода индуктора и его подключение после гидро-, теплоизоляции бетона	0,0004

Для операции подачи бетонной смеси к месту укладки в опалубку значение $\Delta t_i'$ применяют в размерности $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}$ длины бетоновода или расстояния транспортирования; при выполнении финишных работ (отделка, гидро- и теплоизоляция и пр.) размерность $\Delta t_i'$ – в $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2$.

Методика расчета температуры бетонной смеси на выходе из смесителя

1. Разрабатывается пооперационный график ведения работ (операций) технологического цикла доставки бетонной смеси на объект и укладки в опалубку в форме табл. 2.2.

Таблица 2.2

№ п/п	Наименование операций	Условия выполнения работ, механизмы (вид, производительность, грузоподъемность и т. д.)	Расстояние транспортирования $L_{\text{тр}}$, км, или перемещения H , м; объем работ, м ³ (м ²); скорость выполнения работ, расчетные формулы	Продолжительность операции, τ , мин
1	2	3	4	5

В графы табл. 2.2 заносят названия операций в их технологической последовательности и известные исходные данные, которые затем дополняют справочными характеристиками принимаемого для выполнения работ оборудования (механизмов) и расчетными данными о продолжительности отдельных операций технологического цикла транспортирования и укладки бетонной смеси.

2. Определяется расчетная продолжительность операций технологического цикла по следующей (примерной) схеме.

2.1. Время приготовления и загрузки бетонной смеси

$$\tau_{\text{пр}} = V_{\text{бет}} / \Pi_{\text{мин}}, \text{ мин},$$

где $V_{\text{бет}}$ – объем бетонной смеси, м^3 , перевозимой транспортным средством за один рейс (принимают по характеристике транспортного средства и конкретным условиям производства работ с учетом объема бетона на захватку);

$\Pi_{\text{мин}}$ – производительность смесителя бетоносмесительного узла (БСУ), $\text{м}^3/\text{мин}$, которую определяют из зависимости

$$\Pi_{\text{мин}} = V_{\text{см}} \cdot \beta \cdot n / 60, \text{ м}^3/\text{мин},$$

где $V_{\text{см}}$ – объем смесителя на БСУ, м^3 ;

β – коэффициент выхода бетона, значение которого определяют при расчете состава бетона или принимают по табл. 2.3;

n – нормируемое (ОНТП-07–85) количество замесов бетоносмесителя в час с учетом конкретных условий приготовления бетона; принимают по табл. 2.3.

Таблица 2.3

№ п/п	Наименование	Ед. измерения	Норма по ОНТП-07–85
1	2	3	4
1	Расчетное количество замесов в час для приготовления на плотных заполнителях тяжелых бетонных и растворных смесей с автоматизированным дозированием составляющих: – бетонные смеси, изготавливаемые в смесителях принудительного действия (жесткие и подвижные) – бетонные смеси, изготавливаемые в смесителях гравитационного действия:	Замес	35

1	2	3	4
1	а) при объеме готового замеса бетонной смеси 500 л и менее: – подвижностью 1–4 см – подвижностью 5–9 см – подвижностью 10 см и более б) при объеме готового замеса бетонной смеси более 500 л : – подвижностью 1–4 см – подвижностью 5–9 см – подвижностью 10 см и более – растворные смеси	–" –" –" –" –" –"	25 27 30 20 22 25 25
3	Расчетное количество замесов в час для приготовления легких бетонных смесей в бетоносмесителях принудительного действия с автоматизированным дозированием составляющих при плотности бетона в высушенном состоянии: – более 1700 кг/м ³ – от 1400 до 1700 кг/м ³ – от 1000 до 1400 кг/м ³ – 1000 кг/м ³ и менее	Замес –" –" –"	20 17 15 13
3	Коэффициент β выхода смесей в плотном теле: – бетонных тяжелых и легких (только для конструкционного бетона) – легких (для конструкционно-теплоизоляционного бетона) – растворных	– – –	0,67 0,75 0,80

2.2. Время загрузки бетонной смеси в транспортное средство определяют по зависимости

$$\tau_1 = \tau_{\text{выг}} \cdot n_{\text{зам}}, \text{ МИН,}$$

где $\tau_{\text{выг}}$ – время выгрузки бетоносмесителя, мин, принимаемое равным 0,25–0,5 мин для смесителей принудительного действия и 0,25 мин для гравитационных смесителей;

$n_{\text{зам}}$ – количество замесов бетоносмесителя, необходимое для загрузки транспортного средства на 1 рейс, то есть

$$n_{\text{зам}} = V_{\text{бет}}/V_{\text{см}} \cdot \beta.$$

Время загрузки бетонной смеси в расчетах следует выделять из общих затрат времени на ее приготовление и выгрузку, так как при свободном падении через холодный воздух смесь наиболее интенсивно охлаждается (см. данные табл. 2.1; $\Delta t'_i = 0,032 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \cdot \text{мин}$).

Время, в течение которого бетонная смесь будет накапливаться в транспортном средстве во время его нахождения на БСУ под погрузкой (за вычетом времени загрузки смеси), в расчетах следует суммировать со временем перевозки бетонной смеси для определения общих потерь ее температуры за этот период. Относительное снижение температуры бетонной смеси при этом принимают по п. 2 табл. 2.1. Таким же образом учитывают возможный период ожидания перед выгрузкой смеси на объекте.

2.3. Время транспортирования бетонной смеси

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{L_{\text{тр}}}{v_{\text{ср}}} \cdot 60, \text{ мин,}$$

где $L_{\text{тр}}$ – расстояние транспортирования, км;

$v_{\text{ср}}$ – средняя скорость транспортирования, принимаемая равной 30 и 15 км/ч для дорог с жестким и мягким покрытием соответственно.

Суммарные затраты времени при погрузке, транспортировании и ожидании выгрузки бетонной смеси определяют по зависимости

$$\tau_2 = \tau_{\text{пог}} + \tau_{\text{тр}} + \tau_{\text{ож}}, \text{ МИН,}$$

где $\tau_{\text{пог}} = \tau_{\text{пр}} - \tau_1$ – время нахождения транспортного средства на погрузке за вычетом времени загрузки смеси, мин.

2.4. Время выгрузки бетонной смеси в приемное устройство (бункер, бадью)

$$\tau_3 = v_{\text{бет}} / v_{\text{выгр}}, \text{ мин,}$$

где $v_{\text{выгр}}$ – скорость выгрузки транспортных средств; может быть принята до $2,0 \text{ м}^3/\text{мин}$ или определена синхронизировано, например, с производительностью используемого бетононасоса.

2.5. Относительные потери температуры бетонной смесью при подаче ее в опалубку Δt_n определяют, исходя из длины бетоновода (трубопровода) при использовании бетононасосов или пневмонагнетательных установок (агрегатов) либо с учетом расстояния (высоты) перемещения бункеров (бадей) кранами или подъемниками. Расчет ведут по зависимостям

$$\Delta t_4 = \Delta t'_{i\delta} \cdot l_{\delta}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_4 = \Delta t'_{ik} \cdot H, \text{ } ^\circ\text{C};$$

где $\Delta t'_{i\delta}$ и $\Delta t'_{ik}$ – соответственно относительное снижение температуры бетонной смеси при подаче ее в опалубку по бетоноводу или в бункере (бадье) краном или подъемником на 1 м ее перемещения (по п. 3 табл. 2.1), $^\circ\text{C}/^\circ\text{C}\cdot\text{м}$;

l_{δ} и H – длина бетоновода или расстояние (высота) подачи бункера (бадья) краном или подъемником, м.

2.6. Время укладки и уплотнения бетона определяют по зависимости

$$\tau_5 = v_{\delta} / \Pi, \text{ мин},$$

где v_{δ} – объем, м^3 , укладываемого в захватку (для массивов – в бетонируемый слой) бетона (при рекомендуемой высоте одновременно укладываемого слоя до 400 мм для смесей на заполнителях плотных горных пород и до 200 мм для смесей на пористых легких заполнителях и допустимой высоте слоя бетона не более $1,15 l_{\text{вибр}}$, где $l_{\text{вибр}}$ – длина вибровозбудителя глубинного вибратора);

Π – производительность, с которой бетон укладывается в опалубку (захватку), $\text{м}^3/\text{мин}$.

Производительность определяют на основании необходимого времени вибрирования бетона, которое рассчитывают по формуле И.Н. Ахвердова–В.П. Лукьянова (или иным научно обоснованным зависимостям):

$$t_b = K_b \cdot \tau_o^{\delta} (1 - V_{p.c}), \text{ с,}$$

где K_b – коэффициент, зависящий от параметров вибрирования: $K_b \sim 0,05-0,02$ при частоте колебаний $f \sim 50-200$ Гц и более соответственно, доли ед.;

τ_o^{δ} – предельное напряжение сдвига бетонной смеси, Па, которое рассчитывают по данным подбора состава бетона. Его значение в расчетах может быть принято (при отсутствии расчетных данных) для бетонных смесей подвижностью марок П1–П4 в пределах 1500–500 Па соответственно;

V_{pc} – объем растворной составляющей в бетоне, м³:

$$V_{pc} = 1 - V_{щ}^a \quad \text{или} \quad V_{pc} = 1 - \frac{\text{Щ}}{\rho_{щ}^3},$$

где $V_{щ}^a$ – абсолютный объем щебня в бетоне при его содержании (расходе) в 1 м³ – Щ и плотности зерен горной породы $\rho_{щ}^3$.

При уплотнении укладываемого бетона с помощью навесных вибраторов производительность будет соответствовать объему слоя бетона, отнесенному ко времени его распределения в опалубке и виброуплотнения.

Производительность работы с глубинным вибратором определяют по формуле

$$П = 2K_{исп} \cdot b \cdot R \cdot h \cdot \frac{60}{\tau_b + \tau_{пер}}, \text{ м}^3/\text{мин,}$$

где $K_{исп}$ – коэффициент использования вибратора, принимаемый равным 0,85;

b – ширина слоя уплотняемой смеси в опалубке, м (при $b > R$ принимают равным R);

R – радиус действия вибратора, м, который принимают по справочным данным; в расчетах допускается принять $R \sim 0,3-0,5$ м, в зависимости от мощности вибратора;

h – высота слоя уплотняемого бетона, м;

τ_b – минимально необходимое время вибрирования, с;

$\tau_{пер}$ – время перестановки вибратора (5–10 с).

Производительность при укладке и уплотнении бетона с помощью виброреек определяют исходя объема бетона захватки к времени распределения бетонной смеси в направляющих и виброуплотнения бетона. Следует учитывать, что параметры вибрирования виброреек характеризуются частотой $f \sim 50$ Гц, а высота укладываемого слоя бетона должна быть не более 250 мм при однослойном расположении арматуры (по высоте конструкции) и 120 мм – при расположении арматуры в два слоя. При больших толщинах слоев бетона его следует вначале уплотнять глубинным вибратором, а затем – виброрейкой. В последнем случае производительность определяют с учетом общих затрат времени на уплотнение бетона.

2.7. Относительные потери температуры бетонной смеси при отделке (заглаживании), гидроизоляции неопалубленной поверхности захватки или конструкции, установке электродов (если она осуществляется после укладки бетона), а также при подключении электродов или греющих проводов к сети, намотке (сборке) и подключении индуктора, то есть при выполнении операций после гидро-, теплоизоляции бетона, определяются по формуле

$$\Delta t_6 = \Delta t'_{\text{отд}} \cdot F + \Delta t'_{\text{у.э}} \cdot \tau_{\text{у.э}} + \Delta t'_{\text{под}} \cdot \tau_{\text{под}},$$

где $\Delta t'_{\text{отд}}$, $\Delta t'_{\text{у.э}}$ и $\Delta t'_{\text{под}}$ – соответственно относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения операций по заглаживанию и гидро-, теплоизоляции открытой поверхности бетона, $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2$, и операции по установке электродов (п. 5 табл. 2.1), а также при выполнении операций после гидро-, теплоизоляции неопалубленной поверхности бетона (п. 6, табл. 2.3), $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}$;

F – площадь неопалубленной поверхности бетона захватки или конструкции, м^2 ;

$\tau_{\text{у.э}}$, $\tau_{\text{под}}$ – время установки электродов и подключения их к сети (время навивки обмотки индуктора или сборки ее из инвентарных элементов; подключения греющих проводов и др.) соответственно, мин.

3. Определяются суммарные относительные потери температуры бетонной смеси на всех технологических переделах (операциях) цикла доставки и укладки ее в опалубку по зависимости

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i \approx \Delta t'_1 \cdot \tau_1 + \Delta t'_2 \cdot \tau_2 + \Delta t'_3 \cdot \tau_3 + \Delta t_4 + \Delta t'_5 \cdot \tau_5 + \Delta t_6$$

или, в случае доставки на объект и выгрузки в бункеры (бадьи) для предварительного разогрева, по формуле

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i \approx \Delta t'_1 \cdot \tau_1 + \Delta t'_2 \cdot \tau_2 + \Delta t'_3 \cdot \tau_3,$$

где $\Delta t'_1, \Delta t'_2, \Delta t'_3$ и $\Delta t'_5$ – относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения операций ее загрузки, транспортирования, выгрузки в бункер (бадью, приемное устройство) и укладке бетонной смеси в опалубку соответственно (по табл. 2.1), °C/°C · мин;

τ_1, τ_2, τ_3 и τ_5 – время выполнения операций загрузки, транспортирования, выгрузки и укладки смеси в опалубку, мин;

Δt_4 и Δt_6 – относительные потери температуры бетонной смеси при подаче ее в опалубку (п. 2.5) и при выполнении финишных работ (п. 2.7).

4. По формуле (2.1) определяется требуемая температура бетонной смеси на выходе из смесителя на основании полученного значения $\sum_{i=1}^n \Delta t_i$, принятой величине температуры бетона к началу прогрева или предварительного разогрева его перед укладкой в опалубку ($t_{б.н}$), с учетом физической (или расчетной) температуры наружного воздуха ($t_{н.в}$).

5. В случае использования нагнетательных способов подачи бетонной смеси при отрицательной температуре наружного воздуха требуется (при отсутствии иного указания), чтобы температура смеси была не ниже 20 °C на момент начала подачи.

В этом случае рационален вариант, при котором на месте приготовления бетонной смеси ей обеспечивают минимально необходимую температуру для доставки на объект с последующим разогревом до $t_{см} \sim 20$ °C непосредственно перед подачей в опалубку (или использует противоморозные добавки, обеспечивающие возможность работы с бетоном без предварительного разогрева).

Практическая работа № 3

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА ПО МЕТОДУ ГОРЯЧЕГО ТЕРМОСА

Бетонирование с применением метода термоса базируется на принципе использования тепла, введенного в бетон на стадии приготовления бетонной смеси или разогреве ее перед укладкой в опалубку и от тепловыделения цемента в процессе гидратации (экзотермии цемента). Благоприятные условия твердения бетона создают путем аккумуляции (накопления) теплоты в его объеме и поддержании за этот счет положительной температуры бетона в течение времени выдерживания, достаточного для достижения бетоном прочности не ниже критической.

Определяющими параметрами для расчета режима термосного выдерживания бетона являются:

критическая прочность бетона $f_{ст, крит}$, % от проектной), температура наружного воздуха $t_{нв}$, °С;

скорость ветра v_v , м/с; температура бетона начальная $t_{бн}$, °С;

температура разогрева бетона $t_{раз}$, °С;

температура бетона средняя – за период твердения $t_{ср}$, °С;

температура бетона конечная, т. е. к моменту распалубки, $t_{бк}$, °С;

модуль теплоотдающей поверхности конструкции (например, при отогретом основании) или общий $M_{п}$, м⁻¹;

затраты теплоты на нагрев арматуры опалубки и основания, если не производится их отогрев перед укладкой бетона $Q_{ар}$, $Q_{оп}$, $Q_{осн}$, кДж;

коэффициент теплопередачи опалубки, неопалубленных поверхностей конструкции K_t , Вт/(м² · °С);

значение тепловыделения (экзотермии) цемента \mathcal{E} , кДж/кг, и его содержание в 1 м³ бетона \mathcal{C} , кг;

время термосного выдерживания или естественного остывания бетона в опалубке $\tau_{ост}$, ч.

Последовательность расчета режима термосного твердения бетона

1. Устанавливается расчетное значение критической прочности бетона, которое должно соответствовать требованиям проектно-технической документации к распалубочной прочности бетона бетонизируемой конструкции.

2. Значение средней температуры бетона за расчетный период твердения, которое обеспечивает достижение требуемой критической прочности бетона, определяется по данным табл. 3.1 или по фактически установленным зависимостям кинетики роста прочности бетона от средней температуры твердения для конкретных условий ведения работ (по данным строительной лаборатории строящей организации или профильных научно-исследовательских учреждений).

Таблица 3.1

Бетон	Возраст, сут	Средняя температура бетона, °С					
		0	5	10	20	30	40
1	2	3	4	5	6	7	8
Класс С12/15– С20/25 на ПЦ М400	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	–	–
Класс С25/30 на ПЦ М500	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	–	–
Класс С30/37; С35/45 на ПЦ М600	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	–	–

1	2	3	4	5	6	7	8
Класс С12/15– С20/25 на ШПЦ М400	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	–	–
Аглопоритобетон класса С12/15 на ПЦ М400	1	3	6	10	24	48	61
	2	11	13	26	50	65	76
	3	20	24	40	62	75	86
	7	37	45	53	80	91	97
	28	67	73	82	100	–	–
Керамзитобетон класса С12/15 на ПЦ М400	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	83	100	–	–

При этом устанавливают рациональное соотношение значения средней температуры t_{cp} и времени его выдерживания (остывания) в опалубке $\tau_{ост}$, с учетом технических возможностей по разогреву бетона и необходимого периода оборачиваемости опалубки, зависящего от продолжительности твердения в ней бетона.

3. Приведенные в табл. 3.1 среднестатистические данные нарастания прочности бетона классов С12/15–С35/45 могут быть использованы в расчетах, относящихся к бетону, полученному из низкопластичных смесей марок П1 и П2 (осадка стандартного конуса в диапазоне 1–9 см по СТБ 1035–96) и приготовленных на цементе с содержанием C_3A не более 6 %, а также полученному из смесей марок по подвижности П3–П5 (ОК от 10 до 21 см и более), если повышение удобоукладываемости смеси достигнуто за счет использования в бетоне исходного состава пластифицирующих добавок первой и второй групп по Пособию П1–99 к СНиП 3.09.2001 при одновременном снижении начального водосодержания в бетоне не менее чем на 5 %.

В случае применения в бетоне добавок-ускорителей твердения: CaCl_2 ; Na_2SO_4 ; ПВК и других по П1–99 к СНиП 3.02.2001, а также цемента, содержащего $\text{C}_3\text{A} \geq 7\%$ или $\text{C}_3\text{S} + \text{C}_3\text{A} \geq 60\%$, нарастание прочности бетона по табл. 3.1 принимают с поправочными коэффициентами, приведенными в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Возраст бетона, сут	1	2	3	5	7	14	28
Значение коэффициента, учитывающего влияние добавок-ускорителей твердения	1,6	1,4	1,3	1,2	1,15	1,1	1,05
Значение коэффициента при использовании цемента, содержащего $\text{C}_3\text{A} \geq 7\%$	1,2	1,15	1,1	1,08	1,07	1,06	1,05

В остальных случаях данные табл. 3.1 могут быть использованы для расчета ориентировочного режима твердения бетона по методу термоса с обязательной проверкой в строительной лаборатории его основных параметров ($t_{\text{раз}}$, ($t_{\text{нач}}$); $t_{\text{БК}}$, t_{CP} ; $\tau_{\text{ост}}$) и прочности бетона к окончанию периода твердения, для конкретных условий ведения бетонных работ.

4. Рассчитывается температура предварительного разогрева $t_{\text{раз}}$ бетонной смеси, которая обеспечивает принятую по п. 2 величину t_{CP} за планируемый период твердения бетона $\tau_{\text{ост}}$, с учетом потерь температуры при укладке смеси в опалубку и конечной температуры бетона к моменту распалубки, по зависимости

$$t_{\text{раз}} = \frac{(t_{\text{CP}} - t_{\text{БК}}) \cdot (1,03 + 0,181M_{\text{II}})}{1 - 0,006 \cdot (t_{\text{CP}} - t_{\text{БК}})} + t_{\text{укл}}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t_{\text{БК}}$ – значения температуры бетона к началу снятия опалубки после выдержки в течение времени $\tau_{\text{ост}}$, но не ниже $5\text{ }^\circ\text{C}$ в контрольной точке;

$M_{\text{п}}$ – модуль теплоотдающей поверхности бетонизируемой конструкции, определяемый по п. 5;

$t_{\text{укл}}$ – потери температуры, °С, при укладке бетонной смеси в опалубку, определяемые по п. 6.

5. Модуль теплоотдающей поверхности бетонизируемой конструкции определяют как отношение теплоотдающей в процессе твердения бетона площади поверхности конструкции $F_{\text{т}}$, м², к объему бетона V , м³:

$$M_{\text{п}} = \frac{F_{\text{т}}}{V}, \text{ м}^{-1}. \quad (3.1)$$

При расчете величины $F_{\text{т}}$ не учитывают площади оснований, отогретых перед укладкой бетона.

В случае укладки бетона на неотогретое основание по формуле (3.1) определяют общий модуль бетонизируемой конструкции, а тепловые потери бетона на нагрев основания учитывают по методике п. 7.

6. Потери температуры бетона при подаче и укладке смеси в опалубку, включая операции заглаживания, гидро- и теплоизоляции поверхности конструкции и другие финишные работы, рассчитывают по формуле

$$t_{\text{укл}} = \frac{|t_{\text{нв}}| \cdot \sum_{i=1}^n \Delta t_i}{1 - \sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \text{ °С}, \quad (3.2)$$

где $|t_{\text{нв}}|$ – абсолютное значение температуры наружного воздуха, °С;

n – количество i -х операций, составляющих технологический цикл, для которого определяют потери температуры бетона;

Δt_i – потери температуры смеси при выполнении i -й операции технологического цикла в течение времени τ_i , определяемые по формуле (2.2) и данным табл. 2.1 (практическая работа № 2).

Продолжительность выполнения отдельных операций τ_i , мин, например, выгрузки бетонной смеси из транспортного средства или специализированного устройства для ее предварительного разогрева, подачи к месту укладки нагнетательными или иными способами,

укладки в опалубку с уплотнением, заглаживания и гидро-, теплоизоляции поверхности свежееотформованного бетона и другими финишными работами, определяют на основании соответствующих норм времени или нормативов на выполнение этих работ и технических характеристик применяемого оборудования, по методике п. 2.4–2.7 (практическая работа № 2).

7. В случае если не производится отогрева арматуры, опалубки, непучинистого грунтового основания (подготовки) или старого бетона перед укладкой бетонной смеси, ее температуру уточняют с учетом соответствующих потерь по зависимости

$$t'_{\text{раз}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot V_{\text{б}} \cdot t_{\text{раз}} - C_{\text{ст}} \cdot m_{\text{ст}} \cdot V_{\text{б}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{н.в}}) - Q_{\text{оп}} - Q_{\text{осн}}}{C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot V_{\text{б}} + C_{\text{ст}} \cdot m_{\text{ст}} \cdot V_{\text{б}} + \sum_{i=1}^n C_i \cdot F_i \cdot \delta_i \cdot \rho_i + C_{\text{осн}} \cdot \rho_{\text{осн}} \cdot V_{\text{осн}}},$$

где $C_{\text{б}}$, $C_{\text{ст}}$, C_i , $C_{\text{осн}}$ – удельная теплоемкость бетона, стали, i -го слоя многослойной опалубки и материала основания, кДж/(кг·°C), табл. 3.3;

$\rho_{\text{б}}$, $V_{\text{б}}$ – средняя плотность, кг/м³, и объем бетона, м³, в конструкции;

$m_{\text{ст}}$ – среднее содержание (расход) арматурной стали, кг на 1 м³ бетона;

F_i , δ_i , ρ_i – площадь i -й части опалубки (теплоотдающей поверхности конструкции), м²; толщина i -го слоя опалубки, м; плотность i -го слоя опалубки, кг/м³;

$Q_{\text{оп}}$ – тепловые затраты на нагрев опалубки, кДж:

$$Q_{\text{оп}} = (t_{\text{ср}} - t_{\text{н.в}}) \sum_{i=1}^n C_i \cdot F_i \cdot \delta_i \cdot \rho_i, \text{ кДж};$$

$Q_{\text{осн}}$ – тепловые затраты на отогрев основания:

$$Q_{\text{осн}} = C_{\text{осн}} \cdot \rho_{\text{осн}} \cdot V_{\text{осн}} (t_{\text{от}} - t_{\text{н.в}}), \text{ кДж},$$

где $\rho_{\text{осн}}$ – средняя плотность материала основания, кг/м³, принимаемая по фактическим данным или из табл. 3.3;

$V_{\text{осн}}$ – объем отогреваемого основания, определяемый по формуле

$$V_{\text{осн}} = F_{\text{осн}} \cdot h_{\text{осн}}, \text{ м}^3,$$

где $F_{\text{осн}}$ – площадь отогреваемого участка старого бетона, грунта, подготовки, м^2 ;

$h_{\text{осн}}$ – глубина (высота) отогреваемого основания, м, соответствующая глубине его промерзания (если она менее 300 мм), или $h_{\text{осн}} = 0,3$ м, если глубина промерзания более 300 мм;

$t_{\text{от}}$ – температура отогрева основания: $t_{\text{от}} \geq 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 3.3

№ п/п	Материал	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии λ_0 , $\text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	Расчетная величина коэффициента теплопроводности λ_0 , $\text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	Удельная теплоемкость в сухом состоянии C_0 , $\text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$
1	2	3	4	5	6
1	Железобетон ($W_m = 3 \%$)	2500	1,68	2,03	0,84
2	Бетон на гравии или щебне из природного камня ($W_m = 3 \%$)	2400	1,56	1,86	0,84
3	Шлакобетон на топливных (котельных) шлаках и бетон на аглопорите ($W_m = 8 \%$)	1800	0,7	0,93	0,84
4	То же	800	0,23	0,35	0,84
5	Шлакобетон на доменных гранулированных шлаках	1800	0,58	0,81	0,84
6	То же	1000	0,29	0,41	0,84
7	Керамзитобетон ($W_m = 10 \%$)	1600	0,52	0,75	0,84
8	То же	600	0,16	0,23	0,84
9	Шлак	600 800	0,14 0,17	0,29 0,34	– –
10	Бетон на вулканическом шлаке ($W_m = 10 \%$)	1200	0,32	0,45	0,97
11	То же	800	0,2	0,29	0,97
12	Вата минеральная ($W_m = 5 \%$)	100	0,04	0,49	0,76
13	То же	150	0,049	0,055	0,76

Продолжение табл. 3.3

1	2	3	4	5	6
14	Плиты мягкие, полужесткие и жесткие минераловатные на синтетическом связующем ($W_m = 5\%$)	100	0,046	0,052	0,76
15	То же	175	0,051	0,06	0,76
16	Плиты мягкие и полужесткие минераловатные на битумном связующем ($W_m = 5\%$)	100	0,046	0,052	0,92
17	То же	200	0,058	0,067	0,92
18	То же	300	0,069	0,081	0,92
19	Маты минераловатные прошивные, МРТУ 7-19-68	100	0,044	0,048	0,76
20	То же	200	0,53	0,06	0,76
21	Маты минераловатные, рулонированные, на синтетическом связующем, ТУ 36-917-67 ММСС СССР ($W_m = 5\%$)	50	0,039	0,46	0,75
22	То же	75	0,043	0,049	0,76
23	Маты и полосы из стеклянно-го волокна ($W_m = 5\%$)	175	0,049	0,56	0,84
24	Хвойные породы (поперек волокон) ($W_m = 20\%$)	500	0,093	0,17	2,52
25	Лиственные породы (поперек волокон)	700	0,104	0,23	2,52
26	Фанера клеевая ($W_m = 13\%$)	600	0,116	0,17	2,52
27	Плиты древесно-волокнистые и древесно-стружечные ($W_m = 12\%$)	1000	0,15	0,29	2,1
28	То же	600	0,104	0,16	2,1
29	То же	400	0,081	0,14	2,1
30	То же	200	0,058	0,08	2,1
31	Опилки	250	0,069	0,24	2,5
32	Оргалит	300	0,064	0,16	2,2
33	Пенопласт плиточный ($W_m = 10\%$)	74	0,041	0,043	1,34
34	Пенопласт плиточный ($W_m = 10\%$)	100	0,041	0,043	1,34
35	То же ($W_m = 5\%$)	150	0,46	0,49	1,34
36	То же	200	0,58	0,6	1,34
37	Мипора ($W_m = 30\%$)	15	0,041	0,052	1,34

Окончание табл. 3.3

1	2	3	4	5	6
38	Пенопласт плиточный ПХВ-1 ($W_m = 10\%$)	100	0,046	0,05	1,26
39	То же	125	0,058	0,62	1,26
40	Пенопласт плиточный ($W_m = 10\%$)	75	0,041	0,044	1,26
41	То же	125	0,046	0,05	1,26
42	Картон строительный многослойный «Энсонит»	650	0,12	0,17	1,34
43	Рубероид, пергамин кровельный, толь кровельный	600	0,17	0,17	1,47
44	Сталь	7800	58	–	0,48
45	Снег рыхлый, сухой	300	0,29	–	2,1
46	Лед	900	2,32	–	1,8
47	Песок (сухой)	1600– 1800	1,98–2,44	1,98–2,44	0,84
48	Песчаное и гравелистое основание (мерзлое) при $W_m = 5–25\%$	1600	1,1–2,73	1,1–2,73	1,05–1,47
49	То же при $W_m = 5–20\%$	1800	1,51–2,84	1,51–2,84	1,05–1,34
50	То же при $W_m = 5–10\%$	2000	2,14–2,9	2,14–2,9	1,05–1,13
51	Супеси пылеватые (мерзлые) при $W_m = 5–30\%$	1600	0,87–1,97	0,87–1,97	1,05–1,55
52	То же при $W_m = 5–20\%$	1800	0,99–1,97	0,99–1,97	1,05–1,34
53	Суглинки и глины (мерзлые) при $W_m = 5–30\%$	1600	0,64–1,86	0,64–1,86	1,05–1,55
54	То же при $W_m = 5–20\%$	1800	0,75–1,8	0,75–1,8	1,05–1,34
55	Бетон (тяжелый) мерзлый	2400	1,6	1,9	1,05

Примечания.

1. W_m – влажность материала по массе, соответствующая нормальным и влажностным условиям эксплуатации.

2. Данные п. 47–55 приведены для расчета затрат теплоты на отопление оснований. Промежуточные значения величин определяют интерполяцией.

8. По зависимости

$$t'_{\text{ср}} = t_{\text{бк}} + \frac{t'_{\text{раз}} - t_{\text{бк}}}{1,03 + 0,181M_n + 0,006(t'_{\text{раз}} - t_{\text{бк}})}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

уточняется значение средней за период твердения температуры бетона с учетом потерь температуры на нагрев арматуры, опалубки и отогрев основания.

По значению $t'_{\text{раз}}$ и данным табл. 3.1 и 3.2 (в случае применения добавок ускорителей твердения) оценивают изменение времени выдержки бетона в опалубке. Если понижение средней температуры при твердении бетона превышает 5 %, рекомендуется поднять температуру предварительного разогрева бетонной смеси до значения, определяемого по зависимости

$$t_{\text{ув}} = t_{\text{раз}} + (t_{\text{раз}} - t'_{\text{раз}}), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

9. Уточняется время остывания бетона в опалубке по формуле Б.Г. Скрамтаева–С.А. Миронова, в которой экзотермию (тепловыделение) цемента учитывают только в варианте холодного термоса, то есть без предварительного разогрева бетонной смеси или прогресса бетона:

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{C_6 \rho_6 \cdot (t_{\text{раз}} - t_{\text{б.к}}) + Ц \cdot Э}{3,6 \cdot K_T \cdot M_{\text{п}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{н.в}})}, \text{ ч}, \quad (3.3)$$

где C_6 – удельная теплоемкость бетонной смеси, в расчетах принимается равной 1,05 кДж/кг $^\circ\text{C}$;

ρ_6 – средняя плотность бетона, кг/м³, принимаемая в соответствии с расчетом состава бетона или для тяжелого бетона 2400 кг/см³;

$t_{\text{раз}}$ и $t_{\text{ср}}$ – температура разогрева и средняя за период твердения, $^\circ\text{C}$, либо их скорректированные значения по п. 7 и 8, если температуру разогрева смеси не увеличивали;

Ц – содержание цемента в 1 м³ бетона, кг;

Э – тепловыделение 1 кг цемента при твердении бетона, кДж/кг, по данным табл. 3.4;

K_T – коэффициент теплопередачи используемой опалубки, Вт/(м² · $^\circ\text{C}$) (по табл. 3.5 или установленный расчетом);

$t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$.

Должно соблюдаться условие $\tau_{\text{ост}} \geq \tau_{\text{выд}}$, то есть время остывания бетона, определенное по формуле (3.3) должно быть не менее планируемого периода выдержки бетона в опалубке, обеспечивающего для конкретных условий ведения работ достижение $f_{cm,кр}$ бетона.

Таблица 3.4

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение цемента*, 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	161	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	207	230	272	–	–

*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.

10. Коэффициент теплопередачи опалубки бетонированной конструкции, если его значения различаются для отдельных участков опалубки и укрытия неопалубленных поверхностей, определяют по формуле

$$K_T = \frac{F_1 \cdot K_{T1} + F_2 \cdot K_{T2} + \dots + F_n \cdot K_{Tn}}{F_1 + F_2 + \dots + F_n}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

где F_1, F_2, \dots, F_n – площадь отдельных участков опалубки и неопалубленных поверхностей, м^2 ;

$K_{T1}, K_{T2}, \dots, K_{Tn}$ – соответствующие коэффициенты теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

11. Уточняется соответствие полученных значений $\tau_{\text{ост(выд)}}$, $t_{\text{раз}}$, $t_{\text{ср}}$ обеспечению требуемой критической прочности бетона по условию

$$f_{cm, \text{факт}} \geq f_{cm, \text{кр}}.$$

При этом используют данные табл. 3.1 и 3.2 либо фактические данные о кинетике роста прочности бетона строительной (профильной научно-исследовательской) лаборатории.

При необходимости корректируют расчет: используют более качественные материалы для бетона (например, цемент большей активности и экзотермии), предусматривают обогрев основания (арматуры, опалубки) для снижения потерь температуры бетона, применяют опалубку с меньшим коэффициентом теплопередачи.

12. Расчет коэффициента теплопередачи опалубки, необходимо для обеспечения требуемых значений $\tau_{\text{ост}}$ и $f_{cm, \text{факт}} \geq f_{cm, \text{кр}}$, осуществляют по следующей методике.

Значение K'_T , которое обеспечивает в конкретных условиях ведения работ требуемую продолжительность остывания $\tau_{\text{ост}}$ и достижение $f_{cm, \text{кр}}$ бетона, определяют по формуле

$$K'_T = \frac{C_b \cdot \rho_b (t_{\text{раз}} - t_{\text{бк}})}{3,6M_{\text{п}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{нв}}) \cdot \tau_{\text{ост}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

В табл. 3.5 приведены данные о коэффициентах теплопередачи опалубок различной конструкции в зависимости от ее особенностей и скорости ветра.

Таблица 3.5

Тип опалубки	Материал слоев опалубки	Толщина слоя, мм	Коэффициент K , Вт/(м ² ·°C) при скорости ветра, м/с		
			0	5	15
1	2	3	4	5	6
I	Доска	25	2,44	5,2	5,98
II	Доска	40	2,03	3,6	3,94
III	Доска	25	1,8	3	3,25
	Толь	–			
	Доска	25			
IV	Доска	25	0,67	0,8	0,82
	Пенопласт	30			
	Фанера	4			
V	Доска	25	0,87	1,07	1,1
	Толь	–			
	Вата минеральная Фанера	50 4			
VI	Металл	3	1,02	1,27	1,33
	Вата минеральная	50			
	Фанера	4			
VII*	Фанера	10	2,44	5,1	5,8
	Асбест	4			
	Фанера	10			
VIII	Толь	–	0,74	0,89	0,9
	Опилки	100			
IX	Толь	–	1,27	1,77	1,87
	Шлак	150			
X	Толь	–	1,01	1,31	1,37
	Вата минеральная	50			

Примечания.

1.* Применяется с сетчатым нагревателем, расположенным между слоями асбеста.

2. Промежуточные значения K_t определяют интерполяцией.

Из табл. 3.6 по заданному (принятому на основе метеопрогноза) значению скорости ветра принимают величину α_k – коэффициента теплопередачи у наружной поверхности опалубки, Вт/м² · °С.

Таблица 3.6

Скорость ветра, м/с	0	5	10	15	20
Значение α_k	3,77	26,56	33,18	43,15	52,5

Толщину слоя используемого утеплителя опалубки, обеспечивающего значение K'_T , рассчитывают по формуле

$$\delta_{из} = \lambda_{из} \left(\frac{1}{K'_T} - \left(\frac{1}{\alpha_k} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) \right), \text{ м}, \quad (3.4)$$

где $\lambda_{из}$, λ_i – соответственно расчетный коэффициент теплопроводности утеплителя, Вт/(м² · °С), и остальных слоев опалубки (по табл. 3.3);

δ_i – толщина i -го слоя опалубки (кроме утеплителя), м.

13. При предварительном разогреве бетонной смеси перед укладкой затраты электрической энергии определяют по методике практической работы № 7.

14. В случае необходимости определяют коэффициент теплопередачи K'_T временного укрытия или опалубки (по фактическим данным ее палубы, утеплителя, защитного экрана), решив уравнение (3.4) относительно K'_T :

$$K'_T = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_k} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \text{ Вт}/((\text{м}^2 \cdot \text{°С})).$$

Практическая работа № 4

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОДНОГО ПРОГРЕВА БЕТОНА

Общие положения

Сущность электропрогрева или электродного прогрева бетона заключается в пропускании через него (через проводник с определенным электрическим сопротивлением) переменного тока, в результате чего в бетоне выделяется теплота.

Бетон, как и бетонная смесь, обладает ионной проводимостью: проводящей фазой является вода с растворенными в ней (диссоциированными) ионами клинкерных минералов и веществ-электролитов. Удельное электрическое сопротивление бетонов на плотных заполнителях зависит от водорастворимых соединений в цементе, а также расхода цемента и воды на 1 м³ бетона. Оно составляет 4–20 Ом · м для бетона на заполнителях из плотных горных пород, на пористых заполнителях 6–25 Ом · м. С повышением температуры бетона удельное электрическое сопротивление уменьшается и через 3–5 ч достигает соответственно 3,5–13 Ом · м, в конце прогрева оно достигает 20–50 Ом · м.

Сильные электролиты, применяемые в качестве добавок в бетоны (ускоряющие твердение, противоморозные), как правило, дополнительно снижают его удельное электрическое сопротивление в два и более раза. При электрическом расчете электропрогрева в качестве расчетной величины используют полусумму значений начального и минимального удельного сопротивления бетона конкретного состава на определенном цементе. Приблизительно значение расчетного удельного электрического сопротивления бетона на плотных заполнителях допускается принять равным 8 Ом · м и на пористых – 10 Ом · м.

1. Для подведения напряжения к бетону применяются стальные электроды, основные типы которых представлены в табл. 4.1 и на рис. 4.1.

Таблица 4.1

Электроды и их назначение	Описание, способ установки	Область применения
Пластинчатые для сквозного прогрева	Стальная палуба щитов, кровельная сталь, закрепленная на деревянной палубе щитов; размеры соответствуют размерам щитов, расположение электродов – на противоположных поверхностях конструкции	Конструкция толщиной до 300 мм (балки, прогоны, стены, перегородки, тоннели и т. п.)
Полосовые для периферийного прогрева	Элементы из полосовой стали толщиной до 4 мм или из кровельной стали шириной 20–50 мм, закрепленные на деревянной палубе щитов; электроды располагают вертикально (горизонтально)	То же
С односторонним расположением	Расположены на одной плоскости конструкции	Конструкция толщиной до 300 мм (бетонные подготовки, полы, покрытия площадок, перекрытия и т. п.)
С двухсторонним расположением для сквозного прогрева	Размещены на двух противоположных плоскостях конструкции	Конструкции толщиной 150–500 мм (стены и т. п.)
С расположением на всех опалубленных плоскостях конструкций	Размещены на всех опалубочных щитах, при необходимости – на накладных	Конструкции толщиной 400 мм и более любых типов
Стержневые для сквозного прогрева	Круглая сталь диаметром 4–16 мм; электроды устанавливают (забивают) в бетон отдельно или в виде плоских электродных групп	Конструкции любых размеров и типов
Струнные для сквозного прогрева	Круглая сталь диаметром 4–10 мм; электроды устанавливают по оси конструкции или параллельно оси	Конструкции, длина которых значительно превышает размеры сечения (балки, прогоны, колонны и т. п.)

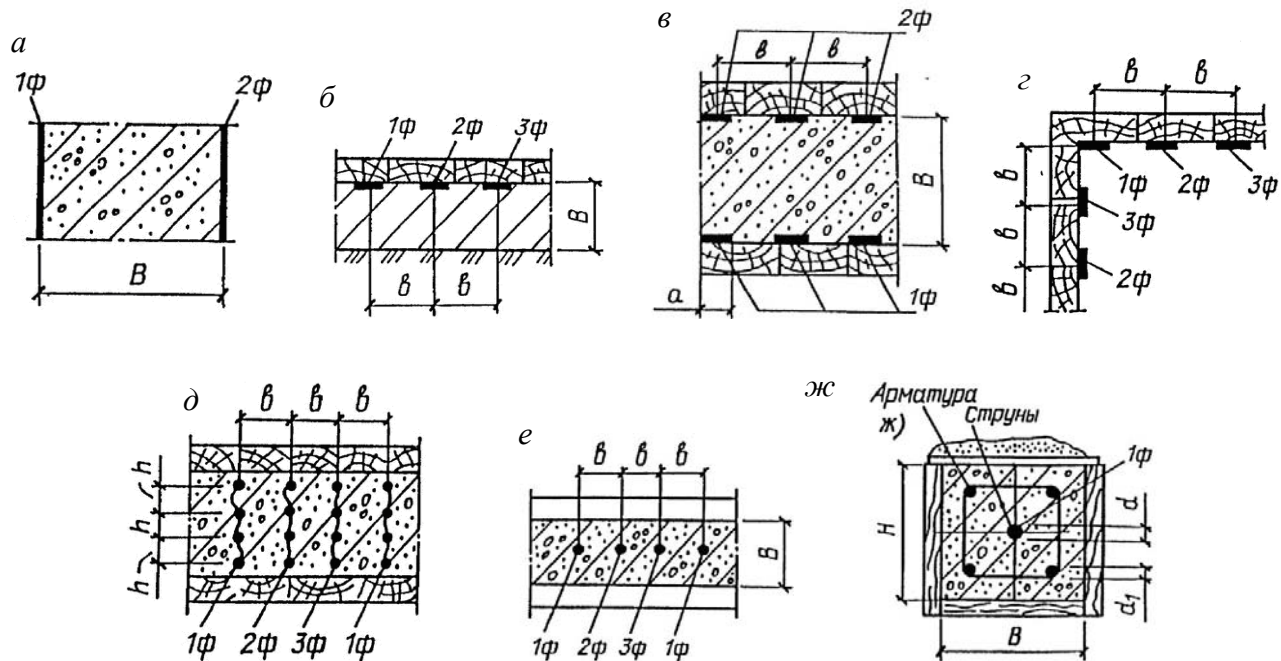


Рис. 4.1. Схемы размещения электродов:

a – пластинчатых; *б* – при периферийном прогреве; *в* – при двустороннем сквозном прогреве; *г* – при периферийном прогреве массивных конструкций полосовыми электродами; *д* – при прогреве с помощью плоских групп стержневых электродов; *е* – при прогреве стержневыми электродами; *ж* – при прогреве струнными электродами;

1ф, 2ф, 3ф – фазы понижающего трансформатора

Применяемое расстояние между электродами обычно находится в пределах $b \sim 150\text{--}400$ мм. Оно уточняется и, при необходимости, корректируется расчетом величины удельной мощности $P_{\text{уд}}$, Вт/м³, которую обеспечивает принятая схема их размещения. При этом должно соблюдаться условие: $P_{\text{уд}} \geq P_{\text{под}}$, где $P_{\text{под}}$ – максимальная мощность, необходимая при подъеме температуры прогреваемого бетона для конкретных условий ведения работ. Ее значение определяют по методике, изложенной в следующем параграфе.

Удельная мощность $P_{\text{уд}}$ для схем расстановки электродов, приведенных на рис. 4.1, рассчитывается по следующим формулам:

рис. 4.1, а:

$$P_{\text{уд}} = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{B^2 \cdot R_{\zeta}}, \text{ кВт/м}^3, \quad (4.1)$$

рис. 4.1, б; з:

$$P_{\text{уд}} = \frac{1,57U^2 \cdot 10^{-3}}{R_{\zeta} \cdot b \cdot B \left(z \cdot \ln \frac{4B}{\pi a} + \frac{\pi b}{2B} \right)}, \text{ кВт/м}^3, \quad (4.2)$$

рис. 4.1, в:

$$P_{\text{уд}} = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{R_{\zeta} \cdot B^2 \left(1 + \frac{a \cdot b}{\pi \cdot B} \cdot \ln \frac{b}{2a} \right)}, \text{ кВт/м}^3, \quad (4.3)$$

рис. 4.1, д:

$$P_{\text{уд}} = \frac{3,14 \cdot U^2 \cdot 10^{-3}}{R_{\zeta} \cdot b \cdot h \left(z \cdot \ln \frac{h}{\pi d} + \frac{\pi b}{h} \right)}, \text{ кВт/м}^3, \quad (4.4)$$

рис. 4.1, *е*:

$$P_{\text{уд}} = \frac{3,14 \cdot U^2 \cdot 10^{-3}}{R_6 \cdot B \cdot b \cdot \left(z \cdot \ln \frac{b}{\pi d} + \frac{\pi \cdot b}{B} \right)}, \text{ кВт/м}^3, \quad (4.5)$$

рис. 4.1, *ж*:

$$P_{\text{уд}} = \frac{6,28 \cdot U^2 \cdot 10^{-3}}{R_6 \cdot B^2 \ln \frac{2b}{d} \sqrt[4]{\frac{b}{2d_1}}}, \text{ кВт/м}^3, \quad (4.6)$$

где U – напряжение на электродах, В;

B – толщина прогреваемого слоя бетона (конструкции), м;

R_6 – расчетное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом · м;

b – расстояние между электродами, м;

z – коэффициент, при трехфазном токе равный 1,5, при однофазном – 2;

a – ширина полосовых электродов, м;

d – диаметр стержневых и струнных электродов, м;

d_1 – диаметр стержней арматуры, используемой в качестве фазного электрода, м.

При схеме размещения стержневых электродов в шахматном порядке с шагом « b » расчет $P_{\text{уд}}$ ведут по формуле схемы рис. 4.1, *е* при $B = b$, м.

При схеме рис. 4.1, *ж* для струнных электродов расчет $P_{\text{уд}}$ осуществляется при использовании арматуры в качестве электрода, подключенного к фазе. Если арматура не используется в качестве электрода, то расчет $P_{\text{уд}}$ ведут по той же формуле при d и d_1 – диаметрах струн, подключенных к разным фазам.

2. Использование арматуры в качестве электродов допускается при напряжении не более 85 В во избежание пересушивания при-стержневых зон бетона и уменьшения его прочности и качества сцепления с арматурой. Рекомендуется использовать арматуру в качестве нулевой фазы, подключая ее к нулевому проводу. Если

арматура не используется в качестве электрода, занулять или заземлять ее не рекомендуется во избежание неравномерности температурного поля и возрастания электрической мощности по сравнению с ее расчетным значением.

Запрещается в качестве электродов использовать преднапряженную арматуру и арматуру растянутых зон конструкций, а также соприкасающуюся с металлическими частями опалубки и ее крепежными элементами.

3. Для питания электропрогрева и других способов электротермообработки применяют комплектные трансформаторные подстанции либо трехфазные понижающие трансформаторы, важнейшие характеристики некоторых из них приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Тип оборудования	Мощность, кВт·А	Напряжение, В		Сила тока, А	
		первичное	вторичное	первичная	вторичная
КТП-ТО 80-86	88	380	55, 65, 75, 85, 95	121,5	471, 520
КТП-63-ОБ	63	380	49, 60, 70, 85, 103, 121	82, 69	301, 520
ТМОБ-63*	63	380	49, 60, 70, 85, 103, 121	82, 69	301, 520
ТМОА-50*	50	380	49, 60, 70, 85, 103, 121	76, 65	239, 418
ТСПК-20А*	20	380, 220	12, 22, 38, 48, 62, 101	–	120, 160, 240, 320, 480

Примечание. * Все трансформаторы трехфазные: ТСПК-20А с воздушным охлаждением, остальные – с масляным.

Заданный температурный режим электротермообработки бетона поддерживают за счет изменения напряжения на электродах, переключая ступени вторичного напряжения понижающего трансформатора. С целью более точного выдерживания заданного температурного режима электротермообработки бетона, повышения его ка-

чества, снижения трудовых и энергетических затрат рекомендуется в процессе тепловой обработки применять автоматическое регулирование напряжения. При ручном режиме управления прогревом начальное напряжение, как правило, достигает 85 В и более. Через 2–3 ч подъема температуры бетона (в зависимости от консистенции, температуры смеси, вида цемента и особенно наличия добавок-электролитов) его рекомендуется снижать, а затем через 2–5 ч прогрева снова повышать вплоть до 100–120 В.

При электропрогреве бетонов с противоморозными добавками и ускорителями твердения рекомендуется использовать понижающие трансформаторы с большим диапазоном величин вторичного напряжения. Они дают возможность в первые часы прогрева значительно снижать напряжение подводимого тока с учетом падения электрического сопротивления таких бетонов при повышении их температуры. При необходимости заданную скорость подъема и температуру изотермического прогрева поддерживают путем периодического включения и отключения напряжения, наименьшего из обеспечиваемых понижающим трансформатором. Возможно использование перекоммутации электродов (переподключения) через один, т. е. увеличение расстояния между разнофазными электродами, например с 200 до 400 мм, с последующим восстановлением (с ростом электросопротивления бетона в процессе твердения) начальной схемы их подключения.

4. При электродном прогреве бетона с добавками – ускорителями твердения – в утепленных опалубках наиболее рационален режим, включающий нагрев бетона до температуры 40–60 °С (меньшее значение – для портландцемента 1-й группы эффективности при пропаривании, большее – для шлакопортландцемента), с последующим его термостатированием до снятия опалубки. В неутепленных опалубках этот режим прогрева может быть реализован в конструкциях с $M_{п} \leq 5 \text{ м}^{-1}$ при температуре наружного воздуха до –10 °С либо $M_{п} \sim 8\text{--}10 \text{ м}^{-1}$ для $t_{нв} \leq -5 \text{ °С}$, если требуемая прочность бетона к моменту распалубки через 12–14 ч после начала подвода энергии не превышает 50 % от проектной. В других случаях требуется изотермический прогрев бетона, продолжительность которого определяется строительной лабораторией. Во всех случаях применения энергосберегающих технологий электродного прогрева на

основе использования добавок ускорителей твердения бетона режимы его разогрева и подвода энергии должны устанавливаться строительной лабораторией (или профильной научно-исследовательской) для конкретных материалов и условий ведения работ.

5. При электропрогреве бетона необходимо учитывать специальные требования к производству работ. Стержневые электроды должны выступать на 80–100 мм над утеплением неопалубленной поверхности для возможности их подключения к токопроводящим проводам с помощью мягкой стальной проволоки диаметром 1–1,5 мм. Полосовые электроды закрепляют на деревянных щитках вертикально, их концы должны выступать на 80–100 мм за кромку щита для подключения с помощью болта с гайкой к поводкам, закрепленным на токоподводящих проводах. На наружной стороне каждого щита рекомендуется осуществлять коммутацию полосовых электродов с установкой вилочного разъема, позволяющего быстро подключить щит к токоподводящим проводам.

Накладные деревянные щиты для периферийного электропрогрева бетона через горизонтальные поверхности конструкций рекомендуется изготавливать длиной не более 1,5 м из досок толщиной 40 мм. При бетонировании конструкций малой толщины на бетон целесообразно укладывать сразу накладные щиты по мере уплотнения бетонной смеси и подавать на электроды напряжение во избежание остывания свежеложенного бетона или его замерзания.

Струнные электроды подвешивают с помощью стальных крючков, изолированных резиновыми трубками, или крепят к специально установленным изолированным поперечным стальным стержням. Струнные электроды диаметром не более 8 мм можно натягивать на опалубку.

Рекомендуемое расстояние между электродами и арматурой при напряжении на электродах до 60 В составляет не менее 25 мм, до 85 В – не менее 40 мм и более 85 В – не менее 50 мм.

При использовании арматуры в качестве электродов к сеткам или пространственным каркасам приваривают два-три арматурных выпуска и подключают их к соответствующей фазе понижающего трансформатора. При подаче напряжений на электроды и в процессе электропрогрева необходимо следить за состоянием проводов и контактов, в случае их перегрева (обгорания) – отключить напряжение и устранить неисправность.

Расчет параметров электропрогрева бетона

1. Определяется распалубочная прочность бетона $f_{ст.расп}$, которая должна быть не ниже критической прочности бетона по табл. 1.2 и не ниже ее значения, требуемого по проектно-технической документации производства работ.

2. Определяется температура прогрева бетона t_n , °С, с учетом следующих основных факторов: вида применяемого цемента, модуля поверхности, наличия и доли неопалубленной поверхности, эксплуатационных требований к бетону, значения прочности бетона к окончанию прогрева и времени выдержки конструкции в опалубке (необходимого (допускаемого) по условиям производства работ по табл. 4.3).

Таблица 4.3

Бетон	Время прогрева, ч	Прочность бетона, % от проектной при температуре изотермического прогрева, °С				
		40	50	60	70	80
Класс С12/15–С20/25 на ПЦ М400	8	18	30	38	50	60
	16	33	44	55	66	75
	24	45	55	65	74	80
	48	68	75	80	–	–
	72	77	85	89	–	–
Класс С25/30–С35/45 на ПЦ М500; М600	8	25	35	45	60	70
	16	48	55	60	70	80
	24	55	65	70	80	–
	48	75	85	90	–	–
	72	85	92	98	–	–
Класс С12/15–С20/25 на ШПЦ М400	8	16	20	30	40	50
	16	30	35	50	60	70
	24	40	50	65	74	83
	48	60	75	90	100	–
	72	70	90	–	–	–

Примечание. Промежуточные значения определяют интерполяцией.

Рекомендуемые значения t_n соответствуют:

до 60 °С – для бетона на шлакопортландцементе;

до 50 °С – на портландцементе третьей группы эффективности при пропаривании;

до 45 и 40 °С – соответственно для портландцемента второй и первой групп эффективности и также до 40 °С при наличии повышенных требований к бетону по эксплуатационным характеристикам (водонепроницаемости, морозостойкости, истираемости и др.), для бетона конструкций транспортных коммуникаций, а также предназначенных для эксплуатации в агрессивных средах.

3. Время подъема температуры $\tau_{\text{под}}$, ч, при скорости подъема температуры бетона v_t , °С/ч, в соответствии с требованиями технической документации (задания) рассчитывается по зависимости

$$\tau_{\text{под}} = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{б.н}}}{v_t}, \text{ ч,}$$

где $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона к началу прогрева, °С, которая должна быть не ниже 0 °С. В случае электрогрева бетона без предварительного разогрева смеси на объекте принимают $t_{\text{б.н}} = 2-5$ °С и учитывают это значение при расчете температуры бетонной смеси на выходе из смесителя предприятия-изготовителя по практической работе № 2 настоящего пособия. При предварительном разогреве бетонной смеси на объекте, с последующим электрогревом бетона, принятое значение $t_{\text{б.н}}$ используют для расчета температуры разогрева с учетом потерь при ее укладке по формуле

$$t_{\text{раз}} = t_{\text{б.н}} + t_{\text{укл}}, \text{ °С,}$$

где $t_{\text{укл}}$ – потери температуры при укладке бетонной смеси в опалубку, определяемые по формуле (3.2).

Для бетона конструкций транспортных коммуникаций, конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, и при наличии повышенных требований к бетону по эксплуатационным характеристикам скорость подъема температуры должна быть не более 5 °С/ч.

4. Время изотермического прогрева бетона $\tau_{\text{из}}$ до приобретения им требуемой для распалубки прочности $f_{\text{см, расп}}$ при расчетной температуре прогрева $t_{\text{п}}$ определяют по данным табл. 4.3 или фактическим данным строительной (профильной научно-исследовательской) лаборатории. В табл. 4.3 приведены среднестатистиче-

ские данные о росте прочности бетона в процентах от проектной в зависимости от марки цемента и температуры изотермического прогрева.

В случае применения в бетоне добавок ускорителей твердения нарастание прочности бетона по табл. 4.3 принимают с поправочным коэффициентом, приведенным в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Время прогрева бетона, ч	Значения поправочного коэффициента для температуры прогрева, °С				
	40	50	60	70	80
До 24	1,8	1,6	1,4	1,35	1,3
48	1,4	1,3	1,2	–	–

Примечание. Не рекомендуется прогрев бетона с добавками-ускорителями твердения более 24 ч и при температуре более 40 °С для портландцемента 1-й группы эффективности при пропаривании; 45, 50 и 60 °С для 2-й и 3-й групп эффективности и шлакопортландцемента соответственно, так как при прогреве большей продолжительности и температуры снижается эффективность применения добавок и растут энергозатраты.

5. Определяется время остывания бетона $\tau_{\text{ост}}$ до температуры $t_{\text{б.к}}$, обеспечивающей допускаемую по нормам или технической документации разницу температур его наружных слоев и воздуха.

При определении $\tau_{\text{ост}}$ возможны два варианта:

- а) требуется ускоренный оборот опалубки;
- б) по условиям ведения работ допускается продолжительное остывание бетона вместе с опалубкой.

6. По варианту а) принимают скорость остывания бетона $v_{\text{ост}}$, °С/ч, и время остывания определяют по зависимости

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{расп}}}{v_{\text{ост}}}, \text{ ч,}$$

где $t_{\text{п}}$ – температура прогрева бетона, °С;

$t_{\text{расп}}$ – температура бетона к началу распалубки, °С, с учетом допускаемой разницы температур между бетоном и воздухом.

Значение $t_{\text{расп}}$ определяют по зависимости

$$t_{\text{расп}} = t_{\text{н.в}} + \Delta t, \text{ } ^\circ\text{С},$$

где $t_{\text{н.в}}$ – температура воздуха (до 0 °С);

Δt – допускаемая разница температур между бетоном и воздухом, принятая или установленная расчетом при немедленном снятии опалубки по формуле

$$\Delta t = \varepsilon_{\text{доп}} \left(128 + \frac{\beta \cdot M_n}{3 + 10\sqrt{v_{\text{max}}}} \right), \text{ } ^\circ\text{С}, \quad (4.7)$$

или в случае временного укрытия поверхности распалубливаемой конструкции после снятия опалубки – по формуле

$$\Delta t = \varepsilon_{\text{доп}} \left[128 + \beta \cdot M_{\text{п}} \left(1,16 \cdot R_{\text{из}} + \frac{1}{3 + 10\sqrt{v_{\text{max}}}} \right) \right], \text{ } ^\circ\text{С},$$

где ε – допускаемые деформации растяжения, для тяжелого бетона принимаемые $\varepsilon \sim 0,11$ мм/м и для легкого бетона $\varepsilon \sim 0,15$ мм/м;

β – эмпирический коэффициент, учитывающий геометрическую форму конструкций: для имеющих ребра $\beta = 132$, для округлых $\beta = 380$;

v_{max} – максимальная скорость ветра на момент распалубки (ожидаемая по метеопрогнозу, но не менее 5 м/с).

7. Для варианта б) время остывания бетона в опалубке рассчитывают до температуры $t_{\text{б.к}}$ по формуле (3.3).

При этом в формулу (3.3) вместо $t_{\text{раз}}$ подставляют величину температуры прогрева бетона $t_{\text{п}}$, а также предварительно рассчитанное значение ожидаемой средней за период остывания бетона температуры $t_{\text{ср}}$ по формуле

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

8. Определяется общая продолжительность выдерживания бетона в опалубке:

$$\tau_{\text{выд}}^{\text{общ}} = \tau_{\text{под}} + \left(\tau_{\text{из}} - \frac{\tau_{\text{под}}}{4} - \frac{\tau_{\text{ост}}}{2} \right) + \tau_{\text{ост}}, \text{ ч.} \quad (4.8)$$

В случае если принят режим медленного остывания бетона в опалубке (п. 7) после изотермического прогрева и второе слагаемое формулы (4.8) приобретает отрицательный знак или превращается в ноль, т. е. выполняется условие

$$\frac{\tau_{\text{под}}}{4} + \frac{\tau_{\text{ост}}}{2} \geq \tau_{\text{из}},$$

это означает, что для данных условий твердения бетона изотермический прогрев не нужен. Достаточно разогрева бетона до температуры $t_{\text{п}}$ и выдержки его в опалубке расчетное время $\tau_{\text{ост}}$ при общей продолжительности выдерживания бетона в опалубке:

$$\tau_{\text{выд}}^{\text{общ}} = \tau_{\text{под}} + \tau_{\text{ост}}, \text{ ч.}$$

Если сумма значений $\tau_{\text{под}} / 4 + \tau_{\text{ост}} / 2$, не превышает время изотермического прогрева, то его скорректированную для рассматриваемого случая величину $\tau'_{\text{из}}$ определяют по зависимости

$$\tau'_{\text{из}} = \tau_{\text{из}} - \frac{\tau_{\text{под}}}{4} - \frac{\tau_{\text{ост}}}{2}, \text{ ч.}$$

Этим учитывается, что в процессе нагрева и особенно за время остывания бетон приращивает прочность.

9. Требуемая мощность на подъеме температуры определяется по формуле

$$P_{\text{под}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot v_t}{3600} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{оп}i} \cdot \rho_{\text{оп}i} \cdot \delta_{\text{оп}i} \cdot M_{\text{п}}}{3600} \times \\ \times \frac{v_t}{2} + \frac{K_{\text{т}} \cdot M_{\text{п}} \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н.в}})}{1000} - 0,8, \text{ кВт/м}^3, \quad (4.9)$$

где $C_{\text{б}}$, $C_{\text{оп}i}$ – удельная теплоемкость бетона (принимают равной $C_{\text{б}} = 1,05$ кДж/кг · °С) и опалубки; i относится к каждому слою многослойной опалубки кДж/(кг · °С);

$\rho_{\text{б}}$, $\rho_{\text{оп}i}$ – средняя плотность бетона и материалов опалубки, кг/м³;

$\delta_{\text{оп}i}$ – толщина i -го слоя опалубки, м;

v_t – скорость подъема температуры, °С/ч;

$K_{\text{т}}$ – коэффициент теплопередачи опалубки, Вт/(м² · °С);

$t_{\text{п}}$ – температура прогрева бетона, °С;

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

0,8 – снижение требуемой мощности за счет учета теплоты экзотермии цемента, кВт/м³.

10. Определяется схема размещения электродов и удельная мощность $P_{\text{уд}}$, кВт/м³, которую обеспечивает принимаемая схема по соответствующей формуле (4.1)–(4.6).

Должно соблюдаться условие, согласно которому

$$P_{\text{уд}} \geq P_{\text{под}},$$

что подтверждает возможность принятой схемы размещения электродов обеспечить заданный режим разогрева бетона при планируемом вторичном напряжении на электродах, например $U = 85$ В.

Если $P_{\text{уд}} < P_{\text{под}}$, рассчитывают значение удельной мощности с большим вторичным напряжением, в пределах, обеспечиваемых специализированным оборудованием (см. табл. 4.2). Использование напряжения свыше 121 В при прогреве бетона и железобетонных конструкций не рекомендуется. При необходимости уменьшают расстояние между электродами или изменяют схему их расстановки и способ прогрева.

11. Требуемая мощность для поддержания температуры определяется при прогреве по формуле

$$P_{\text{п}} = \frac{K_{\text{т}} \cdot M_{\text{п}} \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н.в}})}{1000}, \text{ кВт/м}^3. \quad (4.10)$$

12. Затраты электрической энергии на прогрев бетона захватки объемом $V_{\text{б}}$, м³, рассчитываются по формуле

$$P = P_{\text{под}} \cdot V_{\text{б}} \cdot \tau_{\text{под}} + P_{\text{п}} \cdot V_{\text{б}} \cdot \left(\tau_{\text{выд}} - \frac{\tau_{\text{под}}}{4} - \frac{\tau_{\text{ост}}}{2} \right), \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (4.11)$$

13. Выбирается станция прогрева или определяется возможность применения имеющейся по критериям

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}}, I_{\text{ном}} \geq I_{\text{расч}},$$

где $P_{\text{ном}}$, кВт · А, и $I_{\text{ном}}$, А – соответственно мощность станции прогрева (понижающего трансформатора) и обеспечиваемая ей сила тока. Они должны быть не менее требуемой расчетной мощности $P_{\text{расч}}$, кВт · А, и силы тока $I_{\text{расч}}$, А, для прогрева бетона захватки объемом $V_{\text{б}}$, м³.

Расчетная мощность определяется по формуле

$$P_{\text{расч}} = \frac{P_{\text{под}} \cdot V_{\text{б}}}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot K_{\text{перегр}}}, \text{ кВт} \cdot \text{А}, \quad (4.12)$$

где $P_{\text{под}}$ – мощность, затрачиваемая при подъеме температуры, кВт/м³, рассчитанная по формуле (4.9);

$V_{\text{б}}$ – объем бетона захватки, м³;

$\eta \cdot \cos \varphi$ – коэффициент потерь мощности, принимаемый равным 0,9;

$K_{\text{перегр}}$ – коэффициент кратковременной перегрузки, принимаемый в расчетах равным 1; допускается принимать $K_{\text{перегр}} = 1,05-1,5$, если пиковые нагрузки не превышают 15 мин за 6 ч работы станции (трансформатора).

По формуле (4.12) можно посчитать объем бетона захватки, который может быть подключен к станции (трансформатору) с известной $P_{\text{ном}}$, кВт · А, подставив ее величину вместо $P_{\text{расч}}$.

Расчетное значение требуемой силы тока на прогрев бетона захватки объемом V_6 , м³, определяют по формуле

$$I_{\text{расч}} = \frac{1000P_{\text{под}} \cdot K \cdot V_6}{U}, \text{ А,}$$

где $P_{\text{под}}$ – мощность, затрачиваемая при подъеме температуры, кВт/м³ (по формуле (4.9));

K – коэффициент, учитывающий изменение электрического сопротивления бетона при прогреве. Для бетона без добавок может быть принят $K = 1-0,5$. В расчете рекомендуется принимать $K = 1$, а в случае применения противоморозных добавок и ускорителей твердения (сильных электролитов) $K = 1,2$;

V_6 – объем бетона захватки, м³;

U – напряжение на электродах, В.

Практическая работа № 5

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ОБОГРЕВА БЕТОНА ГРЕЮЩИМИ ПРОВОДАМИ

Общие положения

Сущность обогрева бетона токоизолированными греющими (нагревательными) проводами заключается в том, что при прохождении по ним электрического тока провода разогреваются и от них, благодаря теплопроводности, разогревается бетон.

С целью повышения теплоотдачи греющие провода располагают внутри бетона, в основном в его периферийных слоях (особенно при прогреве массивных конструкций), в виде плоского или объемного змеевика с расстоянием между ветвями провода (шагом) в 50–150 мм. При прогреве стыков сборных конструкций шаг составляет примерно 25–70 мм, а при устройстве подготовок под основания и бетонных оснований 150–200 мм; рекомендуемое расстояние до палубы опалубки 30–50 мм.

В качестве греющих или нагревательных в основном используют провода с жилой из стальной оцинкованной проволоки диаметром 1,1–3 мм, покрытой слоем изоляции.

Термоустойчивость последней ограничивает допустимую температуру разогрева провода и соответственно температуру обогрева бетона (табл. 5.1).

Обогрев бетона осуществляют в диапазоне напряжения тока $U \sim 24\text{--}121$ В. При заземлении арматуры железобетонных конструкций допускается использовать ток под напряжением 220 В, а при обогреве бетонных – 220 и 380 В.

В железобетонных конструкциях провод крепят к арматуре, обычно с наружной стороны каркасов, но всегда в зонах с наименьшим риском возможного нарушения токоизоляции провода при укладке и уплотнении бетона. Если существует опасность перегрева провода и возможного оплавления изоляции (при превышении расчетной температуры нагрева провода), ее дополнительно усиливают токоизолирующими прокладками (кембриком, трубками и пр.) в местах крепления к арматуре и касания металлических частей опалубки.

Технические характеристики греющих
(нагревательных) проводов

Марка	Технические условия или ГОСТ на изготовление	Количество и номинальный диаметр жилы, мм	Материал жилы	Материал изоляции	Номинальный диаметр провода, мм	Максимальная рабочая температура на воздухе при 20 °С	Электрическое сопротивление жилы при 20 °С, Ом/м
ПОСХВ	ТУ 16-505. 524-73	1 × 1,1	Сталь	Поливинилхлоридный пластикат (ПВХ)	2,9	80	0,145
ПОСХП ПОСХВТ		1 × 1,1 1 × 1,4	Сталь Сталь	Полиэтилен Модифицированный полиэтилен	3,4 2,3	60 105	0,145 0,100
ПНВСВ	ТУ 16-705. 526-83	1 × 1,2	Сталь	ПВХ, лавсановая или фторопластовая лента, металлическая оплетка, трубка ПВХ	5,8	80	0,140
ПНСВ	ТУ 16.К71-013-88	1 × 1,2	Сталь	Поливинилхлоридный пластикат (ПВХ) или пропилен	2,8	80	0,140

Обогрев бетона греющими проводами используют при возведении (устройстве) разнообразных бетонных и железобетонных строительных конструкций. Способ наиболее эффективен при высокой степени (коэффициенте) армирования, сложной конфигурации и высоком модуле (от 20) поверхности конструкций и обогреве бетона стыков сборных элементов.

Расчет режима обогрева бетона, длины и шага размещения проводов

1. Определяется распалубочная прочность бетона, которая должна быть не ниже критической прочности бетона по действующим нормативам и не ниже ее значения, требуемого по проектно-технической документации производства работ.

Дальнейший расчет режима обогрева бетона осуществляется с учетом следующих особенностей.

Для обогрева бетона греющими проводами марки ПОСХП (материал изоляции – полиэтилен) допускаемая температура соответствует 60 °С, рекомендуемая – до 50 °С, для других марок проводов по табл. 5.1 – до 80 °С.

Так как обогрев бетона греющими проводами инициирует миграцию влаги в объеме бетона и ее испарение, рекомендуемые значения температуры принимаются:

– до 40 °С – для конструкций со значительными площадями неопалубленных поверхностей (полы, перекрытия и т. п.) при наличии повышенных требований к бетону по эксплуатационным характеристикам (морозостойкости, водонепроницаемости, водопоглощению, истираемости и др.), а также при обогреве периферийных слоев бетона массивных конструкций;

– до 50 °С – для разнообразных балок, ригелей, прогонов и т. п.;

– до 60 °С – для колонн, стоек, опор и т. п.;

– до 70 °С – для стеновых конструкций и т. п.

2. Определяется удельная электрическая мощность нагревателей $P_{уд}$, Вт, которая обеспечит требуемую (максимальную) мощность на подъеме температуры бетона $P_{уд}$, Вт:

$$P_{уд} = \frac{P_{под}}{F}, \text{ Вт/м}^2,$$

где $P_{\text{под}}$ – мощность, требуемая на подъеме температуры, Вт (по формуле (4.9));

F – площадь обогрева, м^2 , которую определяют как суммарную площадь наружных поверхностей конструкции, в плоскости которых располагают греющие провода; при однорядном расположении витков провода (плоские тонкостенные конструкции) это площадь сечения конструкции, в плоскости которой они расположены.

3. Определяется расчетное расстояние b между витками провода (шаг витков):

$$b = 1 / \left(\frac{P_{\text{уд}}}{P} + 1 \right), \text{ м}, \quad (5.1)$$

где P – оптимальная линейная (погонная) электрическая нагрузка на провод, Вт/м; в расчетах ее назначают не более 35 Вт/м для железобетонных конструкций и не более 40 Вт/м для неармируемых конструкций, с учетом данных табл. 5.2 и допустимой температуры нагрева провода по п. 1.

Таблица 5.2

Максимальная установившаяся температура, °С	Погонная нагрузка на провод, Вт/м
50	10
65	15
75	20
85	25
92	30
98	35
103	40
112	50
123	60

В расчетах рекомендуется принимать погонную нагрузку на провод в 10–15 Вт/м при температуре прогрева бетона до 40 °С; 20–25 Вт/м – для $t_{\text{п}} \sim 50\text{--}60$ °С; 30–35 Вт/м – для $t_{\text{п}} \sim 70$ °С.

4. Определяется рекомендуемая длина отдельного нагревателя l :

$$l = \sqrt{\frac{U^2}{P \cdot R_t}}, \text{ м,} \quad (5.2)$$

где U – рабочее напряжение тока при обогреве, назначаемое в пределах 24–121 В (рекомендуемое в расчетах 60–85 В);

P – оптимальная погонная нагрузка, Вт/м;

R_t – сопротивление жилы, Ом/м, нагретой (за счет прохождения тока) до установившейся (рабочей) температуры t , °С, которое может быть принято по табл. 5.3 или определено по формуле

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot t), \text{ Ом/м,}$$

где R_0 – сопротивление жилы при нормальной температуре ($t = 20$ °С), Ом/м;

α – температурный режим сопротивления, для стальной жилы равный $0,0046$ °С⁻¹.

Значения сопротивления нагретой жилы в зависимости от принятого в расчете (или имеющегося в наличии) диаметра провода (сечения) и величины погонной электрической нагрузки приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Диаметр токонесущей стальной жилы, мм	Электрическое сопротивление токонесущей жилы R_t , Ом/м, при погонной нагрузке на провод, Вт/м								R_0 при $t = 20$ °С, Ом/м
	10	15	20	25	30	35	40	50	
0,6	0,682	0,734	0,776	0,827	0,870	0,940	0,977	1,017	0,550
1,1	0,180	0,192	0,206	0,218	0,229	0,248	0,257	0,268	0,145
1,2	0,170	0,181	0,194	0,210	0,222	0,235	0,240	0,259	0,140
1,4	0,124	0,134	0,141	0,146	0,158	0,166	0,177	0,185	0,100
1,8	0,088	0,094	0,099	0,108	0,111	0,120	0,124	0,130	0,070
2,0	0,059	0,064	0,068	0,072	0,076	0,082	0,085	0,089	0,048
3,0	0,032	0,034	0,035	0,036	0,037	0,0375	0,038	0,039	0,021
4,0	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,021	0,022	0,012

5. Определяется общая длина греющего провода при шаге витков « b » с учетом геометрических размеров конструкции в плоскостях расположения проводов, схемы их расположения и подключения к питающей сети.

При этом учитывается, что рекомендуемое расстояние от провода до поверхности бетона (заглубление) составляет 30–50 мм; необходимая длина выводов для подключения отдельных нагревателей к сети – не менее 150 мм.

По значению общей длины греющего провода и длине отдельного нагревателя определяют количество нагревателей, подключаемых к питающей сети.

При необходимости по зависимостям (5.1) и (5.2) и известным I , b и U подбирают провод с соответствующим диаметром жилы.

б. Требуемая мощность для поддержания температуры при изотермическом прогреве бетона определяется по формуле (4.10), а затем по формуле (4.11) рассчитываются затраты электрической энергии на прогрев бетона захватки объемом V_6 , м³, по установленному режиму (времени) подъема температуры и изотермической выдержки.

Практическая работа № 6

РАСЧЕТ РЕЖИМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВА БЕТОННОЙ СМЕСИ

Общие сведения

Сущность способа заключается в быстром разогреве бетонной смеси вне опалубки путем пропускания через нее электрического тока. Предварительный электроразогрев бетонной смеси рационален в сочетании с ведением бетонных работ по методу термоса и наиболее эффективен для бетонирования конструкций с модулем поверхности до $M_n \leq 12 \text{ м}^{-1}$. При больших модулях поверхности конструкций целесообразно сочетание предварительного разогрева бетонной смеси с прогревом бетона иными методами, например, индукционным или инфракрасным.

Продолжительность форсированного электроразогрева бетонной смеси до заданного уровня температуры определяется наличием электрических мощностей, темпом бетонирования, интенсивностью потерь подвижности смеси и другими факторами и должна находиться в пределах 5–20 мин при большем значении для бетонной смеси с крупностью зерна заполнителя свыше 40 мм. При разогреве в течение времени менее 5 мин значительно возрастает требуемая электрическая мощность и наблюдается отставание нагрева крупного заполнителя, а разогрев в течение времени, превышающего 20 мин, может привести к ускоренной потере формуемости смеси.

Максимальная температура разогрева бетонной смеси назначается в зависимости от вида и минералогического состава применяемого цемента, требуемых сроков достижения заданной прочности, интенсивности потерь формуемости смеси и ряда других факторов. Как правило, разогрев бетонной смеси до температуры более 40–45 °С практикуется редко.

Разогретая бетонная смесь быстро теряет свои формовочные свойства. Поэтому транспортировать ее к месту укладки целесообразно по возможности без перегрузок в промежуточные емкости, а укладку в опалубку производить немедленно, в минимально короткие сроки. Время от момента окончания разогрева до окончания виброуплотнения, как правило, не должно превышать 15 мин.

Обеспечение в течение заданного срока требуемых формовочных свойств разогретой смеси может быть достигнуто введением при приготовлении бетонной смеси пластифицирующих или замедляющих схватывание добавок.

Разогретую бетонную смесь укладывают в конструкцию (подготовленную опалубку) и уплотняют обычными способами. Сразу после уплотнения неопалубленную поверхность бетона укрывают влаго- и теплоизолирующим покрытием расчетной толщины, обеспечивающей последующее остывание монолитной конструкции по заданному температурному режиму.

Электрооборудование для разогрева бетонной смеси

Предварительный электроразогрев бетонной смеси осуществляют вблизи места ее укладки на специально оборудованном для этого посту в поворотных бункерах, опрокидных бадьях, оснащенных пластинчатыми электродами, или непосредственно в кузовах автосамосвалов с помощью системы пластинчатых электродов.

Бункер (бадья) для электроразогрева состоит из корпуса, выполненного, как правило, из листовой стали толщиной не менее 4 мм, трех–шести пластинчатых электродов, токоподключающего устройства и затвора выгрузочного отверстия.

Поворотный бункер (бадья) для электроразогрева должен быть оборудован вибратором.

Установка с опускаемыми электродами для электроразогрева бетонной смеси непосредственно в кузовах автосамосвалов представляет собой раму со смонтированными на ней электроизолированными пластинчатыми электродами, имеющими форму, соответствующую конфигурации кузова. Подъем и опускание рамы с электродами осуществляется электроталью или любым другим подъемным механизмом.

Для обеспечения погружения электродов в бетонную смесь и их извлечения на раме смонтирован вибратор.

Электроды следует выполнять с закругленными углами. Чтобы предотвратить повышенную плотность тока на кромках электродов, днище бункера рекомендуется изолировать листовой резиной (в этом случае расстояние между днищем и электродами должно составлять 0,6 расстояния между электродами).

Крепление электродов к корпусу бункера осуществляется болтами на изоляторах из текстолита или другого электроизоляционного материала.

Подключение электродов к источнику электрического тока осуществляется кабелями с помощью быстродействующих контактных устройств – конусно-штепсельного разъема, ножевого устройства и др.

Пост электроразогрева представляет собой площадку с деревянным настилом и сетчатым, желательнo инвентарным, ограждением, оборудованным силовым трансформатором соответствующей мощности и пультом управления. Пульт управления размещается вне ограждения, а ворота для въезда самосвалов и калитка в ограждении для прохода обслуживающего персонала должны быть заблокированы системой сигнализации и подачи напряжения на электроды.

Для непрерывной работы автотранспорта, бесперебойной подачи разогретой смеси в опалубку и максимального использования электрооборудования во времени пост электроразогрева целесообразно устраивать из двух ячеек, подключенных к одному пульту управления и работающих поочередно, причем каждая ячейка должна быть рассчитана на прием бетонной смеси из одного самосвала.

Расчет электрических и конструктивных параметров установок для электроразогрева бетонных смесей

Необходимая электрическая мощность для разогрева бетонной смеси определяется теплотехническим расчетом по формуле

$$P = \frac{C \cdot \rho (t_p - t_{тр}) \cdot 1,16K \cdot 60V_б}{10^3 \cdot 4,18K_{эп} \tau_p}, \text{ кВт},$$

где C – удельная теплоемкость бетонной смеси, кДж/кг, принимается равной 1,05 кДж/кг·°С;

ρ – объемная масса бетонной смеси, кг/м³;

t_p – конечная температура разогрева бетонной смеси, °С;

$t_{тр}$ – температура после транспортирования бетонной смеси (в расчетах соответствует значению $t_{б,н}$ формулы (2.1)), °С;

K – коэффициент, учитывающий потери тепла в процессе разогрева (принимается равным 1,1);

V_6 – объем одновременно разогреваемой порции бетонной смеси, м³;
 $K_{зр}$ – коэффициент использования электроэнергии при разогреве, равный 0,9;

τ_p – время разогрева бетонной смеси, мин.

Расстояние (при необходимости) B между электродами рассчитывается по формуле

$$B = 31,62 \cdot 10^{-3} U \sqrt{\frac{V_6}{R_{6c} \cdot P_{max}}}, \text{ м,}$$

где U – напряжение на электродах, В;

R_{6c} – расчетное удельное сопротивление бетонной смеси, Ом·м, принимаемое для тяжелого бетона 8 Ом·м, для легкого 10 Ом·м.

При заземленном стальном корпусе («смешанная» схема подключения) расстояние от стенки бункера или кузова (автосамосвала) до крайнего электрода B_0 принимается равным $B/\sqrt{3}$, а расстояние от нижней кромки электрода до дна разогревательного устройства составляет 0,52 В.

Далее, варьируя продолжительностью разогрева смеси в пределах, указанных в параграфе 6.1, и напряжением на электродах 380 или 220 В, можно подобрать такое расстояние между электродами, которое обеспечивает размещение по ширине разогревательного устройства количества электродов, необходимого для равномерной загрузки фаз трансформатора.

Зная расстояние между электродами, определяют площадь одного электрода:

$$S > \frac{V_6^2}{nB}, \text{ м}^2,$$

где n – количество электродов, подбираемое с учетом равномерной загрузки всех фаз трансформатора и конструктивных размеров емкости для разогрева (как правило, $n = 3$ или кратно 3).

Площадь электрода по конструктивным соображениям принимается больше расчетной, чтобы вся смесь с учетом угла естественного откоса находилась между электродами.

Размеры электродов вычисляются по формулам

$$H_{\text{эл}} = H - h_{\text{н}} - h_{\text{в}}, \text{ м},$$

$$l_{\text{эл}} = S/h_{\text{эл}}, \text{ м},$$

где H – высота бункера или кузова автосамосвала, м;

$h_{\text{н}}$ – расстояние от нижней кромки электрода до дна устройства, м;

$h_{\text{в}}$ – расстояние от верхней кромки электрода до свободной поверхности бетонной смеси, м (принимается в пределах 0–0,025).

Максимальная электрическая мощность для разогрева бетонной смеси определяется по формуле

$$P_{\text{max}} = \frac{10^{-3} U^2 V_6}{B^2 R_{\text{min}}}, \text{ кВт},$$

где R_{min} – минимальное удельное омическое сопротивление бетонной смеси в процессе разогрева, Ом·м, принимаемое для смеси на плотных заполнителях равным 4,0 Ом·м и на пористых – 5,0 Ом·м, а в случае применения добавок ускорителей твердения и противоморозных (электролитов) соответственно для тяжелого бетона – 2,0 Ом·м, легкого – 2,5 Ом·м.

По величине P_{max} определяется расчетная мощность требуемого трансформатора:

$$P_{\text{расч}} = \frac{P_{\text{max}}}{\eta \cos \varphi K_{\text{к.п}}}, \text{ кВт},$$

где η и $\cos \varphi$ – соответственно КПД и коэффициент мощности трансформатора (обычно $\eta \cos \varphi = 0,9$);

$K_{\text{к.п}}$ – коэффициент кратковременной допустимой перегрузки трансформатора (принимается 1,3–1,5).

Выбор типа трансформатора производится по расчетной мощности с соблюдением условия

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}},$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная (паспортная) мощность выбранного трансформатора, кВт.

Максимальная сила тока для выбора типа и сечения подводящих кабелей определяется по формуле

$$I_{\text{л}} = \frac{UV_{\text{б}}}{\sqrt{3R_{\text{мин}}B^2}}, \text{ А.}$$

Затраты электрической энергии на разогрев порции бетонной смеси объемом $V_{\text{б}}, \text{ м}^3$, определяются по формуле

$$P_{\text{н.р}} = \frac{0,001 \text{ К} \cdot U^2 \cdot V_{\text{б}} \tau_{\text{раз}}}{R_{\text{б.с}} \cdot B^2 \cdot 60}, \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где К – поправочный коэффициент, зависящий от разницы температур после и до разогрева бетонной смеси, доли. ед., принимаемый по табл. 6.1;

U – напряжение тока (380 или 220 В);

$V_{\text{б}}$ – объем разогреваемого бетона, м^3 ;

$\tau_{\text{раз}}$ – время разогрева, мин (5–15 мин), при меньшем значении для бетона с крупностью зерна заполнителей – до 10 мм, большем – до 40 мм;

$R_{\text{б.с}}$ – усредненное (расчетное) омическое сопротивление бетонной смеси, принимаемое для тяжелого бетона: $R_{\text{тяж.б.с}} = 8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; для легкого бетона $R_{\text{лег.б.с}} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

B – расстояние между электродами, м.

Таблица 6.1

Разница температур смеси, °С	30	40	50	60	70	80
Значение К	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85	1,0

Примечание. Промежуточные значения определяют интерполяцией.

Литература

1. Хаютин, Ю. Г. Монолитный бетон / Ю. Г. Хаютин. – М. : Стройиздат, 1991 – 573 с.
2. Технология и методы зимнего монолитного бетонирования : учебное пособие / Э. И. Батяновский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2005. – 238 с.
3. Справочник строителя. Бетонные и железобетонные работы / ред. В. Д. Топчия. – М. : Стройиздат, 1987. – 316 с.
4. Зимнее бетонирование и тепловая обработка бетона / С. А. Мионов [и др.]. – М. : Стройиздат, 1975. – 248 с.
5. Совалов, И.Г. Бетонные и железобетонные работы / И. Г. Совалов, Я. Г. Могилевский, В. И. Остромогольский. – М. : Стройиздат, 1988. – 335 с.
6. Евдокимов, Н. И. Технология монолитного бетона и железобетона / Н. И. Евдокимов, А. Ф. Мацкевич, В. С. Сытник. – М. : Высшая школа, 1980. – 334 с.
7. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1982. – 213 с.

Содержание

Введение.....	3
Практическая работа № 1. Расчет опалубки по критериям прочности, жесткости и на опрокидывание.....	4
Практическая работа № 2. Расчет температурного режима транспортирования и укладки бетонной смеси в зимний период.....	9
Практическая работа № 3. Расчет температурного режима твердения бетона по методу горячего термоса.....	19
Практическая работа № 4. Расчет параметров режима электродного прогрева бетона.....	33
Практическая работа № 5. Расчет параметров режима обогрева бетона греющими проводами.....	49
Практическая работа № 6. Расчет режима предварительного электроразогрева бетонной смеси.....	55
Литература.....	61

Учебное издание

БАТЯНОВСКИЙ Эдуард Иванович
БУСЕЛ Алексей Владимирович
БОНДАРОВИЧ Александр Иванович
РЯБЧИКОВ Павел Владимирович

**ТЕХНОЛОГИЯ МОНОЛИТНОГО
И ПРИОБЪЕКТНОГО БЕТОНИРОВАНИЯ**

Пособие к практическим работам для студентов
специальности 1-70 01 01
«Производство строительных изделий
и конструкций»

Редактор *Т. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 26.06.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,66. Уч.-изд. л. 2,86. Тираж 150. Заказ 571.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.