Федеральное агентство по образованию
Братский государственный университет
Кафедра «Технологии и организация строительного производства»

М.А. Садович

МЕТОДЫ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Учебное пособие

Братск 2009

УДК 69.05

Методы зимнего бетонирования: учебное пособие / М.А. Садович. – Изд.2-е, перераб. и доп. - Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 104 с.

Учебное пособие составлено по разделу «Бетонные работы в зимнее время» дисциплин «Технология строительных процессов» и «Строительство зданий из монолитного бетона».

Рассмотрены методы зимнего бетонирования, апробированные в условиях Севера. Большое внимание уделено методикам и конкретным примерам расчёта режимов твердения , набора прочности и температурного поля конструкций.

Пособие может быть использовано при проектировании технологий зимнего бетонирования на стадии ППР, в практической деятельности строительных организаций, при проведении научно-исследовательских работ.

Рецензенты: **А.И. Гныря**, д-р техн. наук;
А.И. Кудяков, д-р техн. наук
(Томский гос. архит.-строит. ун-т)

© Садович М.А., 2009
© ГОУ ВПО «БрГУ», 2009

ВВЕДЕНИЕ

Методы зимнего бетонирования появились в связи с необходимостью обеспечения твердения обычных цементных бетонов в условиях отрицательных температур наружного воздуха, при которых без специальных мероприятий замедляется или полностью прекращается процесс твердения бетона.

Переход к зимнему бетонированию обычно осуществляется при среднесуточной температуре наружного воздуха ниже +5 ^{0}С и минимальной ниже 0 ^{0}С. Это позволяет с определенным запасом предохранить свежеуложенный бетон от замораживания и обеспечить выполнение проектных требований к бетону в части прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и других предусмотренных проектом параметров.

Существующие методы зимнего бетонирования можно подразделить на три условные группы.

К первой группе относится метод термоса, сущность которого заключается в сохранении (за счёт теплоизоляции конструкции) тепла, полученного бетонной смесью в процессе ее приготовления и дополнительного разогрева, если таковой имеет место, в сочетании с экзотермическим тепловыделением цемента.

Вторая группа объединяет разнообразные методы обогрева бетона.

К третьей группе относятся безобогревные методы зимнего бетонирования, когда в бетонную смесь вводятся противоморозные химические добавки, понижающие температуру замерзания жидкой фазы и обеспечивающие твердение бетона при отрицательных температурах.

В практике строительства могут применяться как отдельные, так и комбинированные методы в зависимости от условий строительной площадки, возможностей производителя работ, требуемых темпов бетонирования и др.

В настоящем пособии подробно рассмотрены обогревные методы зимнего бетонирования (электротермообработка бетона с использованием электродного прогрева и нагревательного изолированного провода), метод термоса и безобогревные методы, в частности использование противоморозных химических добавок.

На примере строительных площадок Братскгэсстроя, расположенных в экстремальных климатических зонах, рассмотрено применение методов зимнего бетонирования, намечены перспективные направления их развития и очерчены области наиболее рационального использования в суровых условиях Севера.

1. ЭЛЕКТРОТЕРМООБРАБОТКА БЕТОНА

Электротермообработка бетона объединяет группу методов, основанных на использовании тепла, получаемого от превращения электрической энергии в тепловую. Это может происходить при пропускании тока непосредственно через бетон, путём контакта с ним нагревательных устройств, конвективно или радиационно. К электротермообработке бетона также относится индукционный метод прогрева (нагрев в электромагнитном поле).

В свою очередь контактная электротермообработка бетона может быть классифицирована как внутренняя (нагревательный провод внутри бетона) и внешняя (термоактивная опалубка).

Необходимо отметить, что индукционный прогрев может также рассматриваться как контактный, когда стальная опалубка и арматура конструкции нагреваются вихревыми токами, возникающими в переменном электромагнитном поле. В данном случае имеет место как внутренний, так и внешний приток тепла.

Конвективный прогрев забетонированных конструкций предполагает теплообмен между нагреваемой воздушной средой и бетоном конструкции. Использование для этих целей электрокалориферов возможно, но возникающая проблема пересушки бетона ограничивает применимость данных устройств. Гораздо чаще применяются более безопасные парокалориферы.

Радиационный прогрев с использованием инфракрасных нагревателей направленного действия создаёт примерно те же проблемы высыхания поверхности твердеющего бетона и неравномерного нагрева, однако при наличии мероприятий по защите бетона от пересушки этот метод может применяться не только в зимний, но и в весенне-осенний периоды для ускорения нарастания прочности бетона.

Электротермообработка должна обеспечить получение бетонов с заданными физико-механическими свойствами (прочностью на сжатие и растяжение при изгибе, морозостойкостью, сцеплением с арматурой и др.), существенно не отличающимися от свойств бетона, твердеющего в нормальных условиях.

Требуемое качество и долговечность бетона в конструкциях, подвергаемых электротермообработке, в значительной степени обусловливается предотвращением больших влагопотерь, которые могут иметь место при неправильно выбранных режимах прогрева

и отсутствии пароизоляционных покрытий на неопалубленных поверхностях.

Электротермообработку бетона необходимо осуществлять таким образом, чтобы исключить или максимально снизить возможность развития в нём деструктивных процессов и обеспечить формирование благоприятного термонапряжённого состояния конструкций.

1.1. Требуемая мощность для электротермообработки бетона

Параметры электротермообработки бетона зависят от количества тепла, необходимого для разогрева бетона и опалубки, восполнения потерь в окружающую среду. В то же время следует учитывать тепло, выделяемое в бетоне при твердении цемента.

При расчете необходимой мощности в процессе электротермообработки устанавливается количество тепла (эквивалентное электрической мощности), необходимое на периоды разогрева и изотермического прогрева бетона.

Удельная мощность, необходимая для прогрева 1 м^3 бетона в период разогрева P_n, определяется по формуле

$$P_n = P_1 + P_2 + P_3 - P_4 = \frac{C_1 \cdot \gamma_1 \cdot (t_1 - t_3)}{3600 \cdot \tau_1} + \frac{\Sigma C_i \cdot \gamma_i \cdot \delta_i \cdot M_n}{3600 \cdot \tau_1} \cdot \frac{t_1 - t_3}{2} +$$

$$+ \frac{k \cdot M_1 \cdot (t_1 + t_3 - 2 \cdot t_4)}{1000 \cdot 2} - \frac{q \cdot Ц}{3600 \cdot \tau_1}, \qquad (1)$$

где P_1 – мощность электрическая, необходимая для разогрева бетона, кВт/м^3; P_2 – мощность электрическая, необходимая для нагрева опалубки, кВт/м^3; P_3 – мощность электрическая, расходуемая на восполнение теплопотерь в окружающую среду в процессе разогрева бетона, кВт/м^3; P_4 – мощность электрическая, эквивалентная экзотермическому теплу, кВт/м^3; C_1 – удельная теплоёмкость бетона, кДж / кг · град; C_i – удельная теплоёмкость материала опалубки, кДж / кг · град; γ_1 – объёмная масса бетона, кг/м^3; γ_i – объёмная масса материала опалубки, кг/м^3; δ_i – толщина материала опалубки, м; t_1 – установившаяся температура бетона после разогрева, температура изотермического прогрева, ^{0}C; t_3 – температура бетонной смеси при укладке перед началом прогрева, ^{0}C; t_4 – температура наружного воздуха, ^{0}C; $M_п$ – модуль опалубочной поверхности кон-

струкции, $м^{-1}$; M_1 – модуль охлаждаемой поверхности конструкции, $м^{-1}$; τ_1 – продолжительность подъёма температуры от t_3 до t_1, ч; k – коэффициент теплопередачи опалубки, $Вт/м^2 \cdot {}^oC$; 3600 – электрический эквивалент тепла, (1 кВт · ч = 3600 кДж); q – тепловыделение на 1 кг цемента за время разогрева, кДж/кг; Ц – расход цемента на 1 $м^3$ бетона, $кг/м^3$.

Пример определения модуля поверхности и физические константы приведены в прил. 1, 2.

Формула (1) справедлива при следующих допущениях:

– при расчёте теплопотерь через охлаждаемую поверхность предполагается, что коэффициент теплопередачи через утеплитель горизонтальных неопалубленных поверхностей равен таковому через опалубку;

– теплопотери в основании фундаментных конструкций не учитываются, если оно имеет положительные температуры (не проморожено).

Удельная мощность, необходимая для поддержания температуры в течение изотермического прогрева, равна

$$P_{из} = \frac{KM_1(t_1 - t_4)}{1000} - \frac{q \cdot Ц}{3600 \cdot \tau_2}, \qquad (2)$$

где q – тепловыделение цемента за время изотермического прогрева, кДж/кг; τ_2 – продолжительность изотермического прогрева, ч.

Учёт тепловыделения цемента следует проводить с использованием данных табл. 1.1.

В качестве примера в табл. 1.2 и 1.3 приведены удельные мощности, требующиеся для разогрева и изотермического прогрева обычного бетона в деревянной опалубке толщиной 40 мм [18].

Удельный расход электроэнергии для прогрева бетона определяется по формуле:

в период разогрева

$$W = P_п \cdot \tau_1,$$

в период изотермического прогрева

$$W = P_{из} \cdot \tau_2,$$

где τ_1 – продолжительность разогрева бетона до температуры изотермического прогрева при t_1, ч; τ_2 – продолжительность изотермического прогрева при t_1, ч.

Таблица 1.1

Тепловыделение цемента в зависимости от температуры и времени твердения [18]

Вид и марка цемента	Температура, ^{0}C	Тепловыделение цементов, кДж/кг, при времени их твердения, сут.					
		0,25	0,5	1	2	3	7
Портландцемент 400	5	-	-	29,3	62,9	108,9	188,4
	10	12,6	25,2	50,3	104,8	146,7	209,5
	20	41,9	66,9	104,8	167,6	209,5	272,4
	40	83,7	133,9	188,6	230,5	272,4	314,3
	60	129,8	188,4	230,5	272,4	314,3	335,2
Портландцемент 500	5	12,6	25,2	41,9	88,8	125,7	188,6
	10	25,2	41,9	62,9	104,8	167,6	251,4
	20	41,9	83,8	125,7	188,6	251,4	293,3
	40	104,8	167,6	209,5	272,4	293,3	356,2
	60	188,6	230,5	272,4	314,3	356,2	377,1

Таблица 1.2

Удельная мощность, необходимая в период разогрева бетона, кВт/м^3
(опалубка деревянная с толщиной стенок 40 мм)

Температура воздуха, ^{0}C	Скорость подъёма температуры, ^{0}C/ч	Мощность при прогреве конструкций с модулем поверхности, м$^{-1}$								
		5			10			15		
		Температура изотермического прогрева, ^{0}C								
		40	60	80	40	60	80	40	60	80
- 10	5	3,5	3,7	3,8	4,0	4,3	4,6	4,7	5,1	5,6
	10	6,4	7,4	7,6	8,0	8,3	8,6	8,9	9,3	9,7
- 20	5	3,7	3,8	4,0	4,3	4,6	4,9	5,1	5,5	6,0
	10	7,4	7,6	7,8	8,3	8,6	8,7	9,3	9,7	10,1
- 30	5	3,8	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1	5,5	6,0	6,4
	10	7,6	7,8	7,9	8,6	8,8	9,1	9,7	10,1	10,6

Таблица 1.3

Удельная мощность, необходимая на период изотермического прогрева бетона, кВт/м^3
(опалубка деревянная с толщиной стенок 40 мм)

Температура воздуха, ^{o}C	Мощность при прогреве конструкций с модулем поверхности, м$^{-1}$								
	5			10			15		
	Температура изотермического прогрева, ^{o} C								
	40	60	80	40	60	80	40	60	80
- 10	0,8	1,1	1,4	1,4	1,9	2,4	2,0	2,3	3,6
- 20	1,0	1,3	1,6	1,7	2,1	2,7	2,4	3,2	4,0
- 30	1,1	1,4	1,8	2,0	2,4	2,9	2,8	3,6	4,4

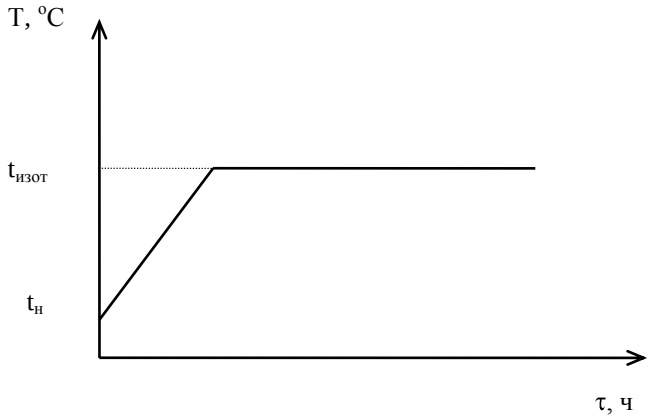
1.2. Режимы электротермообработки

Режим электротермообработки выбирают с учетом обеспечения требуемой прочности бетона в зависимости от вида и активности цемента, состава бетона, типа прогреваемой конструкции и других факторов.

Для снижения расхода электроэнергии необходимо стремиться к получению требуемой прочности бетона в наиболее короткие сроки прогрева. С этой целью следует использовать максимально допустимые температуры, быстротвердеющие цементы; сокращать длительность активного прогрева, учитывая нарастание прочности бетона при остывании; а также применять другие способы ускорения твердения бетона.

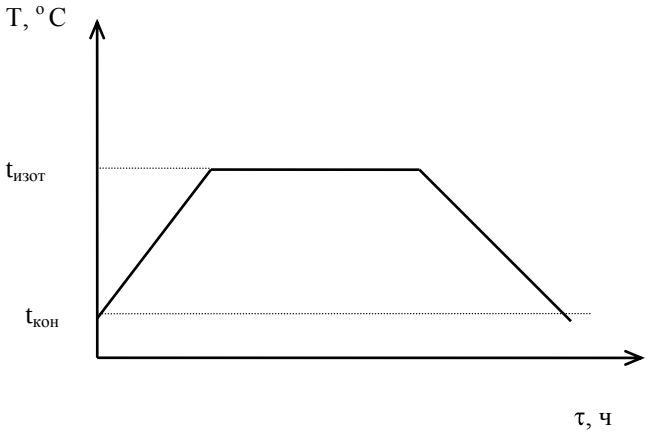
В зависимости от ряда факторов и применяемых способов электротермообработки прогрев может производиться по различным режимам.

Подъём температуры и изотермическое выдерживание. Требуемая прочность бетона при таком режиме должна быть достигнута к моменту окончания изотермического прогрева, а прирост прочности за время остывания не учитывается. Этот режим рекомендуется применять при электропрогреве конструкций с модулем поверхности $M_п = 12$ и выше.

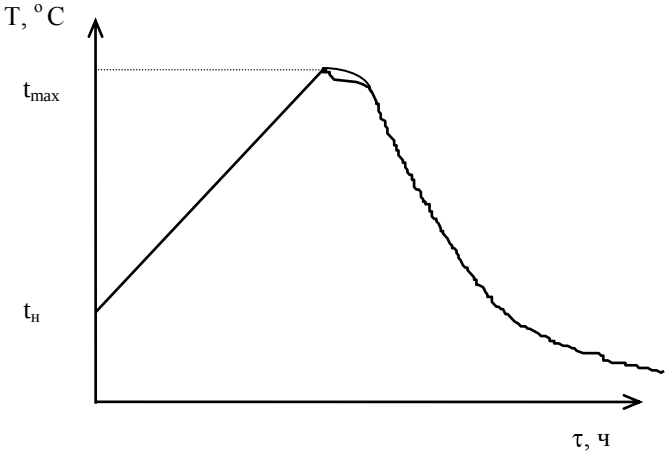


Подъём температуры, изотермический прогрев и остывание. При таком режиме необходимую прочность бетон приобретает к

концу остывания. Этот режим целесообразно применять для электропрогрева конструкций с $М_п$ = 8–11.

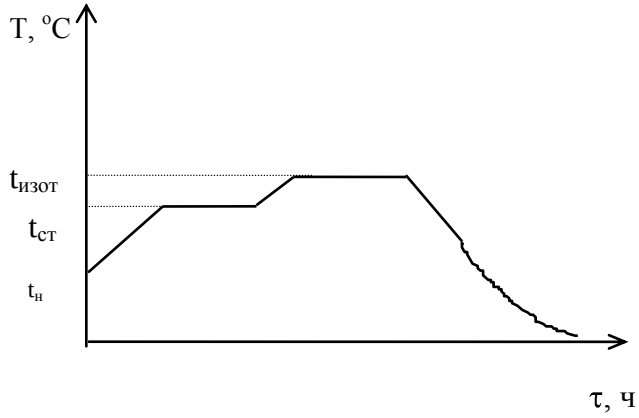


Подъём температуры и остывание. В данном случае заданная прочность обеспечивается к концу остывания. Этот режим рекомендуется применять для конструкций с $М_п$ = 3–7.



Ступенчатый режим, когда нагрев производится сначала, например, до 50 ^{0}С и поддерживается на этом уровне в течение 1–3 ч, а затем выполняется более быстрый подъём температуры до максимально допустимой для данной конструкции и выдерживание при ней до приобретения бетоном требуемой прочности. Этот режим ре-

комендуется применять при прогреве монолитных конструкций с $М_п$ = 8–15 и сборных предварительно напряженных конструкций.



В монолитных конструкциях при равномерном нагреве бетона скорость подъёма температуры не должна превышать:

• 15 ^{0}С/ч для каркасных и тонкостенных конструкций с $М_п$ = 10–12 и более, а также конструкций, возводимых в скользящей опалубке;

• 10 ^{0}С/ч для конструкций с $М_п$ = 6–9;

• 8 ^{0}С/ч для конструкций с $М_п$ = 3–5.

Изотермический прогрев должен производиться по возможности при максимально допустимой температуре, которая для монолитных конструкций назначается в соответствии с данными табл. 1.4.

Таблица 1.4

Максимально допустимые температуры электропрогрева бетона в монолитных конструкциях

Вид цемента	Марка цемента	Температура, ^{0}С, при модуле поверхности конструкции, м$^{-1}$	
		до 6	свыше 6
Портландцемент	300-400	80	90
Быстротвердеющий портландцемент	400-500	60	70

На практике достижение указанных температур по различным причинам возможно далеко не всегда, поэтому в качестве расчётной для бетонов на высокоактивных портландцементах может быть рекомендована температура изотермического прогрева 55÷60 ^{0}C.

Максимальная температура в центре (ядре) массивных конструкций с $M_п < 3$ (блоки гидротехнических сооружений, фундаменты под оборудование и др.) регулируется с помощью специальных мероприятий с целью формирования такого температурного поля, которое обеспечивало бы благоприятное термонапряженное состояние конструкции в процессе твердения.

1.3. Остывание бетона в конструкции

Поскольку от продолжительности остывания зависит прочность бетона, следует рассчитать продолжительность и среднюю температуру этого процесса.

Продолжительность остывания бетона, уложенного в опалубку, может быть рассчитана по формуле Б.Г. Скрамтаева, уточненной С.А. Мироновым [18, 19]:

$$\tau = \frac{C \cdot \gamma \cdot (t_{б.н.} - t_{б.к.}) + q Ц}{3{,}6K \cdot M_1 \cdot (t_{б.ср.} - t_{н.в.})}, \qquad (3)$$

где τ – продолжительность остывания бетона, ч; С – удельная теплоёмкость бетона, кДж/кг$\cdot^0$С; γ – объёмная масса бетона, кг/м^3; $t_{б.н.}$ – температура бетонной смеси с момента начала остывания, ^{0}С; $t_{б.к.}$ – конечная температура бетона, до которой осуществляется расчёт продолжительности остывания, ^{0}С; q – тепловыделение на 1 кг цемента за время остывания бетона, кДж/кг; Ц – расход цемента на 1 м^3 бетона, кг; К – коэффициент теплопередачи опалубки, Вт/м$^2\cdot^0$С; $M_п$ – модуль поверхности остывания конструкции, м$^{-1}$; $t_{б.ср.}$ – среднее значение температуры бетона за время остывания, ^{0}С; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха; 3,6 – переводной коэффициент (1 Вт/м$^2\cdot^0$С = 3,6 кДж/ м$^2\cdot$ ч $\cdot^0$С).

К приведённой формуле (3) необходимы пояснения. Формула выведена на основе базового понятия теплового баланса, т.е. равенства внутренней тепловой энергии бетона и рассеиваемой в процессе его равномерного остывания до конечной температуры.

Очевидно, что с точки зрения набора прочности конечной температурой остывшего бетона можно считать 0 ^{0}С, тогда формула (3) будет иметь вид

$$\tau = \frac{\text{С} \cdot \gamma \cdot t_{б.н.} + q\text{Ц}}{3{,}6\text{К} \cdot \text{М}_1 \cdot (t_{б.ср.} - t_{н.в.})} \ . \qquad (4)$$

Модуль остываемой поверхности рассчитывается по известной формуле с учётом всех остываемых поверхностей, (прил. 1). Утепления открытых неопалубленных поверхностей адекватны опалубке.

При расчёте продолжительности остывания вначале следует определить среднюю температуру бетона, поскольку она входит в формулу (4).

В простейшем случае средняя температура бетона за время остывания определяется по формуле

$$t_{\text{б.ср}} = (t_{\text{б.н}} + t_{\text{б.к}}) / 2 \ , \qquad (5)$$

которая отражает изменение температуры бетона в процессе остывания по линейной зависимости. Очевидно, что указанное допущение может привести к ошибкам. Известна эмпирическая формула для определения средней температуры с учётом массивности конструкции [5,13,18,19]:

$$t_{б.ср.} = \frac{\text{t}_{\text{б.н.}} + \text{t}_{\text{б.к.}}}{1{,}03 + 0{,}181\text{M}_{\text{п}} + 0{,}006\left(\text{t}_{\text{б.н.}} - \text{t}_{\text{б.к.}}\right)}, \qquad (6)$$

при $t_{\text{б.к}}$= 0

$$t_{б.ср.} = \frac{\text{t}_{\text{б.н}}}{1{,}03 + 0{,}181\text{M}_{\text{п}} + 0{,}006 \cdot \text{t}_{\text{б.н.}}} .$$

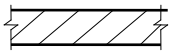
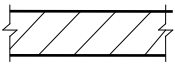
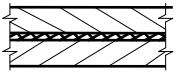
Анализ формулы (6) показывает, что по мере снижения массивности и соответствующего увеличения $\text{M}_{\text{п}}$ средняя температура остывающего бетона понижается. Это в той или иной мере соответствует физическим представлениям о процессах теплообмена, т.е. формула (6) позволяет получить уточнённую оценку.

Теплопередающие свойства опалубки в первую очередь зависят от её конструктивных особенностей, наличия утеплителя и факторов внешней среды.

Для расчётов при выполнении курсовых и дипломных проектов можно воспользоваться данными [18, 19] по коэффициенту теплопередачи для различных типов опалубки (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Коэффициенты теплопередачи опалубки различной конструкции

Тип опалубки	Конструкция опалубки	Материал опалубки	Толщина слоя, мм	Коэффициент К, Вт/м^2·^{0}С, при скорости ветра, м/с		
				0	5	15
1		Доска	25	2,44	5,2	5,98
2		Доска	40	2,03	3,6	3,94
3		Доска Толь Доска	25 - 25	1,8	3	3,25
4		Доска Пено-пласт Фанера	25 30 4	0,67	0,8	0,82

Кроме того, в табл. 1.6 приводятся теплофизические характеристики строительных и теплоизоляционных материалов, также необходимые для расчётов.

Таблица 1.6

Величины теплофизических характеристик строительных и теплоизоляционных материалов

Материал	Объёмная масса в сухом состоянии, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии λ_o, Вт/м·^{0}С	Расчётная величина коэффициента теплопроводности λ_o, Вт/м·^{0}С	Удельная теплоёмкость в сухом состоянии C_0, кДж/кг·^{0}С
Железобетон ($W_б$ = 3 %)	2500	1,68	2,03	0,84
Бетон на гравии или щебне из природного камня ($W_б$ = 3 %)	2400	1,56	1,86	0,84
Керамзитобетон $W_б$ = 10 %)	1600	0,52	0,75	0,84
	600	0,16	0,23	0,84
Плиты мягкие, полужесткие минераловатные на синтетическом связующем ($W_б$ = 5 %)	100	0,046	0,052	0,76
	175	0,051	0,06	0,76
Хвойные породы (поперек волокон) ($W_б$ = 20 %)	550	0,093	0,17	2,52
Плиты древесноволокнистые и древесностружечные ($W_б$ = 12 %)	1000	0,15	0,29	2,1
	600	0,104	0,16	
	400	0,081	0,14	
	200	0,058	0,08	
Опилки	250	0,069	0,24	-
Оргалит	300	0,064	0,16	-
Пенопласт плиточный ($W_б$ = 10 %)	75	0,041	0,044	1,26
Рубероид, пергамин кровельный, толь кровельный	600	0,17	0,17	1,47

1.4. Определение необходимой продолжительности прогрева бетона в конструкции

Основным критерием достаточной продолжительности прогрева является достижение требуемой прочности бетона, которая определяется по расчётно-экспериментальным методикам.

В свою очередь, требуемая прочность назначается в зависимости от необходимости обеспечения критической прочности до замораживания, условий загружения и эксплуатации конструкций, вида напряжённого состояния и других факторов.

К моменту замерзания бетона его критическая (минимальная) прочность должна быть не ниже 40, 30 и 20% проектной при классах соответственно В10, В15÷20, В30÷40. Выполнение указанного требования позволит обеспечить так называемую критическую прочность бетона, при которой последующее замораживание не приведёт к существенным структурным изменениям в нем и после оттаивания твердение бетона полностью восстановится.

Для конструкций, подвергающихся по окончании выдерживания замораживанию и оттаиванию, требуется 70 % проектной прочности, для преднапряжённых конструкций - 80 %, а при наличии специальных требований и соответствующих указаний в проекте – 100 %.

Предложение нормировать прочность в процентах от марочной в возрасте 28 суток (R_{28}) продолжает широко использоваться в нормативной литературе.

Соотношение между классом и средней прочностью бетона может быть установлено по формуле (7), справедливой для генеральной совокупности и нормативного коэффициента вариации:

$$\overline{R} = B / [\, 0{,}980665\,(1 - 1{,}64 \cdot 0{,}135)], \qquad (7)$$

где В – класс бетона, МПа; 0,980665 – переходной коэффициент от МПа к кгс/см^2; 1,64 – статистический коэффициент при 95 % обеспеченности; 0,135 – нормативный коэффициент вариации; R – средняя прочность, кгс/см^2.

Результаты соответствующих расчетов представлены в табл. 1.7.

Наиболее распространённым в производственных условиях способом определения прочности после прогрева является использование графических зависимостей:

$$R = f\,(t\ \tau),$$

где t – температура, ^{0}C; τ – продолжительность твердения, ч (сут.).

Таблица 1.7

Классы и марки бетона

Класс бетона	Средняя прочность бетона данного класса R, МПа (кгс/см^2)	Ближайшая марка бетона по прочности
В 10	13,1 (131,07)	М 150
В 15	19,6 (196,45)	М 200
В 20	26,2 (261,9)	М 250
В 25	32,7 (327,4)	М (300÷350)
В 30	39,3 (392,9)	М 400
В 40	52,4 (523,9)	М 500
В 50	65,5 (654,8)	М 700

Указанные зависимости для бетонов на портландцементе М «400, 500» представлены семейством изотермических кривых нарастания прочности бетона, твердеющего при положительных температурах (рис. 1 и табл. 1.8).

Таблица 1.8

Нарастание прочности бетона марок 200-300 на портландцементе марки 400 (% от R_{28})

Возраст бетона, сут	Температура бетона, ^{0}С							
	0	5	10	20	30	40	50	60
1/2	1	4	5	12	17	28	38	50
1	5	9	12	23	35	45	55	63
2	12	19	25	40	55	65	75	80
3	18	27	37	50	65	77	85	-
5	28	38	50	65	78	90	-	-
7	35	48	58	75	87	98	-	-
14	50	62	72	87	100	-	-	-
28	65	77	85	100	-	-	-	-

При выполнении курсового или дипломного проекта рассчитывается необходимая продолжительность прогрева для получения заданной прочности. При этом с целью упрощения расчёта определяется средняя температура за период разогрева и, если необходимо, остывания. В результате для расчёта прочности бетона исполь-

зуются следующие данные в соответствии с назначенным режимом обогрева по п. 1.2:

– продолжительность и средняя температура за период разогрева;

– продолжительность и температура изотермического прогрева;

– продолжительность и средняя температура за период остывания.

Определение необходимой продолжительности изотермического прогрева проводится путём подбора после того, как найдена полученная прочность за период разогрева, параметры которого вычисляются по заданным начальной температуре бетона, температуре изотермического прогрева и скорости разогрева.

Рассмотрим последовательность расчёта набора прочности на конкретном примере.

Исходные данные:

– начальная температура бетона $t_н$ = +10 ^{0}C;

– скорость разогрева $\alpha_{разогр.}$ = 10 ^{0}C/ч;

– температура изотермического прогрева $t_{из.}$ = +60 ^{0}C;

– требуемая прочность к моменту окончания прогрева 50% R_{28};

– модуль охлаждаемой поверхности $M_п$ = 8,5 м$^{-1}$.

Продолжительность периода разогрева определяется по формуле

$$\tau_{разогр.} = (t_{из} - t_{нач}) / \alpha_{разогр.} = (60\text{-}10) / 10 = 5 \text{ ч.}$$

Средняя температура за период разогрева

$$t_{сред.\ Раз.} = (t_н + t_{из.}) / 2 = (10 + 60) / 2 = 35^0 \text{ C.}$$

По изотермическим кривым нарастания прочности находим прочность, приобретенную бетоном в процессе разогрева. Для приведённого примера она составит около 7 % (точка А на рис. 1).

Далее определяем продолжительность изотермического прогрева до получения требуемой 50 %-й прочности (точка С на схеме, показанной на рис. 1). В результате продолжительность изотермического прогрева составит 11 ч, а общая продолжительность прогрева 5+11=16 ч.

В данном примере не учитывается набор прочности за период остывания конструкции, что вполне допустимо для тонкостенных относительно немассивных конструкций с $M_п > 8$.

Приведём пример расчёта продолжительности процесса остывания до 0 ^{0}C и средней температуры бетона при этом.

Исходные данные:

– конструкция: фундамент;

– марка (класс) бетона: В15 (200);

– вид цемента: портландцемент «400»;
– расход цемента: 300 кг/м^3;
– температура изотермического прогрева ($t_{б.н.}$) + 60 ^{0}С;
– вид опалубки: доска толщиной 40 мм;
– модуль охлаждаемой поверхности M_1 = 5 м$^{-1}$;
– прогнозируемая температура наружного воздуха на период остывания 20 ^{0}С.

Порядок расчёта

В первую очередь должна быть определена средняя температура бетона по формуле (6):

$$t_{б.ср.} = 60 / (1{,}03 + 0{,}181 \cdot 5 + 0{,}006 \cdot 60) = 60 / 2{,}315 = 25{,}9\ ^0\text{С}.$$

Далее вычисляется продолжительность остывания по формуле (3) при $t_{н.в.}$ = - 20 ^{0}С без учёта экзотермии:

$$\tau = \frac{0{,}84 \cdot 2500 \cdot 60}{3{,}6 \cdot 3{,}6 \cdot 5 \cdot (25{,}9 + 20)} = 126000 / 2974 = 42 \text{ ч}.$$

Коэффициент теплопередачи принят по таблице 1.5 при скорости ветра 5 м/с. Экзотермическое тепло рассчитывается по определённой продолжительности остывания 42 часа и средней температуре 25,9 ^{0}С с учётом того, что бетон твердел в течение примерно 5 часов при t = 60 ^{0}С до достижения прочности 30 % (точка Д на рис. 1). Удельное тепловыделение определим по таблице 1.1, оно составит около 180 кДж/кг. Тогда продолжительность остывания с учётом тепловыделения цемента

$$\tau = \frac{126000 + 300 \cdot 180}{2974} = \frac{126000 + 54000}{2974} = 60{,}5 \text{ ч},$$

т.е. около 2,5 суток при средней температуре, близкой к 26 ^{0}С.

По кривым нарастания прочности (рис. 1) за 56 часов остывания будет получено около 70 % R_{28} (точка F), т.е. нарастание прочности в течение остывания 40 %. Расчёт показал, что для относительно массивной конструкции с $M_п$ = 5 учёт остывания совершенно необходим, т.к. позволяет определить нарастание прочности без энергетических затрат. При этом не следует забывать об условности проведённых расчётов, исходящей из предположения равномерного остывания конструкции. В действительности наиболее охлаждаемые части (углы, грани) остынут быстрее и наберут меньшую прочность. На практике это обстоятельство учитывается путём замера температуры бетона в указанных наиболее охлаждаемых частях конструкций.

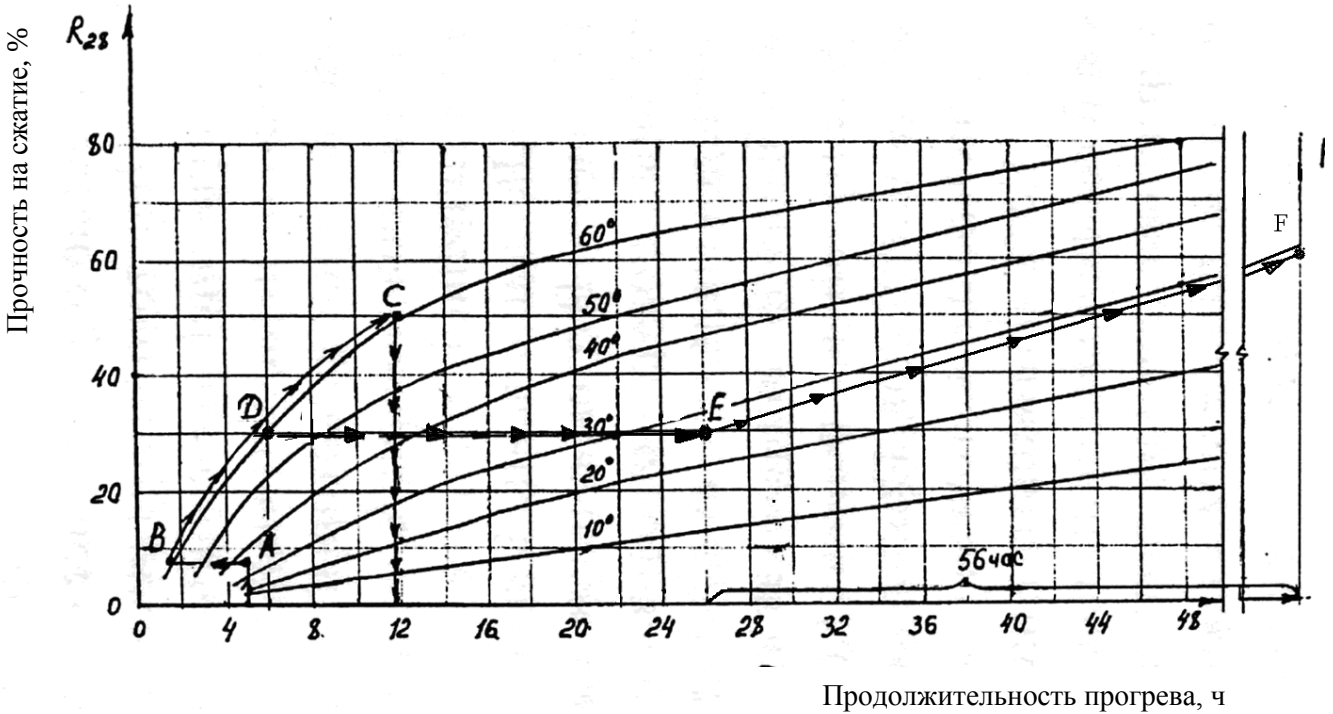


Рис. 1. Интенсивность нарастания прочности бетона марки 200 на портландцементе при различных температурах изотермического прогрева

2. ЭЛЕКТРОДНЫЙ ПРОГРЕВ БЕТОНА

Преимущество электродного прогрева бетона, по сравнению с другими методами его электротермообработки, состоит в том, что выделение тепла происходит непосредственно в бетоне при пропускании через него электрического тока. В этом случае КПД использования электрической энергии, при прочих равных условиях, выше, а температурное поле, особенно на стадии разогрева, распределяется в бетоне более равномерно [18].

Одним из основных исходных параметров при расчете электродного прогрева бетона является его удельное электрическое сопротивление ρ, величина которого определяется главным образом составом и количеством жидкой фазы (вода с растворенными в ней минералами цементного клинкера) в единице объема бетона.

Изменение количества жидкой фазы в бетоне зависит от расхода цемента и воды на 1 м^3 бетона и вызывает соответственно увеличение или уменьшение его ρ.

Так, например, с повышением водосодержания со 135 до 225 л на 1 м^3 бетона ρ снижается примерно в 2,4–2,6 раза.

Введение в бетон химических добавок электролитов приводит к уменьшению ρ, а введение поверхностно-активных или воздухововлекающих веществ (СДБ, СНВ, ГКЖ и др.) практически не изменяет его значения (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Ориентировочное уменьшение величины удельного электрического сопротивления в зависимости от количества добавок

Наименование добавки	Количество добавки, % веса воды затворения					
	0	0,5	1	1,5	2	3
Хлористый кальций	1	0,85	0,70	0,60	0,50	0,40
Хлористый натрий	1	0,80	0,60	0,50	0,45	0,35
Хлорное железо	1	0,88	0,77	0,69	0,62	0,53
Азотно-кислый натрий (нитрит натрия)	1	0,84	0,69	0,58	0,49	0,39
Азотно-кислый кальций (нитрит кальция)	1	0,86	0,72	0,63	0,54	0,48

Удельное сопротивление бетонов на пористых и на плотных заполнителях зависит от одних и тех же факторов.

Однако имеется некоторая специфика в изменении удельного сопротивления бетонов на пористых заполнителях. Так, в начальный период прогрева оно выше, чем у обычных бетонов с таким же расходом цемента и воды, что обусловливается поглощением жидкой фазы пористыми заполнителями. По мере подъема температуры жидкая фаза вытесняется из заполнителя в межзерновое пространство бетона за счет расширения защемленного в его порах воздуха, и величина p соответственно понижается.

Предварительное выдерживание бетона перед электропрогревом, особенно при низкой положительной температуре, вызывает некоторое уменьшение p. Продолжительность предварительной выдержки должна быть такой, чтобы к моменту начала электропрогрева температура бетона составляла не ниже 3–5 ^{0}С.

Удельное электрическое сопротивление бетона на гидравлическом вяжущем не является величиной постоянной, а изменяется в процессе его твердения (рис. 2). Процесс изменения p характеризуется тремя периодами. В первый (начальный) период p уменьшается до 0,50–0,85 начального p_1 вследствие увеличения концентрации электролитов в жидкой фазе и подвижности ионов при повышении температуры бетона. Во втором периоде p достигает минимального значения p_2 и некоторое время практически стабилизируется вследствие равновесной насыщенности раствора жидкой фазы. В третьем периоде значение p интенсивно возрастает из-за адсорбционного и химического связывания воды, а также частичного ее испарения в процессе прогрева.

Величины начального p_1 и минимального p_2 удельного сопротивления бетона являются изменяющимися характеристиками, зависящими от ряда факторов: водосодержания, расхода и состава цемента, пористости заполнителя, режима и условий твердения и других факторов, и колеблются в пределах: p_1 - от *4* до *25,* а p_2 - от 2÷3 до 12,5÷20,0 Ом · м.

Выполняя практические расчеты при организации электропрогрева, рекомендуется принимать удельное сопротивление p_3 равным полусумме величин начального p_1 и минимального p_2 удельного сопротивления:

$$P_3 = (p_1 + p_2) / 2. \qquad (8)$$

В предварительных расчетах при известном p_1 можно принять для тяжелых бетонов $p_3 = 0{,}85\ p_1$, а для легких бетонов $p_3 = 0{,}8\ p_1$.

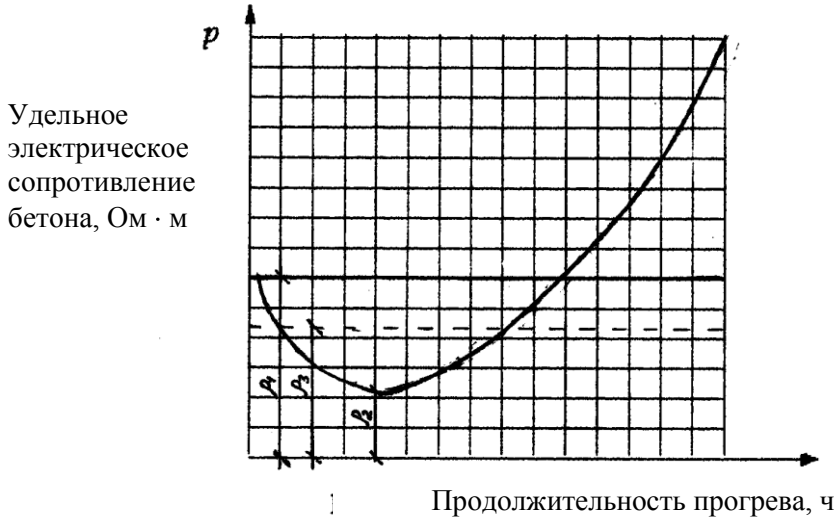


Рис. 2. Характер изменения удельного сопротивления бетона в процессе твердения: p_1, p_2, p_3 – удельное электрическое сопротивление [соответственно начальное, минимальное и расчетное (среднее)]

При неизвестном p_1 и при отсутствии возможности его определения в расчетах рекомендуется принимать p_3 для бетонов, приготовленных на плотных заполнителях, равным 5 Ом · м, на пористых заполнителях – 8 Ом · м.

2.1. Электроды и схемы электродного прогрева

Применяемые при электропрогреве бетона электроды подразделяются на пластинчатые, полосовые (ленточные), стержневые и струнные (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Типы электродов и их характеристики

Наименование	Описание	Время установки	Материал
Пластинчатые	Сплошные пластины, целиком закрывающие противоположные плоскости по меньшей стороне (толщине) конструкции или изделия	Установка до бетонирования	Кровельная или листовая сталь, прокатные профили при использовании в качестве электродов поддона или бортов металлической опалубки
Полосовые	Полосы, закрепленные на определённом расстоянии одна от другой на элементах опалубки или накладных щитах	Закрепленные до бетонирования; подсоединение после бетонирования	Кровельная, листовая сталь. Ширина электродов 20–50 мм
Стержневые	Стержни, устанавливаемые (забиваемые) в бетон или закрепляемые на опалубке	Установка до и после бетонирования	Круглая проволока, арматура диаметром 5–8 мм
Струнные	Струны, закрепленные вдоль оси длинномерных конструкций	Установка до бетонирования; подсоединение после бетонирования	Круглая проволока или арматура диаметром 6–12 мм

К конструкциям электродов и схемам их размещения предъявляются следующие основные требования:

а) мощность, выделяемая в бетоне при электропрогреве, должна соответствовать мощности, требуемой по тепловому расчету;

б) электрическое и, следовательно, температурное поле должно быть по возможности равномерным.

В наибольшей степени удовлетворяют изложенным требованиям пластинчатые электроды, располагаемые на двух противоположных плоскостях конструкции и подключаемые к разным фазам (рис. 3).

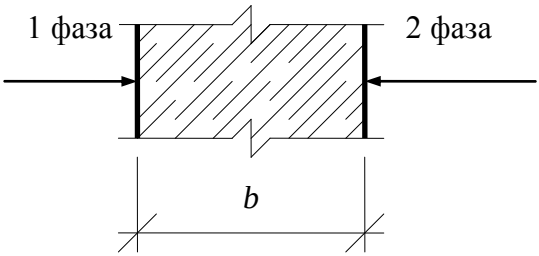


Рис. 3. Схема сквозного прогрева пластинчатыми электродами

При сквозном электропрогреве бетона, осуществляемом с помощью пластинчатых электродов, выделяемая удельная электрическая мощность P, кВт/м^3, равна [18]:

$$P = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{b^2 \cdot \rho_3}, \qquad (9)$$

где U – напряжение в сети при обычном прогреве, В; *b* – расстояние между разнофазными электродами, м; ρ_3 – расчётное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом · мм^2/м.

На практике с целью экономии металла вместо пластинчатых электродов применяют стержневые или полосовые (рис. 4).

Удельная электрическая мощность при сквозном прогреве бетона полосовыми электродами определяется по формуле

$$P = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{\rho_3 \cdot B^2 \cdot (1 + \frac{\alpha \cdot b}{\pi \cdot B} \ln \frac{b}{2a})}, \qquad (10)$$

где a – ширина плоских электродов, м; α – коэффициент при электропрогреве, равный 3/2 при трёхфазном и 2 при однофазном токе.

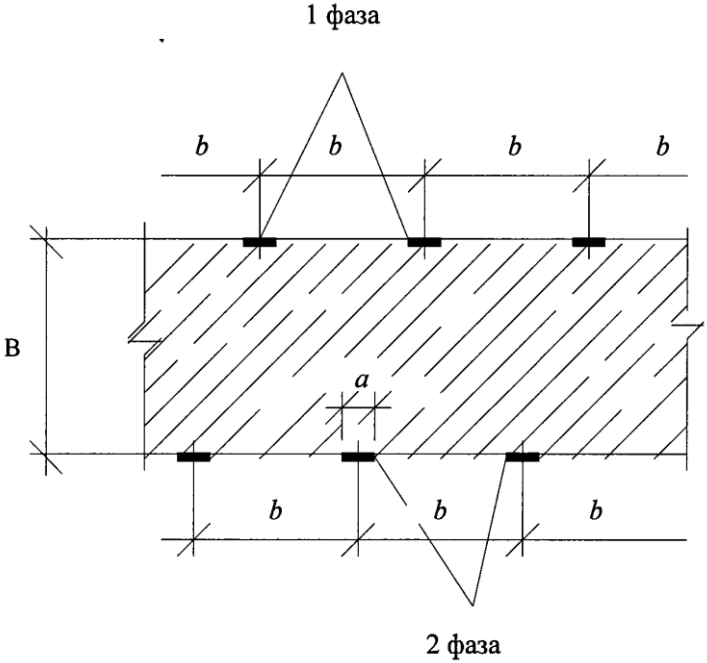


Рис. 4. Схема двухстороннего размещения полосовых электродов при сквозном прогреве бетона

Стержневые и полосовые электроды могут использоваться также для периферийного прогрева. Периферийным называется прогрев, при котором электроды расположены на поверхности (периферии) конструкции и электрический ток между соседними разноименными электродами проходит главным образом в периферийном слое бетона, толщина которого B составляет примерно 0,6 b (рис. 5).

Периферийный электропрогрев с размещением электродов только на одной стороне конструкции (односторонний прогрев) допускается для бетонных конструкций толщиной не более 20 см при условии, что расстояние между электродами равно удвоенной толщине конструкций.

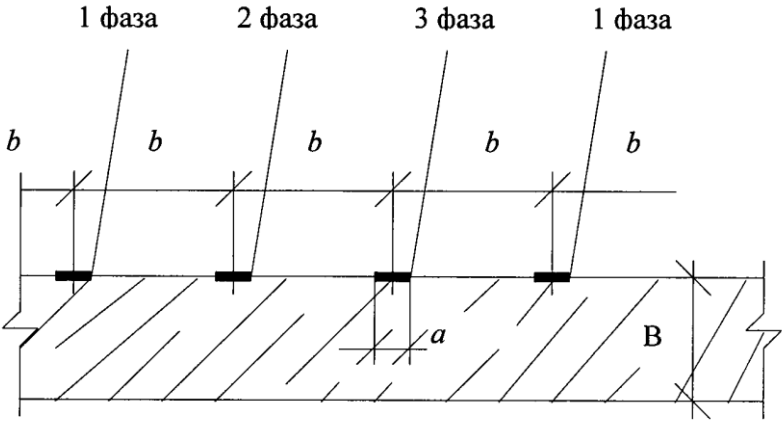


Рис. 5. Схема одностороннего размещения полосовых электродов при периферийном прогреве

При большей толщине конструкций периферийный электропрогрев выполняется с размещением электродов на двух противоположных сторонах конструкции (двухсторонний прогрев), для конструкций большой массивности – на всех поверхностях (рис. 6).

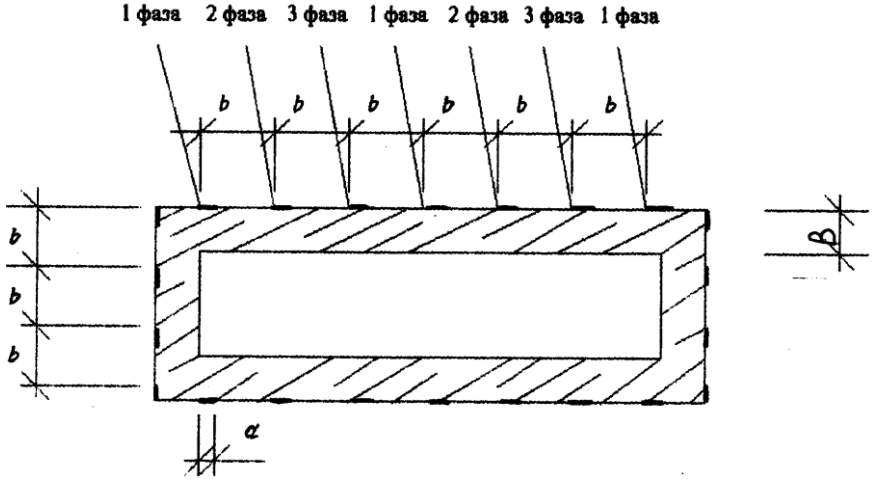


Рис. 6. Схема периферийного размещения полосовых электродов

Удельная электрическая мощность P при периферийном прогреве бетона полосовыми электродами, расположенными с каждой стороны конструкции, определяется по формуле [18]

$$P = \frac{1{,}57U^2 \cdot 10^{-3}}{p_3 \cdot b \cdot B\left(\alpha \cdot \ln\frac{4B}{\pi a} + \frac{\pi b}{2B}\right)}. \qquad (11)$$

При отсутствии полосовой стали допускается в качестве электродов для периферийного прогрева применять круглые стержни диаметром d_1, соблюдая соотношение $d_1 = a / 2$. В практике строительства широкое распространение получили электроды из круглой проволоки диаметром 6÷8 мм.

2.2. Порядок расчёта основных параметров прогрева

После установления требуемой удельной мощности для электротермообработки в период разогрева и изотермического прогрева бетона назначаются параметры электродного прогрева, обеспечивающие выделение указанной мощности:

$$P_{выд} \geq P_{треб},$$

где $P_{выд}$ – мощность, выделяемая при электродном прогреве, кВт/м^3; $P_{треб}$ – требуемая мощность (см. расчет п. 1.1).

В таблице 2.3 приведены данные для определения удельной электрической мощности, выделяемой в процессе прогрева в период разогрева и изотермического прогрева в зависимости от следующих параметров:

– напряжение питания U, В;

– удельное сопротивление бетона p, Ом · см;

– расстояние между электродами b, см;

– ширина электродов a, см;

– ширина зоны прогрева B, см.

Таблица 2.3

Удельная мощность, выделяемая в процессе периферийного прогрева бетона полосовыми электродами (ширина зоны прогрева В=10÷20 см), кВт/м^3

Напряжение, В	Среднее удельное сопротивление, Ом · см	Мощность, кВт / м^3					
		Расстояние между осями электродов, см					
		20		30		40	
		Ширина электродов, см					
		2	5	2	5	2	5
51	800	4,32 3,73	5,62 5,09	2,28 2,02	2,79 2,59	1,41 1,28	1,66 1,57
60	800	5,98 6,16	7,78 7,05	3,15 2,8	3,86 3,58	1,95 1,77	2,3 2,17
70	800	8,14 7,03	10,59 9,6	4,28 3,81	5,25 4,87	2,66 2,41	3,13 2,95
87	800	12,57 10,86	16,36 14,82	6,62 5,89	8,1 7,53	4,1 3,72	4,84 4,56
106	800	18,66 16,12	24,29 22,01	9,83 8,74	12,03 11,17	6,09 5,52	7,18 6,36

Примечание. В числителе приведена мощность для трёхфазного тока, в знаменателе – для однофазного.

Данные таблицы 2.3 заимствованы из [18], но скорректированы на ширину зоны прогрева, которая определяется расстоянием между осями электродов, а также с учетом практики строительства, когда расстояние между электродами принимается не менее 20 см во избежание пересушки поверхностных слоев конструкций.

Наличие табличных данных позволяет подобрать параметры электродного прогрева для обеспечения требуемой мощности.

Рассмотрим определение основных параметров электродного прогрева на конкретном примере.

Исходные данные:

вид конструкции – столбчатый фундамент с модулем охлаждаемой поверхности 7,5, $м^{-1}$;

марка (класс) бетона – В25 (300);

вид опалубки – доска толщиной 40 мм;

применяемые электроды – круглые из проволоки ∅ 8 мм;

конструкция прогревается по схеме периферийного электродного прогрева;

расчётное удельное электрическое сопротивление бетонной смеси – 800 Ом ·см;

начальная температура бетонной смеси $t_{б.н.} = +10\ ^0C$;

температура изотермического прогрева $t_{б.из.} = +\ 60\ ^0C$;

расчётная температура наружного воздуха $t_{б.н.} = –20\ ^0C$.

Порядок расчёта:

Определение требуемой мощности на период разогрева и изотермического прогрева выполняется в соответствии с рекомендациями п. 1.1.

По табл. 1.2 определяем требуемую удельную мощность на период разогрева бетона, которая при указанных параметрах и скорости подъёма температуры 5 ^0C/ч составит 4,2 $кВт/м^3$.

По табл. 1.3 определяем требуемую удельную мощность на период изотермического прогрева, которая составит 1,7 $кВт/м^3$.

Таким образом,

$$P^{треб}_{раз.} = 4{,}2\ кВт/м^3; \qquad P^{треб}_{изот.} = 1{,}7\ кВт/м^3.$$

Далее в соответствии с рекомендациями п. 2.2 определяем параметры электродного прогрева, при которых выделяемая мощность $P^{выд.} \geq P^{треб}$.

Круглые электроды d = 8 мм соответствуют полосовым шириной *в* = 2 см.

Для обеспечения условия $P^{выд.}_{изот.} \geq P^{треб}_{изот.}$ расстояние между электродами при напряжении 51 В составит 30÷35 см.

Примем его равным 30 см (как это показано на примере Рис.7) с некоторым повышением выделяемой мощности до 2,28 кВт/м^3 на случай непредвиденных потерь тепла. Повышение выделяемой мощности в процессе разогрева бетона осуществим за счёт повышения напряжения питания – в данном случае до 70 В, тогда выделяемая мощность $P^{выд.}_{разог.}$= 4,28 кВт/м^3, что соответствует требуемой.

Таким образом, при неизменном расстоянии между электродами регулирование выделяемой мощности осуществляется изменением напряжения питания.

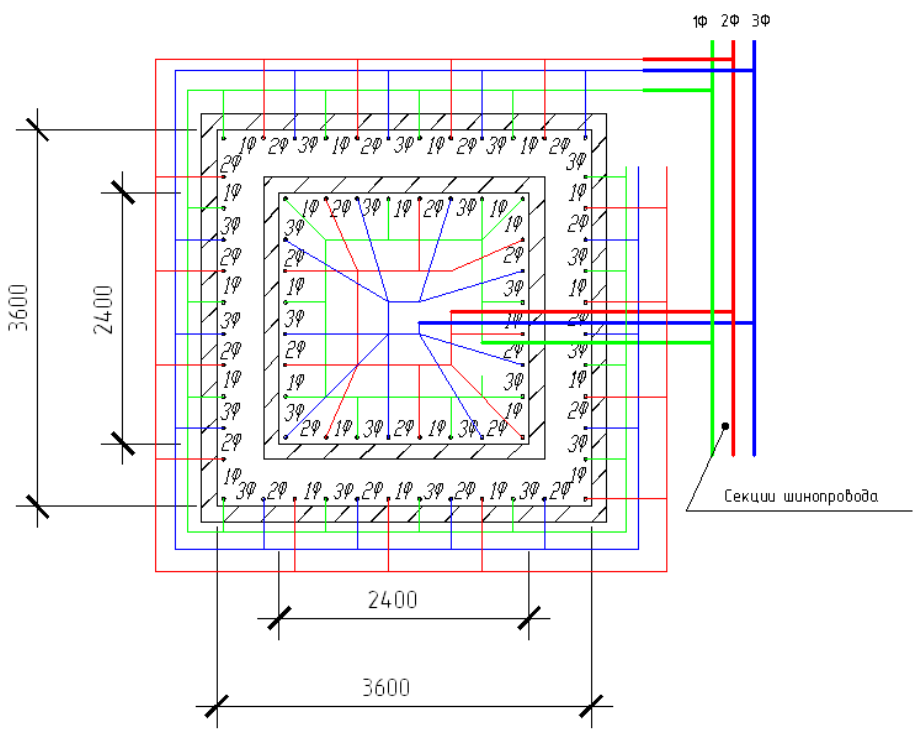


Рис.7 -Пример схемы расположения электродов при периферийном прогреве ступенчатого фундамента

3. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ПРОВОДА ДЛЯ ПРОГРЕВА БЕТОНА

3.1. Результаты производственных экспериментов по прогреву бетона

На опытном полигоне Усть-Илимского ЛПК было изучено влияние основных параметров нагревательной спирали, к которым относятся напряжение питания, шаг спирали, длина отдельных нагревательных элементов, на температурное поле конструкции в процессе прогрева [21].

В экспериментах, проведенных на фрагменте конструкции перекрытия производственных цехов Усть-Илимского ЛПК, металлический профилированный лист использовался в качестве несъемной опалубки. Опытная конструкция разбивалась на секции размером 3 х 3 м, которые поочередно бетонировались и прогревались. Сверху уложенный бетон укрывался слоем опилок толщиной около 100 мм, снизу металлическая опалубка ничем не защищалась.

При проведении экспериментов переменными факторами являлись в основном длина греющего элемента и шаг раскладки провода, который составлял 50,100,150 и 200 мм.

Постоянными оставались напряжение питания – 60 В, диаметр проволоки – 2 мм, толщина полиэтиленовой изоляции – 1 мм.

Полигон был открытым, поэтому температура наружного воздуха оставалась нерегулируемым фактором.

В процессе экспериментов определялись состояние изоляции, наличие утечки тока, температура бетона и равномерность её распределения по конструкции. Следующие результаты были получены применительно к температуре наружного воздуха –20…–30 ^{0}С:

- определен шаг раскладки провода, обеспечивающий твердение бетона при температурах – 40–60 ^{0}С; в пределах 100–150 мм при длине греющего провода 36 м, напряжении 60 В и нагрузке 47 Вт/пог.м;
- была отработана конструкция выводов из бетона, обеспечивающая возможность соединения провода с источником питания;
- при указанных параметрах прогрева и принятой конструкции выводов из бетона изоляция провода сохранялась как в бетоне, так и на открытом воздухе;

- установлено, что распределение температуры прогреваемого бетона зависит от теплопотерь в местах замера (наиболее высокая температура отмечалась в центральных точках конструкции, наиболее низкая – в углах, у металлических неутеплённых поверхностей и т.п.).

Полученный опыт прогрева тонкостенной, плохо защищенной от охлаждения конструкции позволил оценить используемый метод электропрогрева как высокоэффективный и достаточно надёжный в экстремальных условиях выдерживания бетона, где о применении электродного прогрева не может быть речи.

3.2. Назначение основных параметров греющих элементов

Греющим элементом называется отрезок нагревательного провода, подключаемый непосредственно к источнику питания на то или иное напряжение. Отдельные греющие элементы, подключаемые параллельно, объединяются в единый тепловой контур или поле прогреваемой конструкции. Основными параметрами нагревательного провода являются:

– длина нагревательного провода, подключенного к источнику питания L, м;

– площадь поперечного сечения проводника S, мм^2;

– шаг раскладки провода b, м;

– площадь нагрева F, м^2;

– удельное электрическое сопротивление материала проводника ρ, Ом·мм^2/м.

Основным требованием к изоляции является сохранность изоляционных свойств при относительно высоких температурах, возникающих во время прогрева. Нарушение изоляционного слоя может возникнуть и до начала прогрева в результате перегибов и других операций в процессе монтажа провода при низких отрицательных температурах наружного воздуха.

Таким образом, материал изоляции должен быть достаточно термо- и трещиностойким.

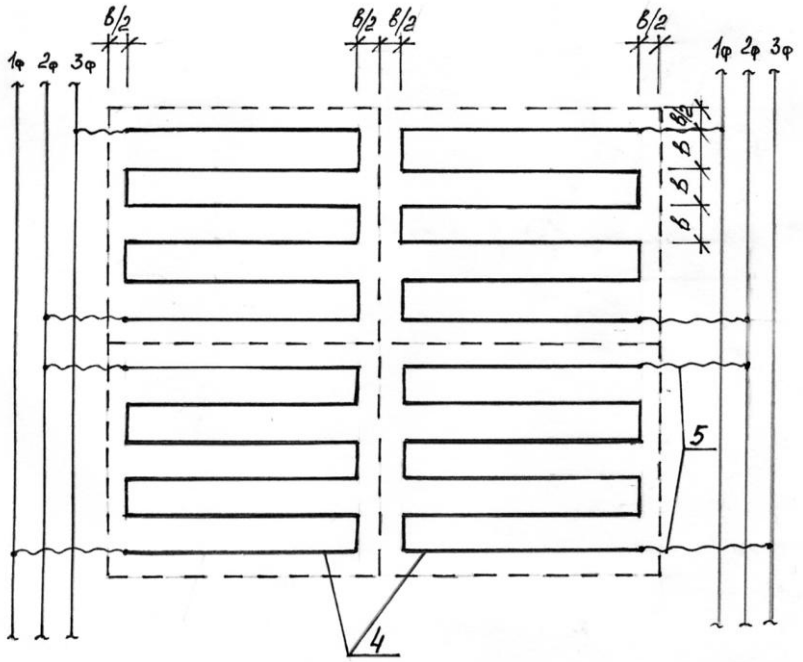


Рис. 8. Схема раскладки нагревательного провода по обогреваемой поверхности: $1_ф$, $2_ф$, $3_ф$ – соответствующие фазы шинопровода; 4 – нагревательный провод; 5 – коммутационные соединения; b – шаг раскладки провода

Расчётные параметры нагревательного элемента включают следующие величины:

– общую мощность, выделяемую нагревательным элементом, Вт,

$$W = U \cdot J,$$

где J – сила тока, А; U – напряжение питания, В;

– мощность, отнесенную к единице площади нагрева W_s, Вт/м^2;

– удельную погонную мощность провода, Вт/ м,

$$P_{пог} = \frac{W}{L};$$

– сопротивление 1 м провода, Ом·м,

$$R = \rho / S;$$

– общее сопротивление провода, Ом,

$$R_L = p \cdot L / S.$$

С поправкой на температуру провода, установившуюся в процессе прогрева, электрическое сопротивление может быть рассчитано по формуле

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t_{уст.} – 20)],$$

где α – температурный коэффициент изменения электропроводимости.

На практике может возникнуть задача расчёта необходимой длины провода по известной или требуемой мощности, выделяемой 1 пог.м провода:

$$P_{пог} = \frac{W}{L}, \qquad (12)$$

$$W = P_{пог} \cdot L,$$

$$U \cdot J = P_{пог} \cdot L,$$

в свою очередь

$$J = \frac{U}{R_L} = \frac{U \cdot S}{p \cdot L},$$

следовательно,

$$\frac{U^2 \cdot S}{p \cdot L} = P_{пог} \cdot L, \qquad L^2 = \frac{U^2 \cdot S}{p \cdot P_{пог}},$$

$$L = \sqrt{\left(\frac{U^2}{p} \cdot \frac{S}{P_{пог}}\right)}. \qquad (13)$$

Таким образом, необходимая длина провода в зависимости от требуемой мощности $P_{пог.}$ может быть рассчитана по формуле (13) для принятого напряжения питания, удельного сопротивления материала проводника и поперечного сечения провода.

Кроме указанных зависимостей, необходимо определить соотношение между $P_{пог.}$ и W_s.

С достаточной точностью

$$W_s = (1 / b) \cdot P_{пог.},$$

где 1/b – длина провода в пределах 1 м ^{2} площади нагрева, м/м^2 или 1/м.

В результате можно провести расчёт длины провода, задаваясь требуемой удельной мощностью на 1 м^2 нагрева, или по заданным

параметрам провода, напряжению питания и шагу раскладки провода найти выделяемую удельную мощность (табл. 3.1).

С другой стороны, на основании многочисленных наблюдений за прогревом конструкций в условиях строительной площадки [21] получены рекомендуемые мощности для конструкций, бетонируемых в осенне-весенний и зимний периоды (табл. 3.2) на стадии изотермического прогрева – $P_{треб}^{изот}$.

Требуемая мощность в период разогрева увеличивается в среднем в 2 раза (см. п. 1.1), т.е. при расчётах параметров прогрева мощность на период разогрева $P_{треб}^{раз} = 2\ P_{треб}^{изот}$. Указанные мощности соответствуют режиму прогрева, рассмотренному в п. 3.3.

Как видно из табл. 3.1, при изменении длины нагревательного провода (при прочих одинаковых параметрах) изменяется электрическая нагрузка на погонный метр. Тем самым усиливается или ослабевает интенсивность прогрева.

С величиной нагрузки на погонный метр связана температура нагрева провода, которая, кроме того, зависит от теплоотдачи в окружающую среду (бетон или воздух). В процессе прогрева устанавливается равновесная температура проводника. Следует учитывать, что в бетоне теплоотдача значительно выше, чем на воздухе. В связи с этим при прокладке по воздуху сечение проводника, во избежание перегрева и расплавления изоляции, должно быть увеличено. Например, сечение выводов становится больше в три раза за счет скрутки из того же провода.

Длина заготовки $L_{заг.}$ греющего элемента может быть определена по формуле

$$L_{заг.} = L + 6a\ , \qquad (14)$$

где L – расчетная длина греющего элемента, м; а – длина вывода, м. Кроме того, ограничение электрической нагрузки необходимо для обеспечения сохранности изоляции провода в бетоне в процессе прогрева. Рекомендуемое ограничение в зависимости от температуры наружного воздуха (табл. 3.3) основано на результатах наблюдений за прогревом конструкций в условиях строительной площадки [21].

Таблица 3.1

Зависимость выделяемой удельной мощности от основных параметров нагревательного провода

Параметры провода		d,	L,	R,	R_t,	J,	P,	Удельная мощность для шага, Вт/м^2				
ρ	ρ/s	мм	м	Ом	Ом	А	Вт/ м	в=0,10м	в=0,15м	в=0,20м	в=0,25м	в=0,30м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,157	0,08	1,6	36	2,81	3,54	16,96	28,27	283	188	141	113	94
			32	2,50	3,15	19,06	35,74	357	238	179	143	119
			28	2,19	2,76	21,76	46,63	466	311	233	187	155
	0,06	1,8	36	2,22	2,79	21,47	35,78	358	239	179	143	119
			32	1,97	2,48	24,19	45,36	453	302	227	181	151
			28	1,73	2,18	27,55	59,04	590	394	295	236	197
	0,05	2,0	36	1,00	2,27	26,48	44,13	441	294	221	177	147
			32	1,60	2,014	29,79	55,86	558	372	279	223	186
			28	1,40	1,76	34,04	72,94	729	486	365	292	243
	0,04	2,2	36	1,49	1,88	31,98	53,30	533	355	267	213	178
			32	1,32	1,66	36,10	67,69	677	451	338	271	226
			28	1,16	1,46	41,08	88,03	880	587	440	352	293
0,236	0,12	1,6	28	3,29	4,14	14,49	31,05	310	207	155	124	104
			24	2,82	3,55	16,90	42,25	422	282	211	169	141
			20	2,35	2,96	20,28	60,84	608	406	304	243	203
	0,09	1,8	28	2,60	3,35	17,92	38,40	384	256	192	154	128
			24	2,23	2,81	21,37	53,43	534	356	267	214	178
			20	1,85	2,37	25,28	75,84	758	506	379	303	253
0,236	0,08	2,0	28	2,10	2,64	22,69	48,62	486	324	243	194	162
			24	1,80	2,27	26,48	66,20	662	441	331	265	221
			20	1,50	1,89	31,77	95,31	953	635	477	381	318

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,236	0,06	2,2	28 24 20	1,74 1,49 1,24	2,19 1,88 1,56	27,39 31,98 38,43	58,69 79,95 115,29	586 799 1153	391 533 769	293 400 576	235 320 461	195 267 384
0,314	0,16	1,6	20 16 12	3,12 2,50 1,87	3,93 3,15 2,35	15,27 19,06 25,48	45,81 71,48 127,40	458 715 1274	305 477 849	229 357 637	183 286 510	153 238 425
	0,12	1,8	20 16 12	2,47 1,97 1,48	3,11 2,48 1,86	19,29 24,19 32,20	57,87 90,71 161,00	579 907 1610	386 605 1073	289 454 805	231 363 644	193 302 537
	0,10	2,0	20 16 12	2,00 1,60 1,20	2,52 2,01 1,51	23,83 29,79 39,71	71,49 117,1 198,55	715 1171 1985	477 781 1324	357 586 993	386 447 794	238 390 662
	0,08	2,2	20 16 12	1,65 1,32 0,99	2,08 1,66 1,25	28,88 36,10 48,14	86,64 135,38 248,70	866 1354 2487	578 903	433 677	347 542	289 451

Примечание: ρ – удельное сопротивление стали провода при + 20^{0}С, Ом·мм^2/м; S – поперечное сечение провода, мм^2; L – длина провода, м; d – диаметр провода, мм; $R = \frac{p}{S} L$, Ом; R_t – поправка на повышение сопротивления при температуре 90^{0}С $R_t = R\,[1 + 0{,}0037 \cdot (90\text{-}20)] = 1{,}259\ R$; J – сила тока, А, при напряжении U = 60 В; $P = \frac{W}{L}$ – мощность на единицу длины провода, Вт/м; W = U · J – мощность, выделяемая проводом, Вт; в – шаг раскладки провода по нагреваемой поверхности, м; W_s – удельная мощность, рассчитанная по формуле $W_s = \frac{1}{b} \cdot P_{пог}$.

Таблица 3.2

Рекомендуемая удельная мощность прогрева нагревательным проводом на период изотермического прогрева

Вид конструкции	Модуль поверхности	Удельная мощность, кВт	
		на 1 м^2 обогреваемой поверхности	на 1 м^3 бетона конструкции
Массивные фундаменты	3-5	0,140 0,25÷0,28	0,50 1,0÷1,3
Ленточные фундаменты	5-7	0,20 0,26÷0,30	1,0÷1,5 1,75÷2,0
Взлетно-посадочная полоса аэродромов	7-10	0,25 0,34	1,60 2,50
Кольцевые конструкции (дымовые трубы, резервуары)	7-10	0,25÷0,27	1,50 3,00
Бетонные площадки	10-12	0,20 0,35	1,5÷1,9 2,5÷3,0
Перекрытия по профилированному листу	15-20	0,22 0,38	1,95 3,25

Примечание. Для дымовых труб: в числителе – прогрев с наружной стороны, в знаменателе – с наружной и внутренней (первый для осенне-весеннего периода, второй – для зимнего). Для остальных конструкций: в числителе – параметры прогрева в осенне-весенний период, в знаменателе – в зимний период.

Таблица 3.3

Рекомендуемая предельная электрическая нагрузка на провод для различных режимов прогрева, Вт/пог.м

Длина, м	Диаметр, мм	Марка стали	Удельное сопротивление $\frac{Ом \cdot мм^2}{м}$	Сопротивление, $\frac{Ом}{пог.м}$	Удельное сопротивление, Ом · мм²/м	Сопротивление, Ом/пог.м	Напряжение, В	Сила тока, А	Нагрузка, Вт/п.м	Режим прогрева
			t = 20 °C		t = 70–90 °C					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
24,0	2,0	СВ-08 ГОСТ 2246-70	0,31	0,1	0,47	0,15	60	16,7	41,7	Обычный при температуре наружного воздуха –10…–25 °C
					0,50	0,16	80	20,8	69,5	Усиленный при температуре –20…–35 °C
16,0	2,0	То же	0,31	0,1	0,56	0,175	60	21,4	80,3	Форсированный при температуре ниже –30…–35 °C

Окончание табл. 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
32,0	2,0	Низкоуглеродная общего назначения ГОСТ 3282-74	0,16	0,05	0,25	0,08	60	23,0	43,1	Обычный при температуре воздуха –10…–25 ^{0}C
					0,27	0,085	80	29,7	73,5	Усиленный при температуре –25…–35 ^{0}C
24,0	2,0	То же	0,16	0,05	0,27	0,085	60	29,4	73,5	
16,0	2,0	То же	0,16	0,05	0,27	0,085	60			Форсированный при температуре ниже –35 ^{0}C

3.3. Режим прогрева конструкций и средства его регулирования

Прогрев конструкций с помощью нагревательного изолированного провода включает те же стадии, что и электродный и другие методы обогрева: разогрева, изотермического прогрева и остывания.

Практика применения нагревательного провода показала, что скорость подъёма температуры бетона в период разогрева зависит в основном от выделяемой в процессе прогрева мощности, от массивности и защиты конструкций от теплопотерь, а также от температуры наружного воздуха.

На основании экспериментальных данных можно предложить ограничить скорость разогрева бетона до 5 ^{0}С/ч, что соответствует мягкому режиму тепловой обработки бетона (в действительности в условиях суровой зимы скорость подъёма может быть даже ниже указанной величины в тонкостенных, недостаточно теплоизолированных конструкциях).

Для стадии изотермического прогрева характерно сохранение относительно стабильной температуры бетона, что, очевидно, является результатом примерного равенства притока тепловой энергии и потерь тепла в окружающую среду. Устанавливающаяся температура изотермического прогрева зависит от тех же факторов, что и скорость разогрева бетона. В случае когда количество выделяемой энергии значительно больше теплопотерь, для предохранения конструкции от перегрева можно использовать кратковременное отключение нагревательных элементов от источника питания.

Рекомендуемая температура изотермического прогрева (55÷60) ^{o}С принимается на основании наблюдений за тепловым режимом конструкций в зимних условиях, характерных для Братско-Усть-Илимского региона.

Принимаемая температура изотермического прогрева соответствует мягкому режиму тепловой обработки, который достаточно

оптимален для бетонов на современных высокоактивных портландцементах.

Как правило, остывание конструкции происходит за счёт естественного теплообмена. Скорость остывания зависит от массивности конструкции, теплозащитных свойств опалубки и утепления неопалубленных поверхностей, температуры окружающей среды и других факторов.

Как уже отмечалось, особенностью рассматриваемого метода прогрева является возможность регулирования скорости остывания периферийных зон конструкции периодическим включением обогрева, что позволяет ограничить периоды температур «ядро – грань» и предохранить массивные конструкции от сквозного трещинообразования.

Учёт набора прочности в течение остывания имеет смысл для относительно массивных конструкций и подробно рассмотрен в разделе 1.4.

Основной характеристикой процесса является удельная электрическая мощность, приходящаяся на единицу площади обогреваемых поверхностей и на единицу объёма бетона прогреваемых конструкций:

$$P_{уд.1} = P / F \; ; \; P_{уд.2} = P / V \; , \qquad (15)$$

где P – суммарная электрическая мощность греющих элементов, Вт; F – площадь обогреваемых поверхностей, $м^2$; V – объём бетона прогреваемой конструкции, $м^3$.

При заданной мощности на погонный метр греющего элемента удельная мощность $P_{уд.1}$ будет зависеть только от шага раскладки провода по обогреваемой поверхности:

$$P_{уд.1} = (1 / в) \cdot P_{пог.} \; , \qquad (16)$$

где в – шаг раскладки провода, м; $P_{пог.}$ – мощность, отнесенная к погонному метру провода, Вт / пог.м.

Следовательно, шаг раскладки провода при прочих заданных параметрах становится основным средством регулирования мощности прогрева различных частей конструкций.

Технологические средства регулирования прогрева могут быть расположены в следующем порядке:

– длина греющего элемента;

– напряжение питания;

– шаг раскладки провода.

При этом сечение провода, его удельное сопротивление и вид изоляции являются заданными параметрами. Иногда имеется возможность выбора провода с различным удельным сопротивлением, что даёт возможность использовать его длинные или короткие отрезки в зависимости от размеров прогреваемых конструкций.

С учетом темпов современного строительства режимы прогрева конструкций назначаются по возможности короткими. Наиболее приемлемым может считаться следующий режим, ч:

разогрев 5 ^{0}С/ч.....……...10÷12

изотермический прогрев при температуре 55÷60 ^{o}С … 10÷15

остывание (для массивных конструкций).....…..20÷30

всего.....…….40÷60

Указанный режим обеспечивает получение не менее 50 % прочности от установленной марки бетона в возрасте 28 суток.

Остывание учитывается в режиме прогрева только для сравнительно массивных конструкций с модулем поверхности меньше 8 м$^{-1}$.

В настоящее время практически весь бетон готовится на высокоактивных портландцементах марок 400, 500 и выше, что обеспечивает возможность существенного сокращения режима прогрева. Применение шлакопортландцемента для бетона, укладываемого зимой, не рекомендуется.

3.4. Особенности монтажа нагревательного провода

Основным условием монтажа провода при низких отрицательных температурах является выработка приёмов, исключающих повреждение изоляции. Так, при температурах до минус 30 °С, когда изоляция в основном сохраняется, нарезку провода можно вести как на строительной площадке, так и в заранее отапливаемом помещении на специальном станке [21].

При температурах ниже минус 30 °С, когда вероятность повреждения изоляции значительно возрастает, нарезка провода производится только в помещении. В этом случае комплект заготовок на отдельную конструкцию доставляется в мотках на строительную площадку. Большое значение имеет качество изоляции: нельзя допускать разрывов, плохого сцепления с проводом. Кроме того, необходимо использовать изоляционный материал (в частности, полиэтилен), устойчивый к отрицательным температурам. Важным условием успешного прогрева является сохранение проектного положения провода во время бетонирования. Выводы необходимо располагать на стыке щитов опалубки, у края участка бетонирования, вне зоны непосредственного уплотнения бетона. Достаточно надёжными являются выводы, выполняемые путём тройной скрутки той же проволоки. Длина вывода 30–50 см, длина провода на один вывод 90–150 см. Крепить выводы можно различными способами: прикруткой к арматуре, гвоздями к опалубке и др., главное при этом – надёжность крепления. К арматуре провод присоединяют, обеспечивая зазор между ними, не допуская лишних перегибов и слишком плотного касания провода к стержням. В качестве крепежа применяются скрутки из отрезков того же провода в изоляции (рис. 10).

Расстояние между местами крепления или опирания на сетку не должно быть слишком большим, чтобы можно было избежать провисания и грубого смещения провода. Выводы соединяются с шинопроводом алюминиевой проволокой диаметром 2–3 мм, кото-

рая также работает как предохранитель при замыкании провода на арматуру. Аналогичное соединение обычно применяется при электродном прогреве для соединения электродов с шинопроводом. В качестве шинопровода, как и при электродном прогреве, используется многожильный алюминиевый провод.

Таким образом, особенности монтажа провода определяют его положение в прогреваемой конструкции. Будучи смонтированным по арматуре, провод отстоит от опалубки на величину защитного слоя бетона и оказывает наибольшее влияние на температурный режим периферийных слоёв.

Однако нельзя исключить ситуации, когда оптимальное расположение провода в конструкции может быть назначено на основании решения температурной задачи.

Приведём в качестве примеров раскладку провода, применяемую в практике строительства, для конкретных конструкций (рис. 9–13).

Столбчатые монолитные фундаменты в зимнее время бетонируются почти без ограничений по температуре наружного воздуха, поэтому необходимо, чтобы электропрогрев был надёжным и обеспечивал получение проектной прочности в сжатые сроки.

К преимуществам нагревательного провода можно отнести качество его поверхностей, пригодных для нанесения гидроизоляции, и возможность обеспечения к моменту окончания прогрева относительной прочности вплоть до 100 % от установленной марки (класса).

Особенности раскладки провода (рис. 9):

– провод навивается на арматурный каркас с переменным шагом, чтобы за счёт уменьшения шага усилить прогрев наиболее охлаждаемых частей;

– при температуре наружного воздуха ниже минус 30 ^{0}С добавляется по одному греющему элементу по основанию и колонне за счёт уменьшения шага раскладки примерно вдвое.

Указанные параметры получены в результате использования деревянной щитовой опалубки с толщиной доски 40 мм. Горизонтальные поверхности при этом закрывались бумагой и слоем опилок толщиной 10÷15 см.

Основные параметры прогрева (табл. 3.4) приведены для зимних месяцев с температурой наружного воздуха минус 15–30 °С.

Таблица 3.4

Основные параметры прогрева для зимних месяцев

Обогреваемая поверхность, м^2	Объём бетона, м^3	Модуль поверхности	Греющие элементы, шт.· м	Общая мощность, Вт	Мощность на погонный метр провода, Вт/пог. м	Мощность на 1 м^2 нагрева, Вт/м^2	Расход провода на 1 м^3, м/м^3
34,9	12,0	3,5	1-20 4-26	12000	47,6	265÷318	11,5

Бетонные покрытия дорог, площадок, полов толщиной 15–20 см разделяются на армированные и неармированные. Для неармированных или слабоармированных конструкций установка нагревательного провода заключается в его фиксации на ограждающих полосу бетонирования деревянных брусьях или досках (рис. 10). С точки зрения удобства и надёжности установки нагревательный провод в данном случае не имеет существенных преимуществ перед круглыми электродами, которые обычно укладываются на основание и раскрепляются на продольных рейках. Обычно автобетоновозы проходят по полосе бетонирования и рвут провод. Поэтому бригадой бетонщиков на строительстве Усть-Илимской ТЭЦ было предложено предварительно устанавливать нагревательный провод только на объём бетона из одного бетоновоза. Расход стали на нагревательные провода значительно меньше, чем на круглые электроды.

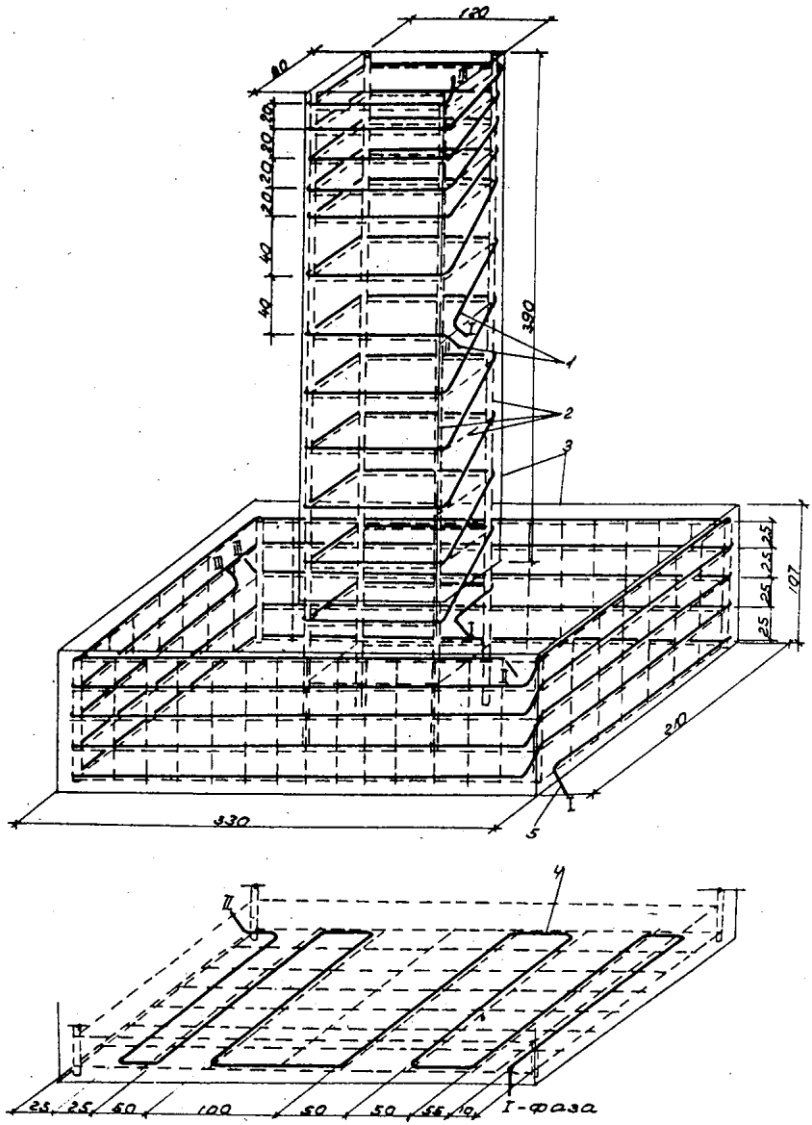


Рис. 9. Схема установки нагревательного провода в столбчатом фундаменте: 1 – нагревательный провод; 2 – арматурный каркас; 3 – контур конструкции; 4 – нагревательный провод по основанию; 5 – выводы провода для подключения к источнику питания

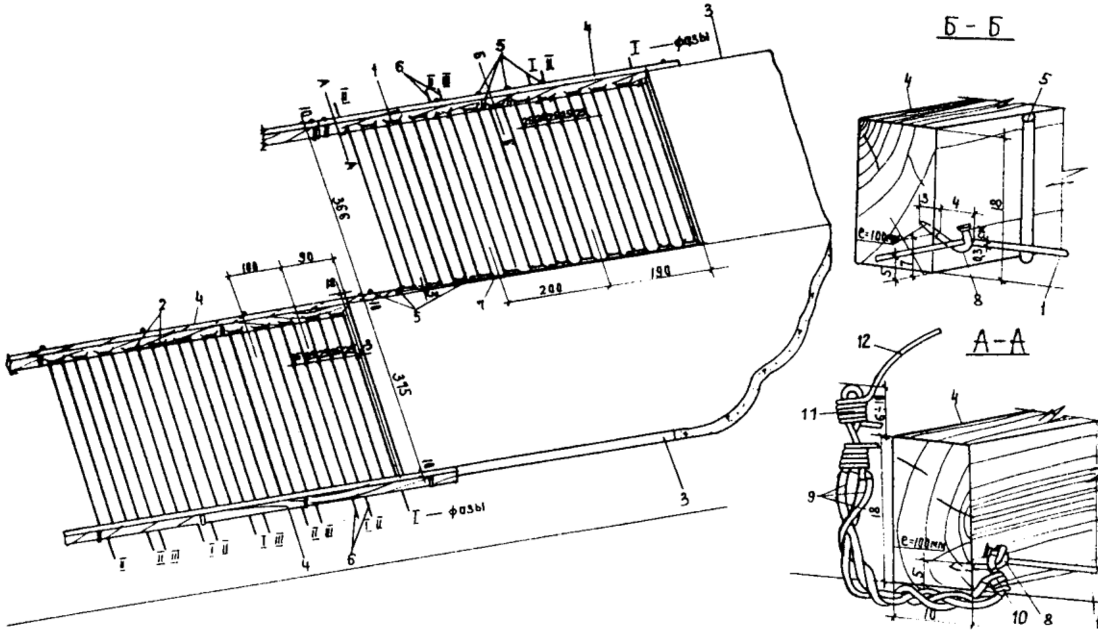


Рис. 10. Бетонные покрытия (полы, площадки, дороги) толщиной 15÷20 см:
1, 2 – греющие элементы; 3 – контур конструкции; 4 – бортовой брус; 5 – штыри, фиксирующие брус на основании; 6 – вывод; 7 – разделительная доска; 8 – гвоздь; 9 – конструкция вывода; 10 – остающаяся в бетоне часть вывода; 11 – узел соединения с шинопроводом; 12 – коммутирующая проволока

Электродный прогрев густоармированных площадок с одной или двумя сетками становится затруднительным из-за весьма вероятного замыкания электродов на арматуру. В данном случае наиболее эффективен прогрев нагревательным изолированным проводом, который монтируется по арматуре. Основные параметры прогрева приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Основные параметры прогрева

Режим прогрева	Обогреваемая поверхность, $м^2$	Объём захватки бетонирования, $м^3$	Модуль поверхности	Греющие элементы, шт.·м	Общая мощность, Вт	Мощность на пог.м провода, Вт/пог.м	Мощность на 1 $м^2$, $Вт/м^2$	Расход провода, $м/м^3$
Обычный	22,0	4,0	12,0	3·32	3600	37,5	164	26
Форсированный	22,0	4,0	12,0	6·16	7200	75,0	327	26

Обычный режим прогрева применяется при температуре наружного воздуха до минус 30 °С, форсированный – при температуре наружного воздуха ниже минус 30 °С.

В качестве утеплителя используются бумага и опилки, размещаемые на верхней поверхности слоем в 10–15 см.

На рис. 11 показаны особенности соединения нагревательных проводов с шинопроводом на примере ВПП аэропорта.

Омоноличивание стенки с днищем бассейна или галереи осуществляется с использованием нагревательного, завитого в спираль, провода, который применяется не только для прогрева бетона омоноличивания, но и для предварительного отогрева бетонных поверхностей перед бетонированием (рис. 12). Для прогрева полости штрабы спираль укорачивается вдвое, оба участка подключаются параллельно на напряжение 49 В, и прогрев ведётся в течение 8 ч. Затем два участка спирали соединяются последовательно. Объединённая спираль подключается после окончания бетонирования и используется для прогрева бетона при омоноличивании (см. табл. 3.6).

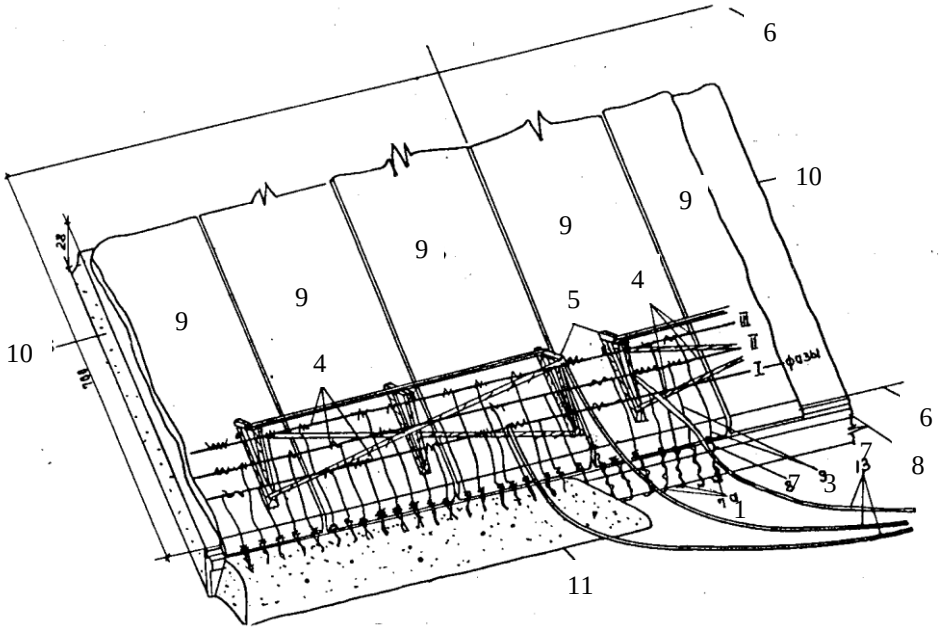


Рис. 11. Соединение нагревательных проводов с шинопроводом на примере ВПП аэропорта:
1 – выводы; 2 – узел соединения провода с коммутационной проволкой; 3 – проволока алюминиевая ∅ 2÷3 мм; 4 – шинопроводы; 5 – сборная секция шинопровода; 6 – ось рельсоформы;
7 – соединительные кабели (с трансформатором); 8 – рельсоформа; 9 – инвентарный щит утепления;
10 – контуры ВПП; 11 – утепляющяя засыпка опилками

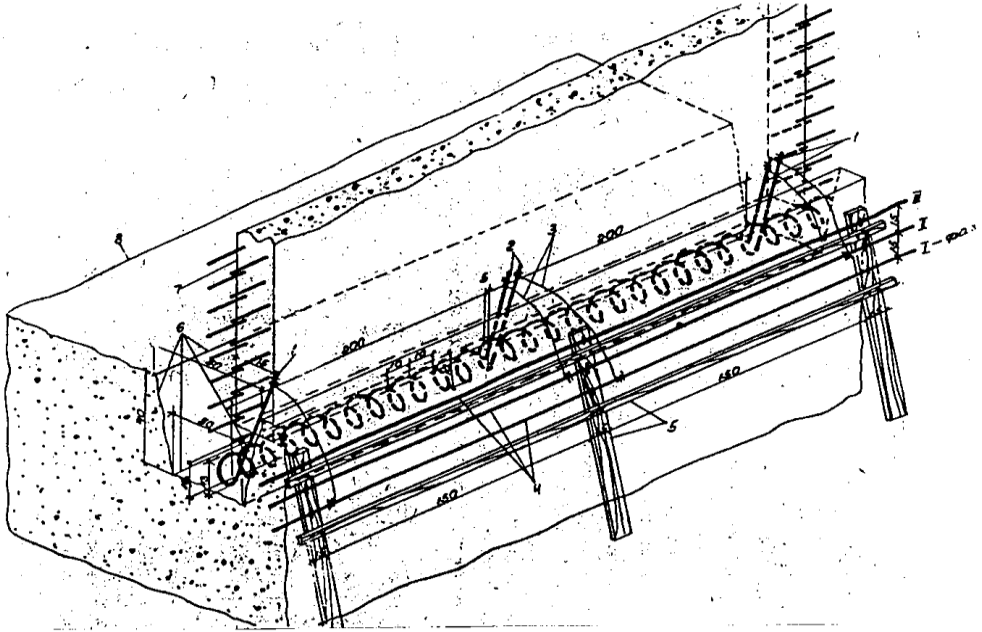


Рис. 12. Схема расположения нагревательного провода в виде спирали при омоноличивании стен с днищем бассейна:1 – нагревательный провод в виде спирали; 2 – выводы; 3 – коммутирующая проволока; 4 – шинопроводы; 5 – инвентарная секция шинопровода; 6 – контуры штрабы; 7 – стеновая панель; 8 – монолитное днище

Таблица 3.6

Основные параметры прогрева

Объём бетона, $м^3$	Нагрузка на 1 пог.м провода, Вт/ пог.м	Мощность на 1 пог.м штрабы, Вт	Расход провода на 1 пог.м штрабы, м/пог.м	Греющие элементы, шт.·м
0,16	400 (спираль)	1200 (спираль)	3 (спираль)	1·12
	100 (греющий элемент)	300 (греющий элемент)	3 (греющий элемент)	

Теплоизоляцией открытых горизонтальных поверхностей может быть бумага, слой опилок и др.

Монолитное перекрытие по металлическому профилированному листу, используемому в качестве оставляемой опалубки, является распространенным решением для зданий со стальным каркасом.

При бетонировании в зимний период обеспечение необходимых условий твердения бетона в плите перекрытия толщиной около 10 см становится серьёзной проблемой. Наличие неизолированной от внешней среды металлической поверхности оставляемой опалубки резко усиливает теплопотери. Надёжный метод прогрева с использованием нагревательного провода первоначально был опробован на опытном полигоне Усть-Илимской ГЭС. В производственных условиях шаг раскладки провода был принят равным 25 см из-за удобства монтажа провода по арматурной сетке (рис. 13).

С целью теплоизоляции верхней поверхности плиты можно использовать бумагу и слой опилок или найти другие решения (применение эффективных теплоизоляционных матов и т.п.).

Таким образом, в данном разделе на конкретных примерах рассмотрены схемы и параметры прогрева конструкций с помощью нагревательного изолированного провода.

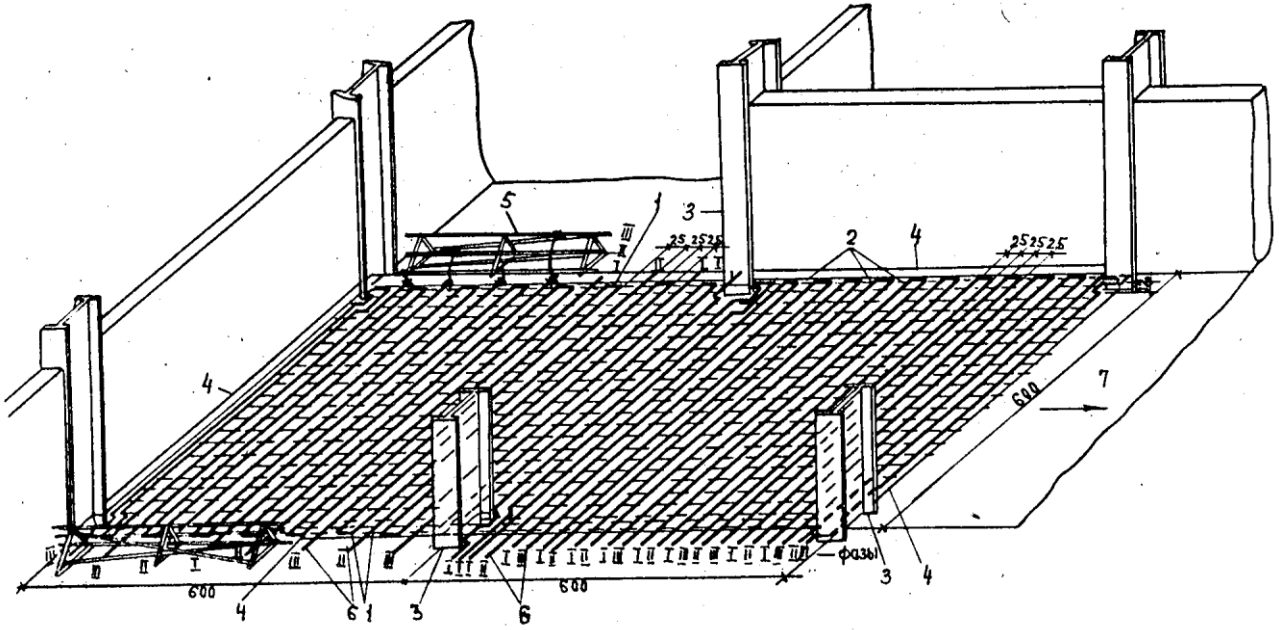


Рис. 13. Схема раскладки нагревательного провода по металлическому профилированному листу

Таблица 3.7

Основные параметры прогрева перекрытия по профлисту

Сезон	Площадь обогреваемой поверхности, $м^2$	Объём бетона, $м^3$	Модуль поверхности	Греющие элементы, шт.·м	Общая мощность, Вт	Нагруз-ка на пог. метр, Вт/ пог.м	Мощность на 1 $м^2$, $Вт/м^2$	Расход провода на 1 $м^3$, $м/м^3$
Осенне-весенний до - 15°С	74,9	4,32	17,3	7·18,5	8400	65	192	33,8
Зимний ниже - 15°С	74,9	4,43	17,3	12·12,2	14400	99	400	42,1

3.5. Порядок расчёта основных параметров прогрева

В качестве исходных данных для расчёта следует принимать следующие характеристики.

1. Марка (класс) бетона, $кгс/см^2$, МПа.
2. Требуемая прочность к моменту окончания прогрева, % R_{28}.
3. Вид и марка цемента.
4. Особенности бетонируемой конструкции: конфигурация бетонной поверхности; диаметр и расположение рабочей арматуры; вид основания и его температура на момент бетонирования.
5. Применяемая опалубка.
6. Применяемые средства утепления открытых горизонтальных поверхностей.
7. Прогнозируемая температура наружного воздуха на период бетонирования и выдерживания бетона.

После сбора исходных данных расчёт выполняется в следующем порядке:

– определение массивности бетонируемой конструкции путём расчёта модуля охлаждаемой поверхности, $м^{-1}$:

$$M_п = F / V , \qquad (17)$$

где F – площадь охлаждаемых поверхностей, $м^2$; V – объём бетона конструкции, $м^3$ если при бетонировании температура основания положительная, площадь его в расчёте M_n может не учитываться);

– определение требуемой удельной мощности прогрева $P^{тр}_{уд}$ на 1 $м^2$ для изотермической части режима прогрева по данным табл. 3.2 с учетом модуля поверхности и сезона бетонирования;

– определение параметров нагревательного провода по данным табл. 3.1 (выделяемая в процессе прогрева мощность равна или несколько выше требуемой $P^{выд}_{уд} \geq P^{тр}_{уд}$).

Как видно из табл. 3.1, одна и та же выделяемая мощность соответствует различным параметрам нагревательного провода.

При определении конкретных параметров провода некоторые характеристики могут быть заданы предварительными условиями (*p, d).* Длина провода, как правило, согласуется с размерами карты бетонирования и принимаемой схемой раскладки. Рекомендуется для изотермического прогрева назначать напряжение питания 50÷60 В.

Окончательным результатом определения параметров нагревательного провода для конкретной конструкции будет установление длины шага и схемы раскладки для фиксированных диаметра и удельного сопротивления стали, при которых сохраняется выполнение условия

$$P^{выд}_{уд} \geq P^{тр}_{уд}.$$

Повышение выделяемой удельной мощности на период разогрева достигается увеличением напряжения питания до 110 В.

Продолжительность режима выдерживания рассчитывается по скорости подъёма и температуре изотермического прогрева (см. п. 3.3). Общая продолжительность определяется в соответствии с рекомендациями, приведёнными в п. 1.4, в зависимости от требуемой прочности к моменту окончания прогрева.

3.6. Пример расчёта параметров прогрева изолированным нагревательным проводом монолитного столбчатого фундамента

Исходные данные:
Марка (класс) бетона – 200, В 15.
Требуемая прочность и моменту окончания прогрева – 50 % R_{28}.

Вид и марка цемента – портландцемент М 400.

Вид крупного заполнителя – гравий речной.

Особенности бетонируемой конструкции – конфигурация (см. рис. 8), рабочая арматура ∅ 20 мм, А - ||.

Основание – подготовка из песчано-гравийной смеси, промерзло (отрицательная температура).

Применяемая опалубка – деревянная щитовая, толщина доски – 40 мм.

Открытые горизонтальные поверхности после окончания бетонирования закрываются битуминизированной бумагой и засыпаются слоем опилок 10÷15 см.

Прогнозируемая температура наружного воздуха на период бетонирования и выдерживания бетона – (15÷30)^{o}C.

Модуль охлаждаемой поверхности 3,5 м$^{-1}$.

Основные параметры прогрева определяются по его рекомендуемой или требуемой удельной мощности (табл. 3.2).

В частности, для рассматриваемого примера «массивные фундаменты» требуемая удельная мощность для прогнозируемой температуры наружного воздуха – (15÷30) ^{o}C составит $P^{тр}_{уд}$ = 0,25÷0,28 кВт/м^2.

Далее следует назначить такие параметры прогрева, при которых $P^{выд}_{уд} \geq P^{тр}_{уд}$.

При определении выделяемой мощности следует учитывать удельное сопротивление материала применяемого провода и его диаметра или задавать указанные параметры.

В нашем примере зададимся удельным сопротивлением p = 0,236 Ом·мм^2/м и диаметром d = 2,0 мм.

По таблице 3.1 находим, что при напряжении питания 60 В, p = 0,236 Ом·мм^2/м, L = 20 м и шаге раскладки b = 0,30 м $P^{выд}_{уд}$ = 0,318 кВт/м^2 и при L = 24 м, в = 0,25 м $P^{выд}_{уд}$ = 265 Вт/м^2, что достаточно близко к требуемой мощности.

Следующим этапом является конструирование – раскладка провода по конструкции с учётом особенностей армирования и принятой длины и шага провода. На рис. 9 показана раскладка провода по монолитному фундаменту. Шаг раскладки провода зависит от места его положения в конструкции. Проектный шаг выдержан только в наиболее охлаждаемых частях фундамента, что позволяет получить некоторую экономию провода и электроэнергии. С тем

чтобы ускорить повышение температуры бетона, рекомендуется на период разогрева повысить напряжение питания до 110 В.

Расчёт режима выдерживания бетона проводится в соответствии с рекомендациями п. 3.3 и п. 1.4 (в нашем примере 50 % R_{28}) и по существу ничем не отличается от расчёта продолжительности прогрева любым методом.

Для монолитного фундамента с Mn = 3,5 необходимо учесть набор прочности бетона на стадии остывания (см. рекомендации п.1.4).

3.7. Температурное и прочностное поле конструкций

В разделе 1.3 указаны принятые допущения, которые используются при расчёте остывания бетона в конструкции и значительно упрощают решение задачи. В действительности температурное поле как прогреваемой, так и остывающей конструкции представляет достаточно сложную картину. Для него характерны зоны повышенной и пониженной температуры, которая зависит от координат рассматриваемой точки, массивности конструкции, применяемых мероприятий по теплозащите, источников внутренней энергии, параметров наружной среды и др. В последнее время появились работы в области технологии зимнего бетонирования, в которых рассматривается построение температурных и прочностных полей в процессе выдерживания конструкций [12, 26].

В основе определения параметров температурного поля лежит решение дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,\tau)}{\partial z^2}\right) + \frac{q(x,y,z,\tau)}{c\cdot\rho} + \frac{\omega(\tau)}{c\cdot\rho}, \quad (18)$$

где X, У, Z – пространственные координаты; τ – время; Т – температура бетона, Т = f(x,y,z,τ); С – удельная теплоёмкость бетона; ρ – плотность бетона; α – коэффициент температуропроводности бетона, α= λ/ (с ·ρ); λ – коэффициент теплопроводности; q(τ) – тепловой поток от нагревателей; ω (τ) – объёмное тепловыделение за счёт экзотермии цемента.

При решении уравнения теплопроводности для конкретной геометрической формы конструкции необходимо задать начальное и граничные условия, которые описывают взаимодействие между поверхностью конструкции и окружающей средой.

Прочностное поле отражает распределение прочности по объёму или сечению конструкции. Основными исходными данными для его построения являются состав бетона, вид цемента и температурный режим твердения, т.е. параметры температурного поля. Переход к прочности бетона от указанных исходных данных проводится по соответствующим зависимостям, в частности по формуле В.П. Ганина [8].

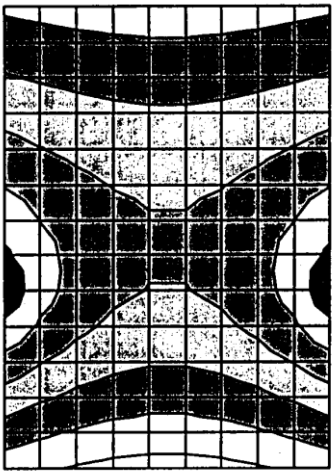
На примере монолитного перекрытия, бетонируемого в суровых условиях Севера, было определено температурное и прочностное поле по сечению перекрытия (в двухмерной системе координат) [23] с использованием в качестве источника тепла нагревательного провода, смонтированного внутри перекрытия (рис. 14).

Полученные в результате расчётов данные о различных сочетаниях факторов, влияющих на температуру и прочность бетона, позволяют получить всестороннюю оценку эффективности принятой технологии зимнего бетонирования на стадии проекта. Следует отметить, что сопоставление с практикой строительства остаётся окончательным критерием правильности полученных оценок.

4. МЕТОД ТЕРМОСА

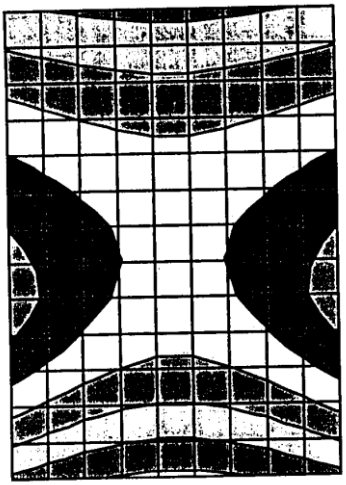
Для получения требуемой проектом прочности бетона применяют наиболее простой и экономичный метод термоса, основанный на принципе использования тепла, введённого в бетон при приготовлении бетонной смеси или её дополнительном подогреве до укладки в конструкцию, и экзотермического тепла, выделяемого цементом в процессе твердения бетона [19].

Общий запас тепла в бетоне должен соответствовать его потерям при остывании конструкции до набора бетоном заданной прочности.



□ 0-10 ▩ 10-20 □ 20-30 □ 30-40 ■ 40-50 □ 50-60
▩ 60-70 □ 70-80 ■ 80-90

а)



□ 0-10 ▩ 10-20 □ 20-30 □ 30-40 ■ 40-50
□ 50-60 ▩ 60-70 □ 70-80 ■ 80-90 ▩ 90-100

б)

Рис. 14. Поле при температуре окружающей среды – 30 ^{0}C:
а – температурное (температура, ^{0}C);
б – прочностное (прочность, % от R_{28})

Существенную роль в термосном выдерживании бетона играет утепление конструкции путём использования специальной «утеплённой» опалубки и теплоизоляции открытых горизонтальных поверхностей.

Целесообразность применения термосного выдерживания бетона определяется массивностью бетонируемой конструкции, видом цемента, температурой бетонной смеси, метеорологическими условиями (главным образом, температурой наружного воздуха и скоростью ветра) и допускаемой графиком работ продолжительностью выдерживания бетона.

Выполнение работ методом термоса рекомендуется при бетонировании массивных конструкций (модуль поверхности $M_п \leq 5$), а также в тех случаях, когда к бетону предъявляются повышенные требования по морозостойкости, водонепроницаемости и трещиностойкости, так как применение этого метода позволяет получить наиболее благоприятный режим твердения бетона в конструкциях.

При выдерживании бетонных и железобетонных конструкций методом термоса следует учитывать, что температурный режим зависит от следующих основных факторов: размеров и формы (массивности) конструкции; тепловой изоляции; экзотермии цемента; температуры бетона при его укладке; воздействий внешней среды (температуры наружного воздуха, скорости ветра).

При термостном выдерживании бетона решаются следующие задачи:

- определение продолжительности остывания бетона и величины набранной им за это время прочности при заданных термическом сопротивлении, изоляции, начальных и граничных условиях;
- распределение температуры бетона в конструкции в процессе остывания до момента распалубки для решения вопроса о термонапряжённом состоянии и обеспечении трещиностойкости конструкции.Продолжительность остывания бетона в значительной мере зависит от начальной температуры бетонной смеси $t^{нач}_{бет.}$

Повышение температуры бетонной смеси при её приготовлении в зимнее время ограничено, с одной стороны, возможностями бетоносмесительных установок и, с другой стороны, необходимостью сохранения подвижности бетонной смеси до момента укладки.

Практика строительства в суровых условиях Севера показала, что температура бетонной смеси на выходе из бетономешалки в

наиболее холодные периоды зимы в лучшем случае достигает +(15÷20) ^{0}C.

С учётом потерь тепла в процессе транспортировки и укладки бетонной смеси температура ее в слое составит +10÷12^{0}C, а иногда и ниже. Такого запаса тепла недостаточно для набора прочности в короткие сроки.

Дополнительный электроразогрев смеси в бадье до + 50÷70 ^{0}C непосредственно перед укладкой явился логическим развитием метода термоса [4]. При дополнительном разогреве важно обеспечить кратковременность прогрева, чтобы избежать резкого загустевания бетонной смеси, что связано с необходимостью соответствующей кратковременной подачи достаточно большого количества электроэнергии. Кроме того, бетонная смесь должна быть подвижной, чтобы её удельное электрическое сопротивление было достаточно низким и подогрев мог осуществляться на приемлемом напряжении питания.

Переход от электроразогрева в бадьях к разогреву в кузовах автомобилей самосвалов получил название электроимпульсивного бетонирования, сущность которого заключается в создании мощного электротеплового импульса до уплотнения бетонной смеси [29]. И в этом случае требуется значительная электрическая мощность и подвижная бетонная смесь. Кроме того, перевозка бетонной смеси в автосамосвалах практически вытеснена автобетоносмесителями.

Дальнейшая адаптация электроразогрева к меняющимся условиям производства бетонных работ отразилась в предложении технологии виброэлектробетонирования, сущность которой заключается во внесении мощного электротеплового импульса в бетонную смесь, перемещаемую по вибролотку, и реализации идеи синэнергобетонирования [29].

Остывание конструкции, рассмотренное в п. 1.3, предполагает ее равномерное (по объёму) температурное поле. В реальных условиях имеет место неравномерное остывание, особенно ярко это проявляется в массивных конструкциях, где периферийные наиболее охлаждаемых части остывают значительно раньше центральной ядровой части (рис. 15).

Кроме того, что периферийные поверхности, особенно углы и грани, остывают быстрее и к моменту достижения 0 ^{0}C имеют пониженную прочность, перепад температуры «ядро-грань» приводит к появлению внутренних напряжений, которые в определённых

условиях могут привести к образованию трещин. Вопросы трещиностойкости массивных бетонных конструкций подробно рассмотрены в гидротехническом строительстве [24], однако аналогичная задача обеспечения трещиностойкости конструкций массивных фундаментов, в частности турбоагрегатов, может иметь место и в промышленном строительстве [21].

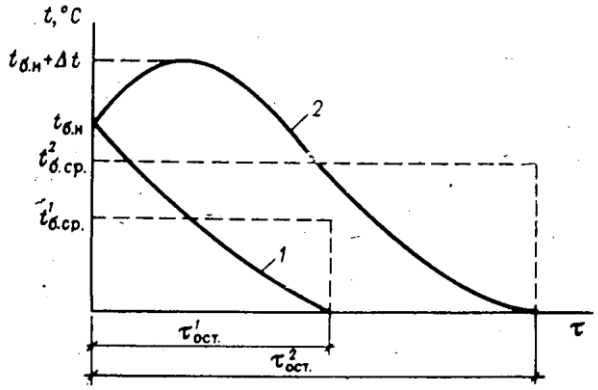


Рис. 15. Схема изменения температуры бетона для массивной конструкции, выдерживаемой по методу термоса:
1 - для точек, расположенных на периферии;
2 - для точек, расположенных в центре

На практике учёт неравномерного остывания осуществляется путём замера температуры бетона в наиболее охлаждаемых точках и, если это необходимо по соображениям набора прочности, принимаются меры по активному обогреву (в частности методами электротермообработки) локальных участков конструкции.

5. БЕТОНИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТИВОМОРОЗНЫХ ДОБАВОК

5.1. Процесс твердения и свойства бетонов с противоморозными добавками

Возможность производства бетонных работ на морозе без подогрева материалов и последующего обогрева уложенного бетона основана на том, что при введении в состав бетонной смеси некоторых веществ (противоморозных добавок) при отрицательных температурах сохраняется жидкая фаза. Благодаря этому минералы портландцемента могут гидратироваться, обеспечивая тем самым твердение бетона на морозе [20].

Понижение температуры замерзания воды обусловлено тем, что при растворении происходит химическое взаимодействие противоморозных добавок с водой. В результате этого образуются сольваты - более или менее прочные соединения частиц растворенного вещества с молекулами воды, например, ионов Na^+ и NO^-_2 при растворении нитрита натрия. Чтобы превратить воду раствора в лёд, необходимо затратить энергию не только на замедление движения молекул воды, но и на разрушение сольватов.

Количество связываемых с каждой частицей растворённого вещества молекул воды, т.е. состав сольватов, и сила этой связи зависят от свойств растворённого вещества, главным образом, от электрических свойств частиц, их размеров и сочетаний, а также от содержания частиц в единице объёма воды, т.е. от концентрации раствора. Поскольку при увеличении концентрации всё большая часть воды оказывается связанной, температура замерзания раствора понижается. Но при этом в нём всё меньше содержание «свободных» молекул воды, способных к взаимодействию с минералами цемента.

Вследствие образования сольватов вода в растворах замерзает постепенно, по мере охлаждения. При охлаждении, например, растворов нитрита натрия с концентрацией менее 28 % из них начнёт выкристаллизовываться «пресный» лёд, как только температура растворов достигнет значений, расположенных на кривой ОА (рис.16). С этого момента по мере дальнейшего охлаждения раствора из него будет кристаллизоваться «пресный» лёд, а концентрация раствора будет увеличиваться по кривой ОА. По достижении точки А, называемой эвтектической, когда концентрация рас-

твора составит 28%, а температура – минус 19,6 ^{0}C, оставшаяся в нём вода полностью перейдёт в твёрдую фазу, образуя смесь льда и кристаллов $NaNO_2 \cdot 2H_2O$.

Если концентрация растворов нитрита натрия более 28%, то в процессе охлаждения она, наоборот, уменьшается за счёт выкристаллизовывания $NaNO_2 \cdot 2H_2O$. Концентрация будет изменяться по кривой BA, а замерзание раствора также произойдёт в эвтектической точке A с образованием льда и кристаллов $NaNO_2 \cdot 2H_2O$. Эвтектическая точка для растворов каждой добавки постоянна и не зависит от исходной концентрации. Но последняя определяет, какое количество льда или избытка растворенного вещества выкристаллизуется из раствора до эвтектической точки, какое количество льда образуется при полном замерзании раствора.

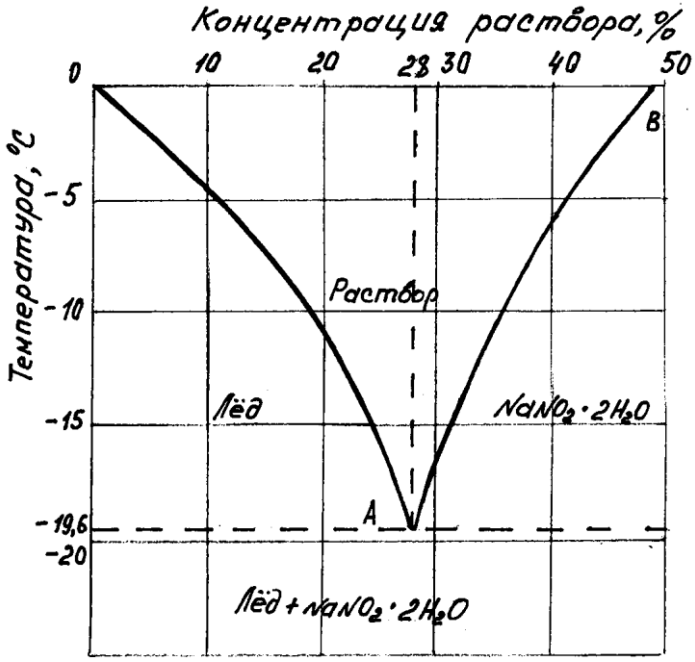


Рис. 16. Диаграмма состояния водных растворов нитрита натрия при температурах ниже 0 ^{0}C

Таким образом, предел понижения температуры замерзания воды той или иной противоморозной добавкой ограничен эвтектической точкой её растворов. Обычно рекомендуемый температурный предел применения добавки назначается выше эвтектической температуры её растворов. Нитрит натрия, например, рекомендуется применять, как правило, при температуре бетона не ниже – 15 ^{0}C при эвтектической температуре растворов этой соли – 19,6 ^{0}C. Обусловлено это тем, что с повышением концентрации раствора уменьшается в нём содержание «свободных» молекул воды, способных взаимодействовать с минералами цемента.

Указанное обстоятельство является причиной того, что в бетон противоморозные добавки вводятся в меньших количествах, чем это необходимо для образования полностью не замерзающей жидкой фазы при той или иной расчётной температуре твердения бетона. Переход в лёд до 30–50 % воды затворения при охлаждении бетона с обычно назначаемым количеством добавки до расчётной температуры не сказывается отрицательно на его свойствах, в то время как повышение концентрации раствора сверх оптимальной приводит к замедлению твердения бетона.

Кроме того, противоморозные добавки оказывают очень важное влияние на механические показатели льда: он характеризуется дефектной структурой, малой прочностью, чешуйчатым строением и не вызывает заметных нарушений структуры бетона. В отличие от этого, льдообразование в бетоне без добавок на ранней стадии его твердения сопровождается существенным снижением его механических показателей и долговечности.

Кроме своего основного назначения – снижать температуру замерзания воды – противоморозные добавки участвуют в процессах гидратации цемента, изменяют растворимость минералов цемента и образующихся гидратных соединений, а также влияют на стабильность последних. Вещества, применяемые в качестве противоморозных добавок, различным образом влияют на свойства воды и по-разному участвуют в процессах гидратации и твердения.

Противоморозные добавки по механизму действия условно можно разделить на две группы. К первой из них относятся вещества, понижающие температуру замерзания жидкой фазы бетона и являющиеся либо слабым ускорителем, либо слабым замедлителем схватывания и твердения бетона, т.е. практически не влияющие на

скорость структурообразования. К этой группе относятся хлорид и нитрит натрия, а также мочевина.

Указанные добавки обеспечивают твердение бетона на морозе главным образом за счёт сохранения в нем незамерзающей жидкой фазы. Незначительно изменяя скорость схватывания, добавки первой группы могут применяться в тех случаях, когда время транспортирования бетонной смеси достаточно велико. Однако бетон с этими добавками медленно набирает прочность в раннем возрасте, что часто является нежелательным.

Ко второй группе противоморозных добавок относятся такие, которые ускоряют схватывание и твердение, а их растворы имеют достаточно низкую эвтектическую температуру. К этим добавкам принадлежат поташ (эвтектическая температура –36,5 ^{0}C), хлорид кальция (–55 ^{0}C), нитрат кальция (–28,2 ^{0}C), нитрит- нитрат кальция (–29,6 ^{0}C). Ускорение твердения бетона вызывается главным образом тем, что эти добавки изменяют растворимость силикатных составляющих цемента и образуют с продуктами его гидратации двойные или основные соли.

Нитриты натрия и кальция являются ингибиторами коррозии стали в бетоне, но могут вызывать коррозионное растрескивание термически упрочнённой стали. Нитрат кальция и поташ являются нейтральными добавками по отношению к арматуре, а хлориды натрия и кальция резко интенсифицируют процесс коррозии стали во влажных условиях при доступе кислорода воздуха. Агрессивность хлористых солей в отношении арматуры и технологического оборудования при одновременном присутствии в растворе нитрит-ионов уменьшается, причём при соотношении по массе между нитритом натрия или нитрит – нитратом кальция и хлоридом кальция не менее 1:1 ионы хлора становятся практически неопасными в отношении стальной арматуры. Таким влиянием добавок на арматуру и определяется область применения бетонов с противоморозными добавками в железобетонных конструкциях (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Область применения бетонов с противоморозными добавками

№ п. п	Тип конструкций и условия их эксплуатации	Добавки					
		ХК + ХН	НКМ, НК+М, ННК+М	ХК + НН	ННХК, ННХК+ М	НН	П
1	Предварительно напряжённые конструкции, кроме указанных в поз.2, стыки (каналы) борно-монолитных и сборных конструкций	-	-	-	-	+	-
2	Предварительно-напряжённые конструкции, армированные сталью классов Ат-IV, Ат-V, Ат-VI, А- IV и А-V	-	-	-	-	-	-
3	Железобетонные конструкции с ненапрягаемой рабочей арматурой диаметром: более 5мм 5 мм и менее	- -	+ +	+ -	+ -	+ +	+ +
4	Железобетонные конструкции, а также стыки без напрягаемой арматуры сборно-монолитных и сборных конструкций, имеющие выпуски арматуры или закладные детали:						
	без специальной защиты стали	-	+	-	-	+	+
	с цинковыми покрытиями по стали	-	-	-	-	+	-
	с алюминиевыми покрытиями по стали	-	-	-	-	-	-
	с комбинированными покрытиями (щелочестойкими лакокрасочными или другими щелочестойкими защитными слоями по металлизационному подслою)	-	+	-	-	+	+

Примечания: + – означает «допускается»; - – означает «не допускается»; П – поташ; НН – нитрит натрия; НКМ – нитрат кальция с мочевиной; ННХК – нитрит- нитрат- хлорида кальция; ХК+ХН – хлорид кальция в сочетании с хлоридом натрия; ХК+НН – хлорид кальция в сочетании с нитритом натрия; НК+М – нитрат кальция в сочетании с мочевиной; ННК+М – нитрит-нитрата кальция в сочетании с мочевиной; ННХК+М – нитрит-нитрат-хлорида кальция в сочетании с мочевиной.

5.2. Выбор добавок и назначение их количества

Выбирать противоморозные химические добавки следует с учётом следующих факторов:

- вид конструкции;
- условия эксплуатации конструкций;
- прогнозируемые погодные условия на период твердения бетона в конструкции;
- требуемые темпы строительства и др.

Рекомендуемый вид конструкций для возведения из бетона с использованием противоморозных добавок предопределяет метод выдерживания бетона до набора проектной прочности (табл. 5.2) в зависимости от температуры наружного воздуха.

Таблица 5.2

Рекомендуемый вид конструкций для возведения из бетонов с противоморозными добавками

Модуль поверхности конструкции $M_п$	Наименование конструкции	Средняя температура воздуха за период выдерж., ^0C	Метод выдерживания бетона до набора им прочности, % от проектной				
			20–30	50–70 в сроки		80–100 в сроки	
				28 сут. и менее	более 28 сут.	28 сут. и менее	более 28 сут.
1	2	3	4	5	6	7	8
4–8	Фундаменты под здания, колонны и оборудование, колонны сечением 50–70 см, балки высотой 50–70 см, стены и плиты толщиной 25–50 см	до –25	1	1; 2	1; 2	2	1; 2
		ниже –25	1; 2	2; 3	2	2; 3	2

Окончание табл. 5.2

1	2	3	4	5	6	7	8
8–12	Рамные конструкции, колонны сечением 30–40 см, балки высотой 30–40 см, стены и плиты толщиной 20–25 см, дорожные и другие наземные покрытия толщиной 20–25 см	до –25	1; 2	1; 2; 3	1; 2	2; 3	1; 2
		ниже –25	2; 3	2; 3	2	3	2
12–16	Монолитные участки сборно-монолитных конструкций, стыки сборных конструкций, наземные покрытия толщиной 10–15 см	до –25	1; 2; 3	2; 3	1; 2	2; 3	1; 2
		ниже –25	2; 3	3	2	3	-
свыше 16	Стыки сборных конструкций	до –25	1; 2; 3	2;3	1; 2	3	1;2
		ниже –25	3	3	-	3	-

Примечание. Цифрами обозначены следующие методы выдерживания бетона: 1 – без специального утепления; 2 – в сочетании с методом термоса; 3 – в сочетании с электропрогревом (обогревом).

При выборе противоморозной добавки целесообразно руководствоваться следующими положениями.

1. Бетон с противоморозными добавками допускается применять, если во время выдерживания до приобретения критической прочности температура бетона с максимально допускаемыми дозировками добавок не опустится ниже:

– 15 ^{0}С при применении добавки НН;

– 20 ^{0}С при применении добавок ХК + ХН, НК + М, НКМ, ННК+М;

– 25 ^{0}С при применении добавок П, ХК+НН, ННХК, ННХК+М.

2. Прочность бетона в зависимости от добавки, продолжительности твердения и расчётной температуры ориентировочно достигает значений, приведённых в табл. 5.3, а после 28-суточного выдерживания при температурах выше 0 ^{0}С бетон, как правило, приобретает проектную прочность. Данные табл. 5.3 для выбранной добавки должны уточняться применительно к используемому на стройке цементу, так как темп твердения бетона с добавками зависит от вида и состава цемента.

3. Бетонные смеси с добавками НН и ХК+НН и температурой 15–20 ^{0}С, как правило, хорошо укладываются и характеризуются обычными сроками загустевания (начало – 2,0–2,5 ч, конец – 4–8 ч); смеси с более низкими температурами, особенно ниже 5 ^{0}С, имеют более длительные сроки загустевания (начало – 5–7 ч, конец – 11–30 ч); вследствие этого они не вызывают осложнений при транспортировании.

4. Бетонные смеси с добавками НКМ, НК+М, ННК+М, ХК+ХН, ННХК, ННХК+М и особенно П характеризуются ускоренными и весьма короткими сроками загустевания, мало зависящими от температуры (начало – 0,1–2,0 ч, конец – 0,2–4,0 ч). Поэтому одновременно с указанными противоморозными добавками в состав бетонной смеси, как правило, должна вводиться добавка, эффективно замедляющая схватывание бетонной смеси. Из известных замедлителей используется ЛСТ в повышенных дозировках, тетраборат натрия ТН или жидкое стекло ЖС в сочетании с адипинатом натрия ПАЩ-1. В настоящее время появились предложения по использованию патентованных противоморозных добавок с приемлемыми сроками схватывания бетонной смеси.

Назначение оптимального количества противоморозной добавки имеет важное значение, так как при недостаточном её количестве может произойти преждевременное замерзание бетона (при охлаждении в более низкой температуре, чем та на которую рассчитано введенное в смесь количество противоморозной

добавки), а при избыточном количестве темп твердения бетона может замедлиться; кроме того, неоправданно увеличивается его стоимость.

Таблица 5.3

Нарастание прочности бетона с противоморозными добавками на портландцементах

Добавки	Расчётная температура твердения бетона, ^{0}С	Прочность, % от проектной, при твердении на морозе за период, сут.			
		7	14	28	90
НН	- 5	30	50	70	90
	- 10	20	35	55	70
	- 15	10	25	35	50
ХК+ХН	- 5	35	65	80	100
	- 10	25	36	45	70
	- 15	15	25	35	50
	- 20	10	15	20	40
НКМ НК+М, ННК+М	- 5	30	50	70	90
	- 10	20	35	50	70
	- 15	15	25	35	60
	- 20	10	20	30	50
ННХК, ННХК+М, ХК+НН	- 5	40	60	80	100
	- 10	25	40	50	80
	- 15	20	35	45	70
	- 20	15	30	40	60
	- 25	10	15	25	40
П	- 5	50	65	75	100
	- 10	30	50	70	90
	- 15	25	40	65	80
	- 20	25	40	55	70
	- 25	20	30	50	60

Замораживание бетона в раннем возрасте отрицательно влияет на его свойства после оттаивания вследствие необратимого разрушающего воздействия замёрзшей жидкой фазы на структуру, в то время как замораживание бетона после набора им критической

прочности не оказывает столь существенного влияния на его конечную прочность.

Поэтому при назначении количества добавки прежде всего следует исходить из расчётной температуры твердения бетона: вводимое количество противоморозной добавки должно предохранять бетон от замораживания до набора им прочности менее критической (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Продолжительность выдерживания бетона с противоморозными добавками до набора критической прочности

Добавки	Расчётная температура твердения бетона, ^{0}С	Время выдерживания, сут., при марке бетона		
		М200	М300	М400
НН	- 5	7	6	4
	- 10	12	9	7
	- 15	19	14	11
ХК+ХН	- 5	6	5	4
	- 10	9	7	5
	- 15	19	14	10
	- 20	58	45	28
НКМ НК+М, ННК+М	- 5	7	6	5
	- 10	12	9	7
	- 15	19	14	10
	- 20	28	19	14
ННХК, ННХК+М, ХК+НН	- 5	5	4	3
	- 10	9	7	5
	- 15	11	9	7
	- 20	14	11	9
	- 25	40	28	20
П	- 5	3	2	1
	- 10	7	5	4
	- 15	9	7	5
	- 20	9	7	5
	- 25	14	10	7

Далее необходимо проверить возможность получения требуемой прочности к моменту окончания твердения бетона с выбранным количеством добавки, которая зависит от расчётной температуры бетона и продолжительности твердения (табл. 5.4). При этом

требующаяся продолжительность твердения до получения указанной в проекте или нормативных документах требуемой прочности % R_{28} может оказаться достаточно большой и не обеспечить приемлемых темпов бетонирования, что потребует привлечения других методов.

Выбор и назначение оптимального количества противоморозной добавки становится многофакторной задачей, решение которой зависит не только от рассмотренных выше особенностей влияния добавок на прочность и другие свойства бетона, но и от реальной обстановки на строительной площадке, возможности выбора добавки, способа её введения в бетонную смесь и др.

5.3. Постановка и решение задачи выбора противоморозной добавки

Постановка задачи выбора противоморозной добавки предполагает сбор исходных данных, необходимых для оценки условий бетонирования, особенностей возводимой конструкции с точки зрения её массивности, вида применяемой опалубки, требуемых темпов бетонирования и др. факторов.

За исходные принимаются следующие основные показатели:

1) прогнозируемая температура наружного воздуха на период твердения бетона в конструкции;

2) данные по бетону:

- класс (марка), МПа (кгс/см^2);
- вид цемента;
- требуемая прочность к моменту окончания твердения в конструкции, % R_{28} и допустимая, исходя из темпов ведения работ, продолжительность выдерживания до получения указанной прочности, сутки;
- 3) особенности возводимой конструкции и условий её эксплуатации (в соответствии с табл. 5.1):
- тип конструкции;
- класс и диаметр рабочей арматуры;
- наличие или отсутствие предварительного напряжения;
- защита закладных деталей;
- степень агрессивности среды эксплуатации;

4) данные по опалубке: конструкция опалубки и соответствующий коэффициент теплопередачи (табл. 1.5).

Учёт условий реальной строительной площадки имеет смысл в случае внедрения той или иной добавки в производство. При этом важно определить способ и место введения добавки в бетонную смесь, в особенности – влияние ее на технологические параметры бетонной смеси, т.к., например, быстрое загустевание смеси с добавкой может оказаться совершенно неприемлемым для технологии, в которой применяется обычный бетон.

Кроме того, на первый план могут выйти вопросы стоимости, снабжения, готовности к централизованным поставкам и др. Так, в Братскгэсстрое в восьмидесятые годы удалось внедрить в промышленных масштабах на Усть-Илимской строительной площадке только добавку нитрита натрия, которая не ускоряла схватывание цемента и в то же время придавала бетону и раствору весьма полезные дополнительные качества, свойственные «холодным» бетонам. Впоследствии бетон и раствор с противоморозными добавками потеряли свою конкурентоспособность из-за неоправданно высокой стоимости самих добавок и остановки их ближайшего производства в г. Ангарске. Видимо, без радикального изменения экономической ситуации в строительстве рассчитывать на широкое внедрение противоморозных добавок в Северном регионе пока невозможно.

В качестве примера рассмотрим выбор противоморозной добавки для безобогревного бетонирования фундамента под металлическую колонну.

Исходные данные:

Бетон В15 (марки «200»).

Портландцемент марки «400».

Требуемая прочность к моменту окончания твердения не менее 50 % R_{28}.

Допустимая продолжительность выдерживания исходя из требуемых темпов работ не более 7 сут.

Особенности возводимой конструкции:

Фундамент с модулем охлаждаемой поверхности $M_1 = 5$ (основание не промерзло).

Ненапрягаемая рабочая арматура класса А-II, диаметр более 5 мм.

Закладные детали без специальной защиты.

Окружающая воздушная среда не агрессивна.

Данные по опалубке:

Опалубка деревянная, из доски толщиной 40 мм, с соответствующим коэффициентом теплопередачи 3,6 Вт/м^2 ^{0}С при принятой для данного примера скорости ветра 5 м/с.

Защита открытых бетонных поверхностей: горизонтальные неопалубленные поверхности укрываются битуминизированной бумагой и слоем опилок толщиной около 10 см, при этом полагаем, что коэффициент теплопередачи по указанному утеплению равен теплопередаче через опалубку.

Выбор вида противоморозной добавки проводим в следующей последовательности:

1. В соответствии с табл. 5.1 определяется перечень добавок, применение которых допускается в бетоне для рассматриваемого фундамента: НКМ, НК+М, ННК+М, НН и П.

Наиболее распространёнными добавками являются НН и П, которые и рассмотрим более подробно.

2. Рекомендуемый метод выдерживания бетона выбирается исходя из при следующих условий: температура наружного воздуха до – 25 ^{0}С; как уже отмечалось в исходных данных, относительная прочность 50 % R_{28}, срок выдерживания – 7 сут.

В соответствии с данными табл. 5.2 рекомендуется выдерживать бетон без специального утепления или в сочетании с методом термоса. Уточнение режима и требуемого утепления будет сделано после расчёта, поэтому остановимся на указанном в исходных данных утеплении конструкций, которое общепринято в практике строительства.

3. Количество противоморозной добавки зависит от расчётной температуры твердения бетона (не ниже – 15 ^{0}С для НН и – 25 ^{0}С для П), определить которую помогут рекомендации раздела 1.3. Зададимся начальной температурой бетона в конструкции $t_{б.н.}$ = +10 ^{0}С, что вполне соответствует практике северных строительных площадок, где зимний бетон готовится только на подогретых воде и заполнителях. По формуле (6) $t_{б.ср.}$ зависит от массивности (модуля охлаждаемой поверхности) и $t_{б.к.}$, которая нам неизвестна. Поэтому зададим следующее соответствие между конечной температурой остывшего бетона и температурой наружного воздуха:

Таблица 5.5

$t_{н.в.}$	-5 ^{0}C,	-10 ^{0}C,	-15 ^{0}C,	-20 ^{0}C,	-25^{0}C
$t_{б.к.}$	-5 ^{0}C,	-10 ^{0}C,	-15 ^{0}C,	-20 ^{0}C,	-25^{0}C

Бетон остывает до температуры наружного воздуха.

Напомним, что средняя температура определяется по формуле

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

После соответствующих расчётов полученные данные сведём в табл. 5.6, отражающую связь между температурой наружного воздуха и температурой бетона независимо от вида добавки.

Таблица 5.6

$t_{н..в.}$ ^{0}C	- 5	- 10	- 15	- 20	- 25
$t_{б.ср.}$, ^{0}C	2,6	0	- 2	- 4,95	- 7,3

Затем выполним расчёт продолжительности остывания без учёта экзотермии по формуле

$$\tau = \frac{C \cdot \gamma \cdot (t_{б.н.} - t_{б.к.})}{3{,}6 \cdot K \cdot M_1 \cdot (t_{б.ср.} - t_{н.в.})}, \text{ ч.}$$

Указанная зависимость справедлива при размерностях: γ в кг/м^3; С в кДж/кг ^{0}C; К в Вт/м^2 · ^{0}C; температура в ^{0}C.

Примем по соответствующим табличным данным γ = 2500 кг/м^3, С = 0,84 кДж/кг · ^{0}C (табл. 1.6), К = 3,6 Вт/м^2·^{0}C при скорости ветра 5 м/с (табл. 1.5) и проведём расчёт продолжительности остывания без учёта экзотермии (табл. 5.7).

В связи с тем что учёт тепловыделения при положительных температурах бетона не применим для рассматриваемого примера, воспользуемся рекомендацией, приведённой в руководстве по применению бетонов с противоморозными добавками, в которой тепловыделение учитывается членом

$$+ \alpha \text{ Ц Э}R,$$

где α – коэффициент интенсивности тепловыделения, 1 / %; Ц – расход цемента на 1 м^3 бетона, кг; Э – тепловыделение 1 кг цемента за 28 сут. твердения при 20 ^{0}C, кДж/кг; R – прочность, наби-

раемая бетоном за время остывания бетона, % от марочной. Соответствующие величины α и Э приведены в табл. 5.8, 5.9.

Таблица 5.7

$t_{н.в.} = t_{б.к.}$	Продолжительность остывания τ, ч
- 5	$\frac{0{,}84 \cdot 2500\ (10 + 5)}{3{,}6 \cdot 3{,}6 \cdot 4{,}5\ (2{,}6 + 5)} = \frac{31500}{443{,}23} = 71{,}1$
- 10	$\frac{0{,}84 \cdot 2500\ (10 + 10)}{3{,}6 \cdot 3{,}6 \cdot 4{,}5\ (0 + 10)} = \frac{42000}{583{,}2} = 72$
- 15	$\frac{0{,}84 \cdot 2500\ (10 + 15)}{3{,}6 \cdot 3{,}6 \cdot 4{,}5\ (-2{,}5 + 15)} = \frac{52500}{729} = 72$
- 20	$\frac{0{,}84 \cdot 2500\ (10 + 20)}{3{,}6 \cdot 3{,}6 \cdot 4{,}5\ (-4{,}95 + 20)} = \frac{63000}{877{,}7} = 72$
- 25	$\frac{0{,}84 \cdot 2500\ (10 + 25)}{3{,}6 \cdot 3{,}6 \cdot 4{,}5\ (-7{,}3 + 25)} = \frac{73500}{1032{,}2} = 71{,}2$

Таблица 5.8

Коэффициент интенсивности тепловыделения α, 1 / %

$t_н - t_к$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
α	0,01	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019

Таблица 5.9

Тепловыделение цементов Э за 28 сут. твердения при 20^0С, кДж/кг

Портландцемент марки		
М400	М500	М600
335	337	419

Для расчёта тепловыделения по указанной рекомендации необходимо определить прочность за время остывания R (% от 28-дневной), которая, в свою очередь, зависит от времени остывания и особенно от вида противоморозной добавки. Определим тепловыделение для бетона с добавкой НН и П отдельно. Так как экзотермическое тепловыделение увеличит срок продолжительности остывания, заранее увеличим его примерно на сутки, т.е. вместо рассчитанных без учёта тепловыделения трёх (72 часа) назначим четверо суток.

Приняв по табл. 5.6 температуру наружного воздуха минус 15 ^{0}С, $t_{б.ср.}$= –2 ^{0}С и продолжительность остывания около 4 суток,

путём экстраполяции определяем прочность бетона с добавкой: НН – R = 20÷25 % R_{28} (по табл. 5.3).

Для бетона с добавкой П соответственно R = 30÷35 % R_{28}.

При температуре наружного воздуха минус 25 ^{0}C $t_{б.ср.}$= –7,3 ^{0}C и соответствующая прочность бетона за время остывания с добавкой НН – R = 10÷15 % R_{28}, с добавкой П – R = 15÷20 % R_{28}.

Тепловыделение бетона с добавкой НН составит:

$t_{б.ср.}$ = – 2 ^{0}C, α = 0,014 ($t_{перепада}$ = 25 ^{0}C), Ц = 250 кг/м^3,
R = 22 %, Э = 335 кДж/кг,
+αЦЭR = + 0,014 · 250 · 335· 22 = 25 795 кДж/м^3,
$t_{б.ср.}$ = – 7,3 ^{0}C, α = 0,016 ($t_{перепада}$ = 35 ^{0}C), R = 12 %,
– 0,016 · 250 · 12 · 335 = 16 080 кДж/м^3.

Тепловыделение бетона с добавкой П составит:

$t_{б.ср.}$ = – 2 ^{0}C, α = 0,014, R = 32 %,
– 0,014 · 250 · 32 · 335 = 37 520 кДж/м^3,
$t_{б.ср.}$ = -7,3 ^{0}C, α = 0,016, R = 17 %,
– 0,016 · 250 · 17 · 335 = 22 780 кДж/м^3.

Внесём соответствующие поправки в расчёт продолжительности остывания:

Таблица 5.10

$t_{н.в.}$	Добавка	Продолжительность остывания τ
– 15 ^{0}C	НН	$\tau = \frac{52500 + 25795}{729}$ = 107,4 час= 4,5 сут.
	П	$\tau = \frac{52500 + 37520}{729}$ = 123,5 час= 5,1 сут.
– 25 ^{0}C	НН	$\tau = \frac{73500 + 16080}{1032,2}$ = 87 час= 3,6 сут.
	П	$\tau = \frac{73500 + 22780}{1032,2}$ = 93 час= 3,9 сут.

Таким образом, выделяемое экзотермическое тепло может существенно повлиять на продолжительность остывания данной относительно массивной конструкции. Соответствующее увеличение сроков остывания зависит от вида добавки, температуры твердения бетона и может составить от 0,60 до 2,25 и более суток.

Однако вернёмся к решению поставленной задачи: при какой температуре наружного воздуха могут быть выполнены требования получения прочности 50 %R_{28} для бетона с добавкой НН и П не более чем за 7 суток?

Режим твердения бетона рассматриваемого фундамента в зависимости от температуры наружного воздуха имеет следующие характеристики (табл. 5.11).

Таблица 5.11

Режим остывания

$t_{н.в}$	$t_{б.н.}$	Вид добавки	Продолжительность остывания, сут. (до $t_{н.в.} = t_{б.к}$)	$t_{б.ср.}$ за период остывания	Продолжительность твердения при $t_{б.к.}$, сут	Всего суток.
–15 ^{0}C	+10 ^{0}C	НН	4,50	– 2 ^{0}C	2,40	7
		П	5,10		1,75	7
–25 ^{0}C	+10 ^{0}C	НН	3,60	– 7,3 ^{0}C	3,40	7
		П	3,90		3,10	7

Прочность бетона определяется по продолжительности и температуре соответствующего промежутка времени (табл. 5.3).

Как видно из таблицы 5.12 для бетона с НН $t_{н.в.}$ = – 15 ^{0}C ниже предельной, т.к. прочность не достигла требуемых 50 %. Поэтому даже без уточняющих расчётов можно считать $t_{н.в.}$ = – 10 ^{0}C предельной для выполнения поставленных требований к бетону.

В соответствии с проведёнными расчётами для бетона с добавкой П при $t_{н.в.}$ = – 15 ^{0}C выполняются поставленные требования по прочности с небольшим запасом.

Таблица 5.12

Прочность бетона в течение 7 сут. твердения

$t_{н.в.}$	Вид добавки	Прочность % R_{28} за время		Всего за 7 сут.
		остывания	дополнит.	
– 15 ^{0}C	НН	30÷35	до 5	35÷40
	П	45÷50	5÷10	50÷60
– 25 ^{0}C	НН	10÷12	-	10÷12
	П	20÷ 25	10	30÷35

Выполненные по принципу теплового баланса расчёты позволяют почувствовать влияние на режим остывания (и соответствующее нарастание прочности) таких основных факторов, как температура наружного воздуха, температура бетона, эффективность теплоизоляции конструкции, состав бетона и вид цемента и др.

Вместе с тем не следует забывать о приближённости расчётов, не учитывающих особенностей неравномерного температурного поля конструкции и наличия быстро охлаждаемых мест. В частности, для рассматриваемой конструкции такими местами будут наружные поверхности и особенно интенсивно охлаждаемые углы и грани фундамента, температурный режим которых может существенно отличаться от рассчитанного по принципу теплового баланса, предполагающего равномерное остывание бетона. На практике именно в таких местах организуется наблюдение за температурой бетона, с тем чтобы была обеспечена как минимум критическая прочность.

6. ПРИГОТОВЛЕНИЕ БЕТОННОЙ СМЕСИ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

С процесса приготовления бетонных смесей начинается общий технологический процесс изготовления бетонных и железобетонных монолитных конструкций. Суровые климатические условия и трудности освоения северных районов нашей страны, отсутствие резервов рабочей силы, с одной стороны, и необходимость быстрого и экономически эффективного строительства – с другой, определяют постановку задачи поиска оптимальной технологии приготовления бетона.

Практика эксплуатации бетоносмесительных установок показала, что наиболее успешно в условиях сурового климата работают полностью утеплённые установки башенного типа с силосными складами заполнителей. Такая технологическая схема и соответствующая компоновка обеспечивают надёжную работу, возможность полной автоматизации и хорошие условия труда. Необходимость утепления распространяется на подсилосные галереи цементного склада и другие помещения, в которых по условиям труда и эксплуатации оборудования требуются положительные температуры.

В то же время установки небольшой производительности, работающие на временных строительных площадках, чаще всего имеют партерную схему, бункерные склады с паровыми регистрами и утеплённые помещения основного назначения.

Наибольшие трудности представляет использование природных заполнителей.

Существуют две основные проблемы использования природных заполнителей в суровых климатических условиях:

– смерзаемость и связанные с ней трудности приёмки и подачи заполнителей на заводы;

– подготовка заполнителей, которая сводится в основном к подогреву с целью обеспечения требуемой положительной температуры бетонной смеси.

Особое значение в суровых климатических условиях приобретает осушка сжатого воздуха, используемого для пневмотранспорта цемента, так как конденсация влаги на поверхности холодных частиц цемента приводит к быстрой забивке фильтровальных устройств в механизмах для транспорта и в системе очистки воздуха и из-за чего значительно падает надёжность работы эрлифтов и аэрожелобов. Наиболее устойчиво в указанных условиях работают пневмовинтовые насосы.

6.1. Технологические мероприятия по использованию природных заполнителей

К природным заполнителям следует отнести песок, гравий и щебень, получаемые путём сортировки природных песчаногравийных смесей и дробления камня.

Общепринятые открытые способы добычи и складирования заполнителей в условиях низких отрицательных температур и высокой продолжительности морозного периода оказывают значительное влияние на последующие специальные технологические операции.

В первую очередь необходимо обеспечить возможность приёма и транспортировки заполнителей до бетоносмесительного отделения. Смерзание увлажнённых заполнителей, которое особенно свойственно песку, приводит к образованию комьев [9, 10], трудно поддающихся разрыхлению и затрудняющих разгрузочные и транспортные операции. Известно, что смерзаемость

заполнителей зависит в основном от гранулометрии и влажности. Результаты исследований, проведённых в Братскгэсстрое [9, 10], показали: если влажности песка менее 3–4 %, а гравия – менее 2 %, то при замерзании они сохраняют сыпучесть.

Рекомендуемые способы устранения последствий смерзания включают:

1) механизированное рыхление буро-фрезерными и виброрыхлительными механизмами, применяемое в основном при разгрузке с железнодорожного транспорта;

2) обезвоживание путём отстоя, центрифугирования и других мероприятий до влажности, обеспечивающей сыпучесть после промерзания;

3) отогрев открытым паром;

4) применение специальной технологии сухой зимней сортировки заполнителей, обеспечивающей их полную сыпучесть (по опыту Братскгэсстроя);

5) сохранение заполнителей в незамёрзшем состоянии с защитой штабелей от промерзания, понижение температуры замерзания с помощью «антифризов» и др.

Не все из рекомендованных способов могут быть применены в суровых условиях продолжительной зимы с морозами до минус 40÷50 ^{0}С. Так, размораживание открытым паром при низких температурах приводит только к дополнительному обледенению и смерзанию заполнителей в сплошные глыбы.

Также не нашло применения предложение сохранять заготовленные штабели в незамёрзшем состоянии, главным образом, из-за отсутствия экономичных способов и средств утепления, которые, кроме того, не должны влиять на качество заполнителей.

Наиболее простым приёмом, осуществляемым без больших дополнительных затрат, является обезвоживание штабелей заполнителей путём отстоя. Естественно, сезонные запасы при этом возрастают. Отстоявшиеся в течение 2÷3 недель после мокрой сортировки штабели крупных фракций замерзают без образования прочных комьев и легко поддаются разработке и транспортированию. На недостаточно отстоявшихся штабелях песка при замерзании может образоваться мёрзлая корка. Впоследствии комья смёрзшегося песка застревают на решётках приёмных устройств и значительно затрудняют транспортные операции.

Нельзя допускать, чтобы мокрая летняя сортировка продолжалась вплоть до установления устойчивых отрицательных температур, когда при промерзании комья образуются не только в песке, но и в гравии.

Для условий Севера характерны продолжительный морозный период и стабильные отрицательные температуры. Исходя из этого, в Братскгэсстрое была разработана и широко внедрена технология сухой зимней сортировки заполнителей, полностью решившая, кроме прочих вопросов, проблему сыпучести заполнителей, используемых в зимнее время. Сущность указанной технологии заключается в промораживании песчано-гравийной смеси, заготовленной в летний период, до сыпучего состояния и последующей сухой зимней сортировке. Добыча песчано-гравийной смеси из месторождений в русле р. Ангары заключается в гидронамыве штабелей на береговые участки. Для обезвоживания свеженамытые штабели отстаиваются. Промораживание, т.е. рыхление и перемещение к месту погрузки песчано-гравийной смеси, проводится послойно по всей площади штабеля по мере его промерзания. В результате отстоя, продолжительность которого должна быть не менее летнего месяца, и испарения влаги в процессе промораживания создаются условия для образования сыпучей смеси, пригодной для сухой зимней сортировки.

Технология сухой зимней сортировки заполнителей, впервые разработанная и внедрённая для гидротехнического бетона Братской ГЭС, широко применялась для сборного и монолитного железобетона в Братско-Усть-Илимском ТПК и на строительстве Богучанской ГЭС.

Таким образом, в условиях продолжительной и суровой зимы удалось решить проблему сыпучести без ущерба для качества заполнителей, снизить сезонные запасы и организовать круглогодичную работу сортировочных заводов. Необходимость рыхления смёрзшихся масс заполнителя отпала полностью. Небольшое количество комьев попутно разрыхляется бульдозерами, работающими на приёмных устройствах бетонных заводов, или задерживается на решётках и впоследствии удаляется.

6.2. Подогрев заполнителей

Несмотря на применяемые меры по обеспечению сыпучести заполнителей, то или иное количество смёрзшихся комьев ограниченных размеров может оставаться и проходить по транспортёрным трактам до устройств подогрева. Очевидно, что при подогреве следует учитывать необходимость отогрева попавших комьев. Особенно прочные, плохо размораживающиеся комья образуются в мелкозернистых песках, используемых для растворов. Контрольная сортировка таких песков на бетонном заводе позволяет удалить наряду с другими ненужными включениями и смёрзшиеся комья.

Подогрев заполнителей до заданной температуры может быть осуществлен при их непосредственном контакте с теплоносителем (конвективный способ) и при теплопередаче через промежуточную стенку (контактный способ). Конвективный способ [22] включает:

– продувку горячих газов (продуктов горения или подогретого воздуха) через неподвижный слой заполнителей в бункерах или, при взаимном перемещении теплоносителя и заполнителей, в установках типа сушильных барабанов;

– впуск открытого пара в штабель или бункер.

Известны также предложения по подогреву заполнителей с помощью инфракрасных излучателей, установленных над движущимися транспортёрными лентами с потоком материалов.

Из перечисленных способов наибольшее распространение получил подогрев заполнителей в сушильных барабанах, работающие как в прямоточном, так и в противоточном режимах (рис. 17).

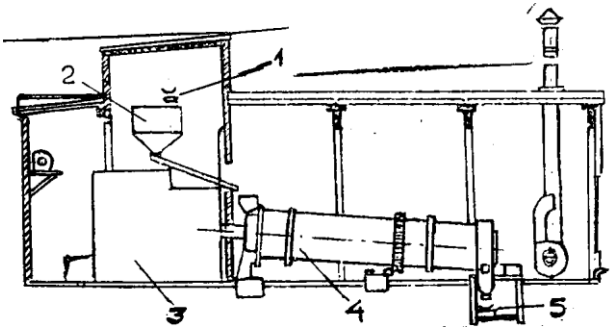


Рис. 17. Установка для подогрева заполнителей в сушильных барабанах: 1,5 – ленточный конвейер; 2 – бункер; 3 – топка;4 – сушильный барабан

В сушильных барабанах можно проводить термообработку как песка, так и крупных заполнителей.

Продувка через неподвижный слой возможна только для крупных заполнителей и представляет собой сложную задачу.

По предложению института Оргэнергострой, подогрев и сушка песка совмещаются с транспортными операциями в установках пневмопотока, использующих горячие газы. В этом серьёзное преимущество данного способа перед контактными способами прогрева. Получение стабильной небольшой влажности на выходе из установки особенно полезно для песка, так как значительно улучшает истечение его из бункеров и способствует повышению стабильности свойств заводской бетонной смеси и бетона. Необходимо отметить, что применение жидких сортов топлива, должно быть экономически оправданно, поэтому сушильные барабаны чаще используются в особо суровых условиях и в неосвоенных районах.

Контактный подогрев глухим паром через закрытые паровые регистры в настоящее время широко применяется на заводах товарного бетона для всех видов заполнителей. Серьёзным преимуществом такого способа прогрева является использование сравнительно дешёвого теплоносителя, простота устройств, их технологическая надёжность и безопасность в эксплуатации.

Обогрев паровыми регистрами может осуществляться:

– в складских штабелях открытого и закрытого хранения;

– в промежуточных нагревательных устройствах – бункерах, размещаемых в нижней части штабелей склада заполнителей;

– в специальных промежуточных устройствах подогрева – бункерах или силосах;

– в расходных бункерах бетоносмесительного отделения.

К недостаткам контактного способа нужно отнести, в первую очередь, неравномерность прогрева материала внутри бункера или штабеля. При редком расположении регистров материал достаточно прогрет в местах контакта с их поверхностью и недостаточно - в местах удалённых от регистров. Наиболее равномерный прогрев обеспечивается в металлических силосах – бункерах, оборудованных внутренними паровыми регистрами и установленных в специальных утеплённых цехах или отделениях термоподготовки на бетонных заводах.

Выбор места термообработки зависит от конкретных условий и принятой технологической схемы завода, но наиболее успешно в

суровых климатических условиях используются паровые регистры, установленные внутри бункеров или силосов на закрытых складах заполнителей или в специальных цехах подогрева.

Следует всячески избегать размещения регистров в расходных бункерах из-за целого ряда эксплуатационных неудобств: ухудшения истечения материалов из расходных бункеров, попадания воды, стекающей из бункеров, в дозаторное отделение и др. Такая схема иногда применяется для районов с небольшими отрицательными температурами [15], но в суровых условиях не может быть рекомендована.

Попытки разместить регистры на открытых штабелях заполнителей в районе загрузочных отверстий следует признать неудачными, во-первых, из-за низкой эффективности прогрева и, во-вторых, из-за быстрого разрушения регистров работающими на складах бульдозерами.

Различают одно- и двухступенчатый подогрев заполнителей [15], предполагая, что первая ступень – подогрев в штабелях или приёмных устройствах, вторая – в специальных бункерах, сушильных барабанах и др. При сыпучих заполнителях можно успешно обойтись одноступенчатым подогревом в устройствах, вынесенных за пределы бетоносмесительных установок. Применение одноступенчатого подогрева в бункерах, силосах или сушильных барабанах в настоящее время можно считать отработанным технологическим приёмом, применяемым на заводах ЖБИ и товарного бетона в условиях суровой и длительной зимы.

Бункера подогрева оборудуются глухими регистрами, расположенными, как правило, вертикально. В нижней части регистры устанавливаются в бункерных складах большой ёмкости, когда прогрев совмещается со складированием материалов. В специальных бункерах подогрева регистры устанавливаются на всю высоту бункера или силоса. Это позволяет форсировать прогрев и, соответственно, повышать производительность установок.

Бункера работают по циклическому режиму, с загрузкой до начала термообработки и выгрузкой – после окончания. В процессе эксплуатации металл регистров изнашивается, особенно интенсивно – щебнем прочных пород. Наиболее долговечны металлические регистры, работающие на песке и окатанном речном гравии. Обычно сверху регистры защищаются металлическими уголками для предохранения от ударов при загрузке.

6.3. Расчёт температуры бетонной смеси и потребного количества тепла для подогрева заполнителей

В соответствии с требованиями СНиП 3.03.01-87 «Несущие и ограждающие конструкции» п.2.54 заполнители перед загрузкой в бетоносмеситель должны иметь положительную температуру, обеспечивающую получение бетонной смеси с температурой не ниже требуемой по расчёту. Ограничения температуры согласно СНиП III - 15-76 приведены в табл. 6.1.

Расчёты температуры бетонной смеси базируются на уравнении теплового баланса из условия равномерного распределения температур по объёму материала. Температура бетонной смеси определяется по формуле

$$t_{см} = \frac{0{,}837\,(q_1 t_1 + q_2 t_2 + q_ц t_ц) + 4{,}187(q_в - i_1 q_1 - i_2 q_2)\cdot t_в + 4{,}187(i_1 q_1 t_1 + i_2 q_2 t_2)}{0{,}837\,(q_1 + q_2 + q_3) + 4{,}187\cdot q_3}, \quad (18)$$

где i_1 – влажность песка; q_1 – удельный расход песка на 1 м^3 бетона, кг; t_1 – температура песка, ^{0}C; i_2 – влажность крупных заполнителей; q_2 - расход крупных заполнителей на 1 м^3 бетона, кг; t_2 – температура крупных заполнителей, ^{0}C; $q_ц$, $t_ц$ – соответствующие величины для цемента; $t_в$ – температура воды, ^{0}C; $q_в$ – общий (расчётный) расход воды на 1 м^3 бетона, кг; 0,837 – удельная теплоёмкость песка, крупного заполнителя и цемента, кДж/кг · ^{0}C; 4,187 – удельная теплоёмкость воды, кДж/кг · ^{0}C. СНиП III - 15-76 разрешает применять для приготовления бетона неотогретые заполнители при условии, если это допускает тепловой баланс бетонной смеси.

Таблица 6.1

№ п/п	Цементы	Наибольшая допустимая температура, ^{0}C	
		воды	бетонной смеси при выходе из смесителя
1	Портландцемент, шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент марок ниже М 400	80	35
2	Быстротвердеющий портландцемент и портландцемент марки М600 и выше	60	30
3	Глинозёмистый	40	25

При наличии в заполнителях льда в расчётах следует учитывать скрытую теплоту его плавления, равную 335 кДж/кг, поэтому соответствующая поправка на теплоёмкость льда в числителе формулы (18) будет иметь вид:

$$+ q_л (2{,}09\ t_л - 335),$$

где $q_л$ – удельное содержание льда, кг/м^3; $t_л$ – температура льда, ^{0}С; 2,09 – удельная теплоёмкость льда, кДж/кг · ^{0}С.

Несмотря на то, что, по сравнению с остальными составляющими, теплоёмкость воды, больше влияние ее на температуру бетонной смеси выражается в повышении (1,3÷1,5) ^{0}С бетонной смеси на 10 ^{0}С воды. Изменение температуры песка на 10 ^{0}С приводит к соответствующему повышению на 3 ^{0}С температуры бетонной смеси из-за значительно большего содержания в ней песка по сравнению с водой. В то же время регулирование температуры песка и других заполнителей представляет технически более сложную задачу, чем регулирование температуры воды. Это обстоятельство следует учитывать при разработке мероприятий по регулированию температуры бетонной смеси. Можно рекомендовать подогрев заполнителей как базовое мероприятие для обеспечения температур бетонной смеси в определённом интервале, например плюс (10÷20) ^{0}С, а изменением температуры воды осуществлять оперативное регулирование температуры бетонной смеси.

Каждые 10 кг льда, попавшие в бетонную смесь, приводят к снижению температуры примерно на 1,3 ^{0}С, поэтому льдоприсадка используется для снижения температуры бетонной смеси при летнем бетонировании массивных гидротехнических конструкций. Конечно, при зимнем приготовлении бетонной смеси следует всячески избегать попадания льда в бетоносмеситель.

Расчётная поверхность нагревательных приборов (регистров) F_n может быть определена по формуле:

$$F_n = \frac{Q_p}{f}, \qquad (19)$$

где Q_p – расход тепла на размораживание и подогрев заполнителей, кДЖ; f – средняя теплопередача 1 м^2 поверхности нагрева, для стальных паровых вертикальных регистров по опытным данным 6200÷7000 кДж/м^2 · ч.

В свою очередь

$$Q_р = \frac{Q_{уд} \cdot В}{n \cdot \eta}, \qquad (20)$$

где $Q_{уд}$ – расход тепла на размораживание и подогрев или подогрев оттаявших 1 $м^3$ заполнителей, кДж/$м^3$; В – расход заполнителей, $м^3$/сут.; n – продолжительность подогрева ч/сут.; η – коэффициент, учитывающий теплопотери.

Как уже отмечалось, приведённые расчётные зависимости выведены из предположения равномерного распределения температур по объёму материала. В действительности имеют место протекающие во времени тепловые процессы с неравномерным распределением температур не только по объёму, но и по отдельным зёрнам крупного заполнителя. Так, отмечено на практике и подтверждается расчётами, что снижение температуры бетонной смеси после выхода с завода происходит не только в результате теплообмена с окружающей средой, но и за счёт постепенного прогрева крупных зёрен заполнителя в процессе транспортировки и укладки бетонной смеси.

6.4. Требования к компоновке бетонных хозяйств в суровых условиях Севера

В первую очередь следует отметить особенности компоновки складов заполнителей. В предыдущих разделах были рассмотрены преимущества и недостатки тех или иных способов подогрева. В конечном счёте основными конкурирующими вариантами являются технологические схемы с включением сушильного барабана или устройств подогрева, использующих паровые регистры.

При отсутствии других источников энергии использование сушильных барабанов или установок подобного типа становится полностью оправданным. Производительность выпускаемых промышленностью сушильных барабанов сравнительно невелика (около 20 т/ч), поэтому их использование целесообразно для установок небольшой мощности. Как правило, после сушильного барабана материалы подаются непосредственно в расходные бункера завода.

Подавляющее большинство современных бетоносмесительных установок оборудовано устройствами подогрева с паровыми регистрами. Ниже приводится технологическая схема работы Усть-Илимского завода товарного бетона, наиболее полно, на наш

взгляд, отвечающая требованиям суровых условий Севера. Завод обеспечивал выдачу бетона при температуре до - 40^0С с месячной производительностью 30 тыс.$м^3$. Важно отметить, что принятая башенная (одноступенчатая) схема компоновки бетоносмесительного отделения показала высокую надёжность в сочетании с удобством эксплуатации. Вопросы утепления всех помещений и цехов завода были рассмотрены особенно тщательно, так как экономия в данном случае оборачивается эксплутационными неудобствами и дополнительными сбоями в работе. В перечень таких помещений были включены подсилосные галереи на цементном складе, наклонные подштабельные галереи, помещения для разведения химдобавок, цех подогрева заполнителей и др.

В технологии завода был предусмотрен узел контрольного грохочения (УКГ) (рис. 18), работающий по принципу сухой сортировки (без промывки материалов в процессе контрольной сортировки). Через УКГ пропускался песок для растворов. Контрольная сортировка песка обеспечивала удаление смёрзсшихся комьев и других включений, которые в дальнейшем не попадали на тракты завода, что, во-первых, улучшало условия работы устройств по подогреву песка и, во-вторых, существенно повышало качество раствора.

Реализация указанных требований к технологии и компоновке бетонного завода позволила создать надёжный комплекс, успешно работающий в чрезвычайно суровых климатических условиях г. Усть-Илимска, обеспечить выпуск бетонов и растворов, достаточно высокого качества как в летний, так и в зимний периоды работы. Полученный опыт позволил также оценить надёжность различных устройств для пневмотранспорта цемента. Так, быстро выходят из строя аэрожелоба и пневмовинтовые подъёмники (эрлифты) из-за забивки фильтровальных устройств. Недостаточно надёжно работают и фильтровальные устройства для очистки воздуха. В настоящее время установилось мнение, что основной причиной отмеченных дефектов является содержание влаги в сжатом воздухе, которая конденсируется на холодных частицах цемента, в результате чего фильтры залипают и плотно цементируются. Таким образом, появилась необходимость тщательной осушки сжатого воздуха на компрессорных станциях и устройства различных ловушек для влаги по воздушным трассам.

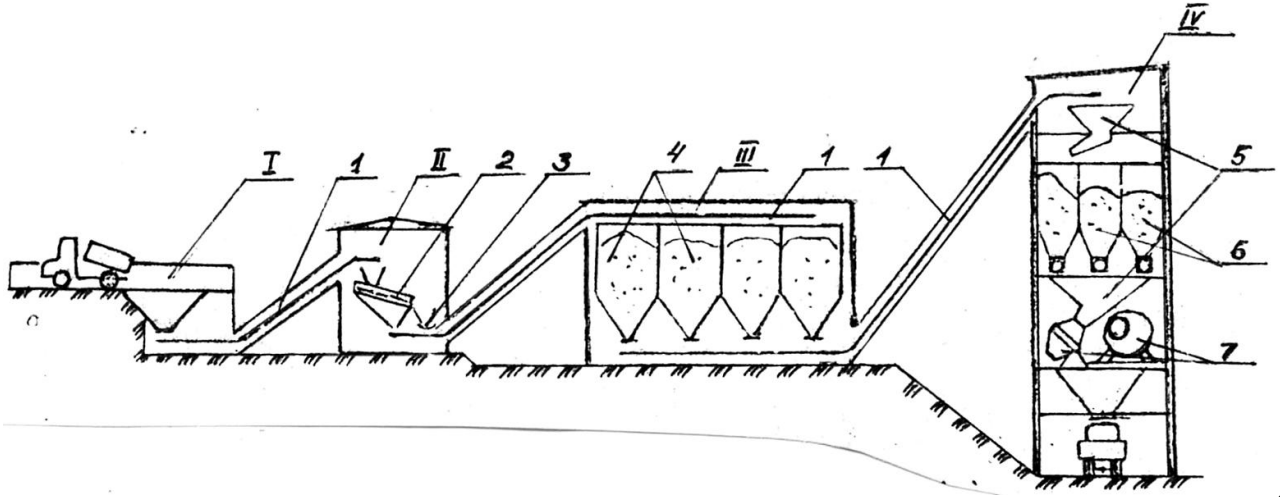


Рис. 18. Технологическая схема бетонного завода, эксплуатируемого при температуре до –45 ^{0}С в г. Усть-Илимск: I – приёмное устройство заполнителей с автотранспорта (неотапливаемое); II – узел контрольной сухой сортировки песка (неотапливаемый); III – цех термоподготовки заполнителей (отапливаемый); IV – бетоносмесительный цех (отапливаемый); 1 – подающие транспортёры; 2 – виброхот контрольной сортировки песка (сито 20х20 мм); 3 – транспортёр для выброса отсеянного материала; 4 – металлические силосы с паровыми регистрами; 5 – поворотная воронка; 6 – бункера заполнителей и цемента, 7 – бетоносмеситель

7. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК БРАТСКГЭССТРОЯ)

Рассмотрим совершенствование методов зимнего бетонирования на примере Братскгэсстроя – крупной строительной организации, расположенной в регионе с климатом, для которого характерна продолжительная зима с низкими температурами.

Значительное влияние на развитие методов электропрогрева бетона в Братскгэсстрое оказали следующие факторы:

- опыт аналогичных строительных площадок;
- специфика гидротехнического строительства в суровых условиях, связанная с необходимостью выполнения требований по сохранению монолитности бетонной кладки;
- постепенное повышение объема промышленного и жилищного строительства и развитие наиболее эффективных методов электропрогрева бетона.

На первых объектах Братскгэсстроя в конце 50-х – начале 60-х годов наибольшее распространение получил электродный прогрев бетона.

В определённой мере внедрению электродного прогрева способствовали высоквалифицированные специалисты, обладавшие соответствующими теоретическими знаниями, практическим опытом и активно работавшие в указанном направлении [1, 2, 3, 9, 10].

Наиболее распространенным способом прогрева был периферийный электродный прогрев с креплениями электродов к деревянной опалубке или рейкам, уложенным по горизонтальным поверхностям (основанию). В случае крепления к арматуре требовалась изоляция электродов от арматурного каркаса, поэтому такие схемы применялись крайне редко.

В гидротехническом строительстве при бетонировании массивных блоков плотины Братской ГЭС выдерживание бетона проводилось по методу «термоса» в утеплённой (с повышенным коэффициентом теплопередачи за счёт наличия теплоизоляционного слоя) опалубке с засыпкой открытой горизонтальной поверхности слоем опилок. Электродный прогрев в указанных блоках проводился только в наиболее охлаждаемых углах и гранях для предо-

хранения бетона от раннего замораживания при низких отрицательных температурах воздуха [3].

В тонкостенных гидротехнических конструкциях имело место применение электродного прогрева с установкой электродов по обычной деревянной опалубке.

Изоляция электродов от арматуры в случае установки их по сеткам или каркасам, а также крепеж электродов к бетонным и тем более металлическим поверхностям были недостаточно надежны. Поэтому, например, на густоармированных омоноличивающих участках колонн машзала из-за невозможности установки электродов была применена металлическая термоопалубка с паровой рубашкой.

На строительстве массивной бетонной плотины Усть-Илимской ГЭС при выдерживании бетона применялся метод «термоса» в классическом варианте, когда твердение бетона по регламентируемому режиму обеспечивалось только за счет теплоизоляции охлаждаемых поверхностей массивных блоков без дополнительного электродного прогрева. Как и на строительстве Братской ГЭС, при бетонировании монолитных конструкций фундаментов, площадок, дорог и др. периферийный электродный электропрогрев успешно применялся в тех случаях, когда установка электродов не вызывала больших трудностей, т.е. в основном с нашивкой электродов по деревянной опалубке или рейкам, уложенным на основание. Необходимо отметить, что широко применявшийся способ нашивки электродов на поверхность деревянной опалубки был наиболее простым и достаточно надёжным, но качество поверхности бетона, контактирующей с электродами, не соответствовало требованиям к лицевым поверхностям конструкций, что могло привести (и в определённых случаях приводило) к дополнительным затратам на ее отделку.

Таким образом, накопленный опыт позволил определить наиболее рациональную область применения электродного прогрева, а также выделить виды конструкций, в которых его использование либо существенно затрудняется, либо практически невозможно. Таковыми явились густоармированные немассивные конструкции с повышенными требованиями к качеству лицевой поверхности, густоармированные подливки под оборудование, оставляемая железобетонная опалубка, омоноличивающие части сборных конструкций в металлической опалубке.

На ограничение применения электродного прогрева в массивных конструкциях определенное влияние оказала кратковременность его действия, которая не позволяла регулировать температуру поверхности массивных блоков с помощью электропрогрева в течение остывания. Применение для этих целей утепленной опалубки было для того времени единственным и достаточно простым мероприятием.

В 70-е гг. на строительстве Усть-Илимской ГЭС был разработан и внедрен обогрев затвердевшего бетона с помощью нагревательного неизолированного провода, который заранее монтировался внутри блока бетонирования вблизи от нагреваемой поверхности и после бетонирования оставался в затвердевшем бетоне [14]. Провод подключался к источнику тока по мере необходимости и обеспечивал прогрев бетона по принципу нагревательной спирали. Таким способом подогревались межстолбчатые поверхности плотин перед проведением их цементации.

В качестве нагревательного провода использовалась проволока диаметром 5–8 мм без изоляции. Применение указанного диаметра проводника позволило подвести на 1 $м^2$ поверхности мощность 0,25 кВт. Отсутствие изоляции служило для монтажа провода только в неармированном бетоне.

В определённой мере независимо от опыта, полученного на строительстве плотины, прошло внедрение изолированного нагревательного провода для прогрева тонкостенных густоармированных конструкций в промышленном строительстве [17].

Важной особенностью нагревательного изолированного провода явилась возможность его монтажа по арматурному каркасу. Это открывало возможность прогрева любых, недоступных для электродного, густоармированных конструкций. Нагревательный провод, как правило, монтируется по арматуре и выходит на лицевую поверхность конструкции в виде локальных выпусков, после удаления которых качество поверхности может быть достаточно высоким.

Расход стали на нагревательные провода меньше, а в некоторых случаях – значительно меньше, чем на электроды, за счет большой плотности тока, допускаемой в нагревательном проводе, и возможности вести прогрев любой требуемой продолжительности. Возможен также предварительный прогрев замороженного бетона нагревательным проводом, но при этом будет получен бетон худшего качества.

Снижение расхода электроэнергии при прогреве нагревательными проводами, по сравнению с расходом при электродном прогреве, рассмотрено в работе [17]. Следует отметить, что длительный неконтролируемый прогрев неизбежно приведёт к перерасходу электроэнергии. Однако при использовании провода нет необходимости в повышении марки бетона для обеспечения проектной прочности конструкции после прогрева более 50 % от марки, как это случается при электродном прогреве.

Таким образом, электропрогрев бетона нагревательным изолированным проводом явился существенным и необходимым дополнением к электродному прогреву, охватившим практически все разновидности конструкций.

Внедрению прогрева нагревательным проводом способствовало освоение его производства на базе строительной индустрии в Братскгэсстрое (Хиневич Ю.Ф., Петров Н.Ф.) [21].

Дальнейший практический опыт показал, что имеется возможность использования нагревательного провода как средства регулирования скорости остывания бетонного массива с целью снижения температурных перепадов «ядро-грань» и предохранения массива от сквозного трещинообразования [21]. Указанная проблема может быть актуальна не только для гидротехнического, но и для промышленного строительства при сооружении массивных фундаментов под особо ответственные агрегаты (например, турбоагрегаты ТЭЦ) с требованием по обеспечению монолитности фундамента.

Наибольший вклад в развитие зимнего бетонирования внесли строительные организации Усть-Илимской строительной площадки в течение 70÷80-х годов двадцатого столетия, предприняв попытку внедрения термоактивной опалубки, созданной на базе металлической унифицированной мелкощитовой опалубки треста Усть-Илимскпромстрой (Петрухно Е.П., Кошевой Д.П.). Однако производственный опыт показал, что разработанная термоопалубка может быть использована только на стационарном полигоне по производству доборных ЖБК.

Уже первый опыт укладки больших объёмов бетона в зимний период в начале 60-х годов показал несовершенство типовых бетонных заводов и их неприспособленность к работе в условиях Севера. В дальнейшем Братскгэсстрой практически непрерывно занимался всесторонним совершенствованием оборудования и технологии приготовления бетона. Результатом этой целенаправленной работы было создание модернизированных бетонных заводов, приспособлен-

ных к местным условиям и разработка оригинальных технологических решений (см. раздел 6).

Развитие технологии приготовления бетона, в частности создание цеха и склада химических добавок, позволило в промышленных масштабах внедрить применение противоморозной добавки – нитрита натрия (Садович М.А., Кошарин М.П.).

Несмотря на неэффективность использования нитрита натрия для безобогревного бетонирования при низких отрицательных температурах, добавка позволяла понизить температуру замерзания раствора при производстве кладочных и других видов работ и, что особенно важно, улучшала подвижность раствора без сокращения сроков схватывания.

Очевидно, что успех внедрения противоморозных добавок в условиях заводского приготовления растворов или бетонов зависит от того, насколько выполнимы конкретные технологические требования. Введение поташа в качестве противоморозной добавки на месте производства работ носило локальный характер из-за резкого загустевания бетона.

Проводились также производственные эксперименты по бетонированию методом «горячего термоса» (Назаренко Е.Ф.), которые выявили ряд серьёзных трудностей на пути его внедрения.

Таким образом, в Братскгэсстрое с 1960 до начала 80-х годов прошли производственную обкатку различные методы зимнего бетонирования.

В последнее время обозначилось повышение интереса к развитию методов зимнего бетонирования, о чём можно судить также по появлению диссертаций, выполненных под руководством д-ра техн. наук, проф. Ю.А. Попова, по информации в системе Internet и др.

Появились предложения по использованию современных патентованных противоморозных химических добавок [27, 28]. Однако опыт Братскгэсстроя по выполнению огромных объёмов бетонных работ в суровых зимних условиях, теперь уже ставший достоянием истории строительства великих сооружений в условиях Севера, ещё долго будет оказывать влияние на принятие оптимальных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев К.В. Опыт применения периферийного электрообогрева на строительстве Горьковской ГЭС. – М.: Оргэнергострой, 1958. – 32 с.

2. Алексеев К.В. Бетонирование массивных блоков гидротехнических сооружений в зимних условиях методом периферийного электропрогрева. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1954. – С. 27–34. (Сб. трудов «Производство зимних бетонных работ на строительстве гидроэлектростанций».

3. Алексеев К.В., Гершанович Г.Л., Садович М.А. Зимнее бетонирование на Братской и Усть-Илимской ГЭС: Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию. – М.: Стройиздат, 1975. – 336 с.

4. Арбеньев А.С. Технология бетонирования с электроразогревом смеси. – М.: Стройиздат, 1975. – 108 с.

5. Афанасьев А.А. Интенсификация работ при возведении зданий и сооружений из монолитного железобетона. – М.: Стройиздат, 1990. – 384 с.

6. Брюханов Г.В., Садович М.А., Шайкин Б.В. Особенности технологии приготовления бетона на Усть-Илимской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 1973. – № 1. – С. 3–5.

7. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984. – 671 с.

8. Головнёв С.Г. Оптимизация методов зимнего бетонирования. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 235 с.

9. Гершанович Г.Л. Зимняя сортировка заполнителей в Братскгэсстрое // Гидротехническое строительство. – 1963. – № 2. – С. 10–16.

10. Гершанович Г.Л. Первый опыт зимних бетонных работ в Братскгэсстрое // Гидротехническое строительство. – 1960. – № 7. – С. 4–8.

11. Гныря А.И. Технология бетонных работ в зимних условиях. – Томск: изд-во ТГУ, 1984. – 280 с.

12. Завалишина Т.В. Регулируемый режим тепловой обработки бетона при зимнем бетонировании буронабивных свай в сезонномёрзлом грунте: Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Новосибирск, 2002. – 22 с.

13. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.

14. Мельников А.Г., Фомин Б.Г., Фрейдман Ф.Б. Цементация строительных швов в промороженном бетоне на строительстве

Усть-Илимской ГЭС // Энергетическое строительство. – 1977. – № 2. – С. 36–39.

15. Зеличенок Г.Г. Автоматизированные и механизированные бетонные заводы. – М.: Высшая школа, 1969. – 364 с.

16. Методические рекомендации по применению нагревательных проводов и кабелей при выполнении общестроительных работ в зимних условиях (ЦНИИОМТП). – М., 1986. – 88 с.

17. Петрухно Е.П. Опыт внедрения термоактивного обогрева бетона // Гидротехническое строительство. – 1980. – № 8. – С. 41–44.

18. Руководство по электротермообработке бетона (НИИЖБ). – М.: Стройиздат, 1974. – 255 с.

19. Руководство по зимнему бетонированию с применением метода термоса (НИИЖБ). – М.: Стройиздат, 1975. – 192 с.

20. Руководство по применению бетонов с противоморозными добавками (НИИЖБ). – М.: Стройиздат, 1976. – 80 с.

21. Прогрессивные методы использования внутреннего электрообогрева бетона на энергетических объектах: Обзорная информация / М.А. Садович, Д.П. Кошевой, Г.Л. Гершанович и др. – М.: Информэнерго, 1989. – 44 с.

22. Садович М.А. Организация технологического процесса приготовления бетонных смесей в суровых климатических условиях: Методические рекомендации. – Братск: БрИИ, 1986. – 20 с.

23. Садович М.А., Антипин Д.Н. Решение температурной задачи прогрева железобетонных конструкций с помощью нагревательного изолированного провода: Материалы межрегиональной научно-технической конференции. – Братск: БрГТУ, 2002. – 7 с.

24. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

25. Хаютин Ю.Г. Монолитный бетон. – М: Стройиздат, 1991. – 573 с.

26. Шпанко С.Н. Энергосберегающая и щадящая технология зимнего бетонирования строительных конструкций: Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Новосибирск: НГАСУ, 2001. – 19 с.

27. Гидроизоляционные сухие строительные смеси и добавки. ЗАО «НП ЦМИД» // Сборник рекламных проектов. – Санкт-Петербург, 2003.

28. Противоморозные химические добавки (Бенотех ПМП-1, Лигнопан Б-4, Формиат натрия): [http.www.benotech.ru/price.html, 23.10.03].

29. Арбеньев С.С. Возникновение и развитие технологии бетонирования с электроразогревом смеси: [http.www.e-concrete.ru, 23.10.03].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Примеры определения модуля поверхности $M_п$ некоторых конструкций

Модуль поверхности определяется отношением суммы площадей охлаждаемых поверхностей конструкций ΣF к объёму V, причём при укладке бетона на талое основание поверхности конструкций, соприкасающихся с ним, при подсчёте модуля поверхности в ΣF не входят:

$$M_п = \Sigma F / V.$$

Для упрощения подсчётов ниже приводится ряд формул, по которым можно определить $M_п$ конструкций разных очертаний:

а) для колонн и балок прямоугольного сечения со сторонами b_1 и b_2, м:

$$M_п = 2/ b_1 + 2/ b_2;$$

б) для колонн и балок квадратного сечения со стороной b

$$M_п = 4/ b;$$

в) для куба

$$M_п = 6 / b;$$

г) для параллелепипеда (со сторонами a, b, c):
отдельно стоящего

$$M_п = 2/a +2/b +2/c,$$

примыкающего к массиву

$$M_п = 2/a +2/b +1/c;$$

д) для плит и стен толщиной a

$$M_п = 2/a;$$

е) для сплошного цилиндра с диаметром d и высотой, м

$$M_п = 4/d +2/h;$$

ж) для цилиндрической оболочки

$$M_п = 2/b_1 \cdot m +2/h \cdot m,$$

где b_1 – наибольшая толщина стенки, м; m – коэффициент, учитывающий заделку торцов оболочек пробками.

Для цилиндрических оболочек без заделки торцов $m \leq 1$, с пробкой на одном торце $m = 1,5$ и пробками на обоих торцах $m \leq 2$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Физические константы

1 кал = 4,1868 Дж

1 Вт · с = 1 Дж = 0,239 кал

1 кДж = 1 КВт · с = 0,239 ккал

1 кДж/м^2·час·^{0}С = 1000 Дж / 3600 с·м^2·^{0}С = 1 / 3,6 Вт/м^2·^{0}С

1 Вт/м^2·^{0}С = 3,6 кДж/м^2·ч·^{0}С = 0,86 ккал/м^2·ч·^{0}С

1 кВт · ч = 860 ккал = 3600 кДж

Физические свойства металлов

Плотность железа 7,87 г/см^3

Удельная теплоёмкость 0,46 Дж/кг ^{0}С

Коэффициент теплопроводности 0,0067 кВт/м ^{0}С

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....3

1. ЭЛЕКТРОТЕРМООБРАБОТКА БЕТОНА.....4

1.1. Требуемая мощность для электротермообработки бетона.....5

1.2. Режимы электротермообработки.....9

1.3. Остывание бетона в конструкции.....12

1.4. Определение необходимой продолжительности прогрева бетона в конструкции.....16

2. ЭЛЕКТРОДНЫЙ ПРОГРЕВ БЕТОНА.....21

2.1. Электроды и схемы электродного прогрева.....23

2.2. Порядок расчёта основных параметров прогрева....28

3. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ПРОВОДА ДЛЯ ПРОГРЕВА БЕТОНА.....32

3.1. Результаты производственных экспериментов по прогреву бетона.....32

3.2. Назначение основных параметров греющих элементов 33

3.3. Режим прогрева конструкций и средства его регулирования.....42

3.4. Особенности монтажа нагревательного провода.....45

3.5. Порядок расчёта основных параметров прогрева....55

3.6. Пример расчёта параметров прогрева изолированным нагревательным проводом монолитного столбчатого фундамента.....56

3.7. Температурное и прочностное поле конструкций ...58

4. МЕТОД ТЕРМОСА.....59

5. БЕТОНИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТИВОМОРОЗНЫХ ДОБАВОК 64

5.1. Процесс твердения и свойства бетонов с противоморозными добавками.....64

5.2. Выбор добавок и назначение их количества 69

5.3. Постановка и решение задачи выбора противоморозной добавки 74

6. ПРИГОТОВЛЕНИЕ БЕТОННОЙ СМЕСИ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 81

6.1. Технологические мероприятия по использованию природных заполнителей 82

6.2. Подогрев заполнителей 85

6.3. Расчёт температуры бетонной смеси и потребного количества тепла для подогрева заполнителей 88

6.4. Требования к компоновке бетонных хозяйств в суровых условиях Севера 90

7. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК БРАТСКГЭССТРОЯ) 93

ЛИТЕРАТУРА 98

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ ПОВЕРХНОСТИ $M_П$ НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКЦИЙ 100

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ 101

Марк Ашерович Садович

МЕТОДЫ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Учебное пособие

Подписано в печать
Формат 60×84 $^{1}/_{16}$
Печать трафаретная
Уч.-изд. л. 6,5. Усл. печ. л. 6,5.
Тираж 200 экз. Заказ

Отпечатано в издательстве ГОУ ВПО «БрГУ»
665709, Братск, ул. Макаренко, 40