Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 03.03.2022 10:14:27
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра промышленное и гражданское строительство

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
_____О.Г.Локтионова
«Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ)
_____2017г.

ВОЗВЕДЕНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления подготовки 08.03.01

Курск 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 7
Введение 9
1. Технология выдерживания бетона 11
1.1. Классификация методов зимнего бетонирования 11
1.2. Выбор рационального метода бетонирования 13
1.3. Расчёт и проектирование режимов тепловой обработки бетона 21
1.3.1. Проектно-технологические решения по бетонированию конструкций 21
1.3.2. Расчет режимов прогрева бетона 28
2. Температурный режим технологического процесса приготовления, транспортирования и укладки бетонной смеси 34
2.1. Методика расчета температуры бетонной смеси на выходе из смесителя бетонного завода 34
2.1.1. Расчет параметров режима транспортирования смеси и процесса твердения бетона 36
2.1.2. Расчет температуры бетонной смеси на выходе из смесителя бетонного завода 44
2.2. Методика расчета парка машин для транспортирования бетонной смеси 48
2.2.1. Пример расчета парка машин для транспортирования бетонной смеси 55
3. Предварительный разогрев бетонной смеси 62
3.1. Предварительный электроразогрев бетонной смеси 62
3.1.1. Методика расчета предварительного электроразогрева бетонной смеси 63
3.1.2. Расчет параметров установки по электроразогреву бетонной смеси 69
3.1.3. Пример расчета предварительного электроразогрева бетонной смеси 71

3.2. Предварительный разогрев бетонной смеси паром в миксере автобетоносмесителя 75
3.2.1. Методика расчета паропрогрева бетонной смеси 77
3.2.2. Расчет предварительного разогрева бетонной смеси паром в миксере автобетоносмесителя 83
4. Технология бетонирования с применением безпрогревных методов выдерживания бетона 87
4.1. Метод термоса 87
4.1.1. Методика расчета методом термоса 87
4.1.2. Расчет методом термоса 94
4.2. Метод ускоренного (горячего) термоса 97
4.2.1. Методика расчета конструкции опалубки и тепловой защиты, процесса набора прочности бетона и подбора электрической мощности трансформатора 98
4.2.2. Расчет конструкции опалубки и тепловой защиты, процесса набора прочности бетона, подбора электрической мощности трансформатора 104
4.3. Метод выдерживания бетона с противоморозными добавками 108
4.3.1. Методика расчета выдерживания бетона с противоморозными добавками 114
4.3.2. Расчет определения параметров выдерживания бетона с применением противоморозных добавок 137
5. Технология бетонирования с применением прогревных методов выдерживания бетона 141
5.1. Электропрогрев (электродный прогрев) бетонной смеси 141
5.1.1. Методика расчета электропрогрева (электродного прогрева) бетонной смеси 142
5.1.2. Пример расчета электропрогрева (электродного прогрева) бетонной смеси 154

5.2. Тепловая обработка бетона греющим проводом 170
5.2.1. Методика расчета тепловой обработки бетона греющим проводом.....172
5.2.2. Расчет параметров термообработки бетона греющим проводом в типовых конструкциях зданий....186
5.3. Прогрев бетона в греющих опалубках 195
5.3.1. Методика расчета прогрева бетона в греющих опалубках 197
5.3.2. Пример расчета прогрева бетона в греющих опалубках 209
5.4. Инфракрасный обогрев бетона.....214
5.4.1. Методика расчета инфракрасного обогрева бетона.....217
5.4.2. Расчет электротермообработки бетона инфракрасными излучателями для сооружений, возводимых в скользящей опалубке 227
5.5. Индукционный нагрев бетона.....240
5.5.1. Методика расчета параметров режима индукционного нагрева бетона 242
5.5.2. Примеры расчета индукционного прогрева бетона.....252
5.6. Конвективно-лучевой обогрев бетона.....263
5.6.1. Методика расчета конвективно-лучевой обработки бетона.....264
5.6.2. Пример расчета конвективно-лучевого обогрева бетона 270
5.7. Воздушный конвективный прогрев монолитных тонкостенных конструкций 274
5.7.1. Методика расчета воздушного обогрева бетона.....277
5.7.2. Расчет воздушного обогрева бетона 287
5.8. Паропрогрев бетона 293

5.8.1. Методика расчета режима термосного твердения бетона сухого формования с пароразогревом сухой бетонной смеси 295
5.8.2. Расчет режима термосного твердения бетона сухого формования с пароразогревом сухой бетонной смеси 302
6. Технология бетонирования с применением комбинированных методов термообработки бетона 311
6.1. Пример расчета выдерживания бетона методом термоса с предварительным отогревом грунта основания 313
6.2. Расчет термообработки бетона с применением противоморозных добавок и тепловой обработки греющим проводом 337
6.3. Расчет электропрогрева бетона буронабивной сваи в сочетании с применением противоморозных добавок 341
6.4. Расчет периферийного электропрогрева бетона монолитной фундаментной плиты в сочетании с методом термоса и с применением противоморозных добавок 346
6.5. Расчет термообработки бетона паром и методом греющего провода 352
Заключение 359
Библиографический список 360
Приложения 367

1. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫДЕРЖИВАНИЯ БЕТОНА

1.1. Классификация методов зимнего бетонирования

Бетонирование в зимнее время требует принятия особых мер предосторожности и установления более строгого контроля над производством работ. Если такие меры будут приняты, то качество бетона, уложенного в зимнее время, не снизится.

Предохранение бетона от замораживания и создание благоприятных условий при выдерживании его до набора необходимой для распалубки конструкций прочности может быть обеспечено различными способами.

Систематизация существующих методов зимнего бетонирования, приведенная на рис. 1, свидетельствует о многообразии способов зимнего бетонирования, позволяющих возводить монолитные конструкции различной массивности. Градация методов бетонирования на категории по энергетическим затратам и стоимости позволяет выбрать из них наиболее рациональный, удовлетворяющий срокам производства работ бетонного цикла и целесообразным энергоресурсам, которые привлекают для термообработки бетона.

Существует следующие группы методов бетонирования в зимних условиях.

Безпрогревные методы зимнего бетонирования строительных конструкций – методы бетонирования с безпрогревным выдерживанием бетона:

– термос;

– горячий термос, с использованием разогретых бетонных смесей;

– холодный термос, с добавками-ускорителями твердения и противоморозными добавками.

Прогревные методы зимнего бетонирования – методы с искусственным прогревом монолитных конструкций.

Прогревные методы подразделяются:

1) *по характеру внесения тепла в бетон:*

а) *электрообработка бетона:*

– электродный прогрев бетона;

– электрообогрев бетона изолированными греющими проводами;

– электрообогрев бетона греющей опалубкой с трубчатыми электронагревателями;

– инфракрасный обогрев бетона;

– индукционный прогрев бетона;

– термообработка бетона паром, горячим воздухом;

б) *конвективные методы:*

– конвективно-лучевой обогрев бетона с помощью панельно-линейных переносных электронагревателей;

– воздушный конвективный прогрев;

– пароразогрев сухой бетонной смеси;

2) *по температурному режиму тепловой обработки бетона:*

а) *низкотемпературные* (с температурой выдерживания бетона до 20 °С);

б) *высокотемпературные* (температура выдерживания бетона более 20 °С).

Заметим, что общепризнанный недостаток низкотемпературных методов (как правило, обусловленный использованием тепляков с подачей в них калориферами теплого воздуха при зимнем бетонировании специальных сооружений) – медленный процесс твердения бетона.

Комбинированные методы включают в себя:

– выдерживание бетона методом термоса с предварительным отогревом грунта основания;

– термообработку бетона с применением противоморозных добавок и тепловой обработки греющим проводом (плита перекрытия);

– термообработку бетона с применением противоморозных добавок и электродного прогрева (буронабивные сваи);

– термообработку бетона с применением противоморозных добавок, методом греющего провода и периферийного электродного прогрева;

– термообработку бетона паром и методом греющего провода.

1.2. Выбор рационального метода бетонирования

При всех способах производства бетонных работ и ожидаемой среднесуточной температуре наружного воздуха ниже 5 °С, минимальной суточной температуре ниже 0 °С, необходимо обеспечивать указанные в проекте показатели качества бетона: прочность, морозостойкость, влагонепроницаемость и др.

Способы и средства транспортирования бетонных смесей от стационарных (централизованных) бетонных заводов до стройплощадки должны обеспечивать сохранение температуры бетонной смеси не ниже требуемой по расчету.

Состояние основания, на которое укладывается бетонная смесь, а также температура основания и способ укладки должны исключать возможность замерзания смеси в зоне контакта с ним.

Выдерживание бетона в конструкции методом термоса при предварительном разогреве бетонной смеси и при применении бетона с противоморозными добавками допускается укладывать смесь на не отогретое непучинистое основание или ранее уложенный бетон, если по расчету в зоне контакта на протяжении расчетного времени выдерживания бетона не произойдет его замерзание.

При температуре воздуха ниже –10 °С бетонирование густоармированных конструкций с арматурой диаметром более 24 мм, арматурой из жестких прокатных профилей или с крупными металлическими закладными деталями следует выполнять

с предварительным отогревом металла до положительной температуры или локальным вибрированием смеси в арматурной и опалубочной зонах, за исключением случаев укладки предварительно разогретых бетонных смесей (при температуре смеси выше 45 °С). Продолжительность вибрирования бетонной смеси должна быть увеличена не менее чем на 25 %, по сравнению с летними условиями.

Неопалубленные поверхности конструкций следует укрывать паро- и теплоизоляционными материалами непосредственно по окончании бетонирования. Выпуски арматуры забетонированных конструкций должны быть укрыты или утеплены на высоту (длину) не менее 0,5 м.

В бетоне, замороженном прежде, чем он набрал необходимую прочность, называемую критической, под давлением образовавшегося льда нарушается сцепление цементного камня с заполнителями, в результате чего снижается конечная прочность.

В соответствии с требованиями главы СНиП 3.03.01–87 «Несущие и ограждающие конструкции», не допускается замораживание бетона в конструкциях до достижения им критической* прочности, которая должна составлять от проектной:

а) для бетонных и железобетонных конструкций с ненапрягаемой арматурой:

для бетонов классов:

– В15 (М200) и ниже – 50 %;

– В12,5 – В25 (М150 – М350) – 40 %;

– В30 (М400) и выше – 30 %;

б) для конструкций с предварительно напрягаемой арматурой – 80 %;

в) для бетонных конструкций с противоморозными добавками – не менее 20 %.

* Критической называется прочность бетона, в % от марочной, после достижения которой бетон может быть заморожен без снижения прочности и других показателей в процессе последующего твердения после оттаивания.

Рис. 1. Классификация методов зимнего бетонирования

В табл. 1 установлены следующие требования к производству работ при отрицательных температурах воздуха.

Таблица 1

Требования к производству работ при отрицательных температурах воздуха (СНиП 3.03.01–87)

1	Прочность бетона монолитных и сборно-монолитных конструкций к моменту замерзания:	Требования
1.1	Для бетона без противоморозных добавок:	
1.1.1	Конструкций, эксплуатирующихся внутри зданий, фундаментов под оборудование, не подвергающихся динамическим воздействиям, подземных конструкций	Не менее 5 МПа
1.1.2	Конструкций, подвергающихся атмосферным воздействиям в процессе эксплуатации, для класса:	Не менее % от проектной прочности:
	В7,5–В10	50
	В12,5–В25	40
	В30 и выше	30
1.1.3	Конструкций, подвергающихся по окончании выдерживания переменному замораживанию и оттаиванию в водонасыщенном состоянии или расположенных в зоне сезонного оттаивания вечномерзлых грунтов при условии введения в бетон воздухововлекающих или газообразующих ПАВ	70
1.1.4	В преднапряженных конструкциях	80
1.2	Для бетона с противоморозными добавками	К моменту охлаждения бетона до температуры, на которую рассчитано количество добавок, не менее 20 % от проектной прочности

Продолжение табл. 1

2	Загружение конструкций расчетной нагрузкой допускается после достижения бетоном прочности	Не менее 100 % от проектной прочности
3	Температура воды и бетонной смеси на выходе из смесителя, приготовленной:	
3.1	На портландцементе, шлакопортландцементе, пуццолановом портландцементе марок ниже М600	Воды не более 70 °С, смеси не более 35 °С
3.2	На быстротвердеющем портландцементе и портландцементе марки М600 и выше	Воды не более 60 °С, смеси не более 30 °С
3.3	На глиноземистом портландцементе	Воды не более 40 °С, смеси не более 25 °С
4	Температура бетонной смеси, уложенной в опалубку, к началу выдерживания или термообработки: при методе термоса с противоморозными добавками при тепловой обработке	 По расчету, но не ниже 5 °С Не менее чем на 5 °С выше температуры замерзания раствора затворения Не ниже 0 °С
5	Температура в процессе выдерживания и тепловой обработки для бетона на:	По расчету, но не выше:
	портландцементе	80 °С
	шлакопортландцементе	90 °С
6	Скорость подъема температуры при тепловой обработки бетона для конструкций с модулем поверхности: до 4 от 5 до 10 свыше 10 для стыков	Не более: 5 °С/ч 10 °С/ч 15 °С/ч 20 °С/ч

Окончание табл. 1

7	Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки для конструкций с модулем поверхности:	
	до 4	По расчету
	от 5 до 10	Не более 5 °С
	свыше 10	Не более 10 °С
8	Разность температур наружных слоев бетона и воздуха при распалубке с коэффициентом армирования до 1 %, 3 % и более 3 % должны быть, соответственно, для конструкций с модулем поверхности:	
	от 2 до 5	Не более 20, 30, 40 °С
	свыше 5	Не более 30, 40, 50 °С

Бетон приобретает окончательную прочность только после оттаивания и выдерживания при положительной температуре в течение не менее 28 сут, поэтому в случае, когда конструкции подлежат загружению нормативной нагрузкой до наступления положительных температур воздуха, необходимо выполнить мероприятия, обеспечивающие требуемую проектом прочность до замерзания бетона.

Наиболее эффективными являются способы термоса, горячего термоса и термоса с применением добавок.

При отсутствии условий для осуществления этих способов производится термообработка бетона электроэнергией, паром или, в крайнем случае, горячим воздухом.

Выбор наиболее экономичного метода выдерживания бетона при зимнем бетонировании монолитных конструкций следует производить в соответствии с данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Выбор метода выдерживания бетона монолитных конструкций

Вид конструкций	Модуль поверхности $М_п$, $м^{-1}$	Минимальная температура воздуха, °С, до	Рекомендуемый метод
1. Массивные бетонные и железобетонные фундаменты, блоки и плиты	≤ 3	–15	Термос
		–15…–30	Горячий термос: укладка бетонной смеси с температурой от 15 до 30 °С (устанавливается расчетом и достигается, в основном, за счет подогрева составляющих перед приготовлением и укладкой бетонной смеси), укрытие открытых поверхностей путем устройства шатров и кратковременный периферийный электропрогрев в местах наибольшего охлаждения (в местах примыкания)
		–25	Метод холодного термоса*:* применение противоморозных добавок и добавок-ускорителей твердения бетона
2. Массивные бетонные и железобетонные фундаменты под тяжелое оборудование, массивные стены, буронабивные сваи и другие массивные конструкции жилых и гражданских зданий	3–6	–15	Метод холодного термоса с применением легких тепляков, противоморозных добавок и добавок-ускорителей твердения бетона Метод горячего термоса: укладка предварительно разогретой бетонной смеси с температурой 50–80 °С или прогревные методы (периферийный электропрогрев или применение греющей опалубки, конвективный прогрев), при необходимости получения заданной прочности бетона в короткие сроки. Продолжительность тепловой обработки бетона равна сумме продолжительности двух периодов: периода разогрева бетона и периода его остывания

Окончание табл. 2

Вид конструкций	Модуль поверхности $М_п$, $м^{-1}$	Минимальная температура воздуха, °С, до	Рекомендуемый метод
		–25	Обогрев в греющей опалубке Предварительный разогрев бетонной смеси
		–40	Обогрев в греющей опалубке Периферийный обогрев
3. Колонны, балки, свайные ростверки, стены, плиты перекрытий и другие конструкции жилых и гражданских зданий	6–12	–15	Прогревные методы (электродный или индукционный прогрев, прогрев нагревательными электрическими проводами или греющими опалубками, воздушный конвективный прогрев и др.). Продолжительность тепловой обработки бетона равна сумме продолжительности трех периодов: периода разогрева бетона, периода его изотермического выдерживания и периода остывания. Холодный термос (с применением противоморозных добавок) или горячий термос с предварительным разогревом бетонной смеси
		–40	Обогрев в греющей опалубке, нагревательными проводами и термоактивными гибкими покрытиями (ТАГП) с применением противоморозных добавок
4. Полы, перегородки, плиты перекрытий, тонкостенные конструкции	12–20	–40	Обогрев в греющей опалубке, нагревательными проводами и термоактивными гибкими покрытиями (ТАГП) с применением противоморозных добавок

Термообработка бетона паром, горячим воздухом и инфракрасными лучами требует специального оборудования, больших подготовительных работ и применяется там, где невозможно применение остальных способов, однако при наличии дешевого пара (на крупных предприятиях и т. д.) способ термообработки паром становится рациональным.

Область применения и назначение различных методов зимнего бетонирования (табл. 2) определяются, в первую очередь, модулем монолитной конструкции, характеризующей интенсивность модуля поверхности ($М_п$) теплопотерь в бетонной смеси, находящейся в опалубке.

Расчет модуля поверхности, $м^{-1}$, осуществляется по формуле

$$М_п = \frac{F_к}{V_к},$$

где $F_к$ – площадь остывания конструкции (опалубленной и открытой), контактирующей с наружным воздухом, $м^2$; $V_к$ – объем бетона в конструкции, $м^3$.

Методика расчета технологических параметров бетонирования соответствующего типа конструкций и примеры расчета для конкретных производственных условий (температура наружного воздуха, температура бетона, характеристики опалубки и т. п.) излагаются ниже.

1.3. Расчёт и проектирование режимов тепловой обработки бетона

1.3.1. Проектно-технологические решения по бетонированию конструкций

Проектирование способа зимнего бетонирования: комплекс расчётов и организационно-технических мероприятий, связанных с выбором наиболее экономичного метода выдержи-

вания бетона с обеспечением его критической прочности в конструкции к моменту распалубливания и замерзания.

Проектно-технологические решения по бетонированию конструкций в зимних условиях следует учитывать в специально разработанных технологических картах, в которых должны быть приведены:

а) особенности технологии приготовления и транспортирования бетонной смеси, обеспечивающие возможность получения заданной температуры ее у места укладки в опалубку конструкции;

б) требуемая прочность бетона к концу выдерживания и к моменту распалубливания забетонированной конструкции;

в) способы и температурно-влажностные режимы выдерживания бетона с учетом температуры наружного воздуха в период набора им требуемой прочности;

г) данные о материалах опалубки с указанием показателей теплоизоляционных свойств, о пароизоляционных и теплоизоляционных материалах для укрытия неопалубленных поверхностей бетона (при необходимости опалубки);

д) потребность энергии, воды, пара, оборудования и специальных материалов;

е) схема размещения скважин и наименования устройств для измерения температуры бетона;

ж) схема размещения и подключения электродов или электронагревателей, требуемые электрическая мощность, напряжение и сила тока, тип понижающего трансформатора, сечение и длина проводов;

з) сроки и порядок распалубливания и загружения забетонированных конструкций;

и) основные указания по технике безопасности при производстве бетонных работ.

Режим тепловой обработки бетона должен обеспечить достижение им заданной (или критической) прочности и других показателей, указанных в рабочих чертежах конструкций.

Режим тепловой обработки бетона зависит от основных факторов: массивности конструкции (характеризуется значением модуля поверхности $М_п$), температуры окружающей среды, материала опалубки, наличия и материала утеплителя опалубки и неопалубленной поверхностей бетона, вида и марки цемента, требований к прочности бетона на момент его распалубки.

При назначении режима следует учитывать необходимость экономии энергетических ресурсов, расходуемых на тепловую обработку бетона.

Температурные режимы тепловой обработки бетона включают следующие периоды:

– предварительное выдерживание от момента окончания укладки бетонной смеси до начала прогрева;

– подъем температуры (разогрев бетона);

– изотермический прогрев;

– остывание.

Применяют следующие режимы тепловой обработки с учетом продолжительности периодов разогрева, изотермического прогрева и остывания бетона конструкций (в часах):

1. Режим электротермоса (рис. 2). Состоит из периода разогрева бетона в течение $\tau_р$ от $t_{б.н}$ до t_{max} и периода остывания в течение $\tau_о$. Бетон набирает прочность при остывании конструкции до температуры $t_{б.к}$. Этот режим применяется для конструкций с $М_п \leq 8$.

2. Изотермический режим (рис. 3). Состоит из периода разогрева бетона от $t_{б.н}$ до t_{max} и изотермического прогрева при этой температуре в течение периода $\tau_и$, назначаемого из условия получения заданной прочности бетона к моменту окончания прогрева. Режим применяется для конструкций с $М_п \geq 15$.

3. Изотермический режим с остыванием (рис. 4). Представляет собой комбинацию двух предыдущих режимов, применяется для конструкций с $М_п$ от 8 до 15.

4. Ступенчатый режим (рис. 5). Применяют для тепловой обработки главным образом преднапряженных конструкций.

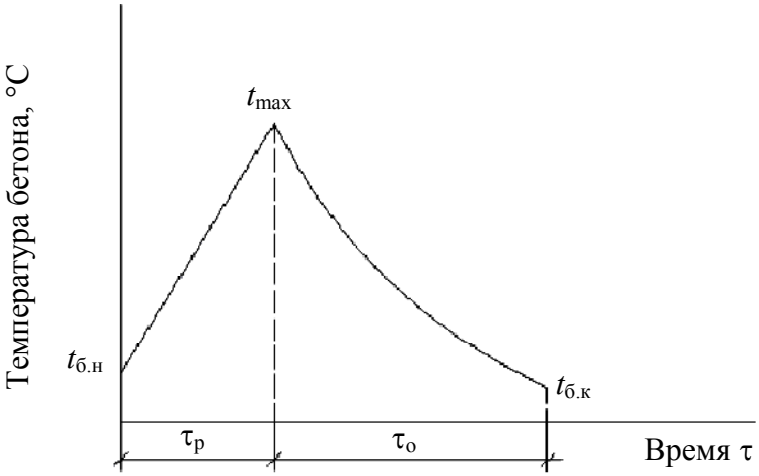


Рис. 2. Режим термообработки бетона методом электротермоса

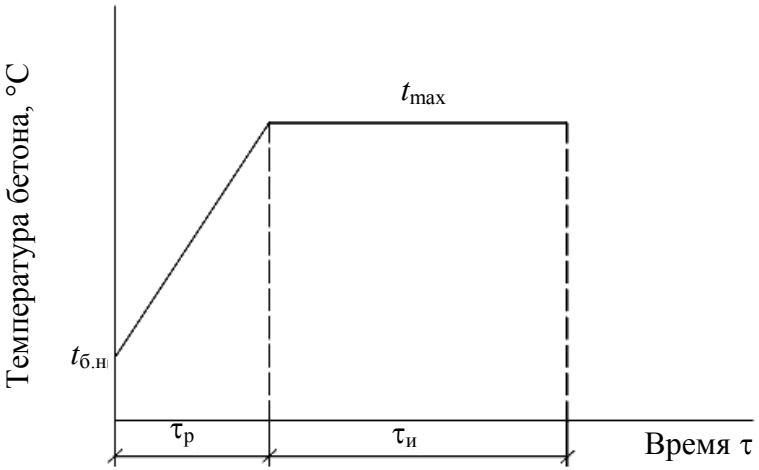


Рис. 3. Изотермический режим термообработки бетона

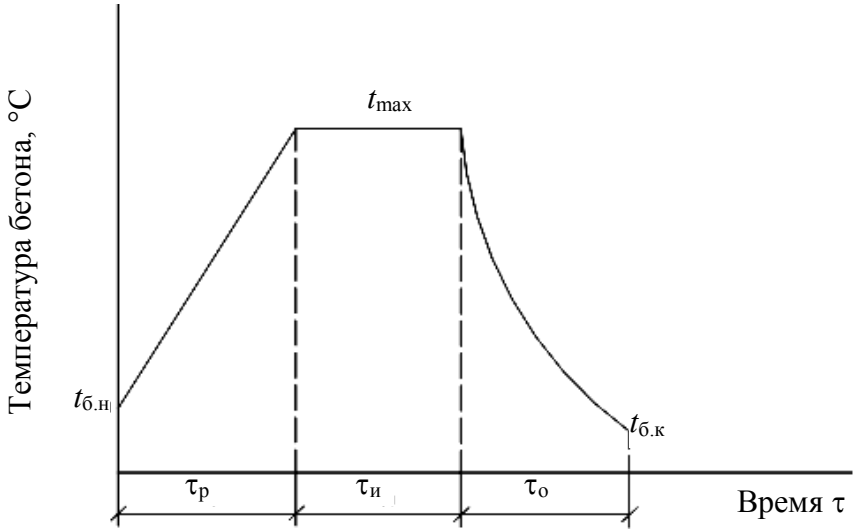


Рис. 4. Изотермический режим термообработки бетона с последующим остыванием

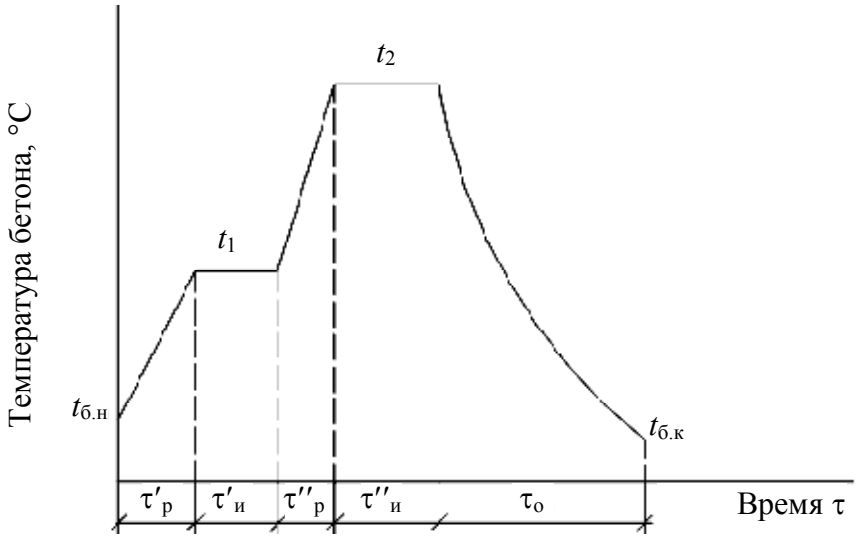


Рис. 5. Ступенчатый режим термообработки бетона

5. Режим остывания (рис. 6), по окончании которого бетон приобретает заданную прочность. Применяют при бетонировании с предварительным электроразогревом бетонной смеси.

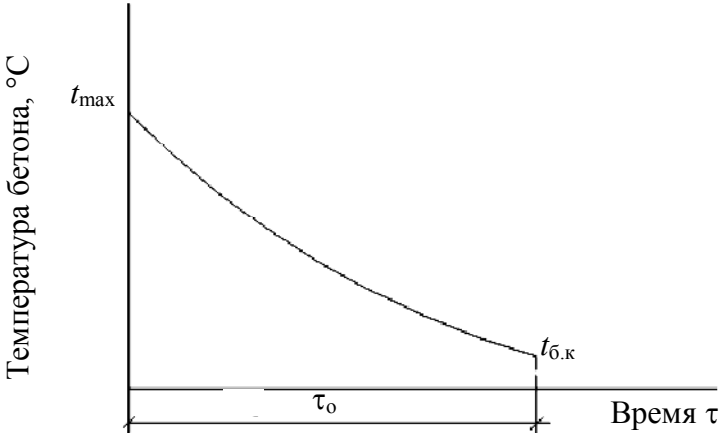


Рис. 6. Режим остывания бетона

6. Саморегулирующийся режим (рис. 7). Используют только при электродном прогреве с постоянной величиной напряжения на электродах (изменение температуры бетона при этом обратно пропорционально изменению удельного электрического сопротивления бетона; температура вначале повышается, достигает максимальной величины, затем медленно снижается). Режим применяют при электропрогреве бетона большого числа одинаковых конструкций, например стыков, включаемых под напряжение постоянной величины по мере окончания их бетонирования.

Температура бетонной смеси $t_{б.н}$, уложенной в опалубку, к началу термообработки бетона в зимнее время не должна быть ниже 0 °С.

Скорость подъема температуры при тепловой обработке бетона должна составлять:

– при модуле поверхности ($М_п$) до 4 – не более 5 °С/ч;

– при $М_п$ от 5 до 10 – не более 10 °С/ч;
– при $М_п$ свыше 10 – 15 °С/ч;
– для стыков – 20 °С/ч.

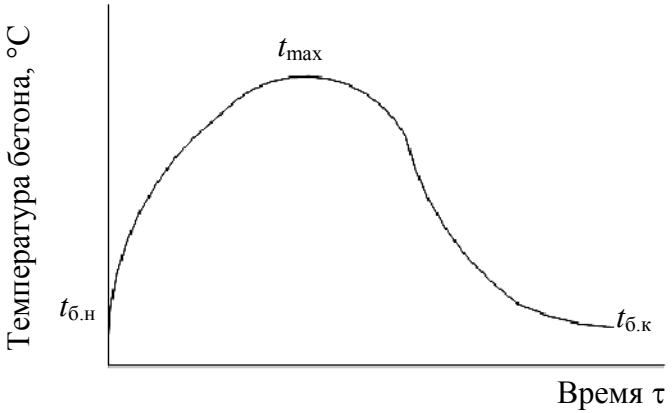


Рис. 7. Саморегулирующийся режим термообработки бетона

Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки для конструкций с модулем поверхности $М_п$:

– до 4 – не более 2–3°С /ч; (или определяется расчетом);
– от 5 до 10 – не более 5°С /ч;
– свыше 10 – не более 10°С /ч.

Температура изотермического прогрева бетона t_{max} не должна превышать значений, приведенных в табл. 3.

Таблица 3

Максимально допустимые температуры бетона при электропрогреве

Цемент	Максимальные температуры t_{max}, °С, для конструкций с модулем поверхности		
	6–9	10–15	16–20
Шлакопортландцемент и пуццолановый цемент	80	70	60
Портландцемент и быстротвердеющий портландцемент	70	65	55

1.3.2. Расчет режимов прогрева бетона

Исходными данными для расчета служат:

– вид и марка цемента;

– содержание цемента в бетоне (кг/м^3);

– требуемая прочность бетона к моменту окончания термообработки;

– соотношения размеров конструкции, определяющие ее массивность $М_п$;

– материал опалубки и ее толщина $\delta_{оп}$. Соотношения учитываемых параметров для различных конструкций опалубок приведены в табл. П.4.4;

– начальная температура бетона $t_{б.н}$;

– конечная температура бетона $t_{б.к}$;

– температура наружного воздуха $t_{н.в}$;

– скорость ветра U.

Расчет ведется в такой последовательности. Зная размеры конструкции и принятую систему ее опалубливания, определяют модуль поверхности по формуле:

$$М_п = F_к/V_к,$$

где $F_к$ – площадь охлаждаемой поверхности бетонной конструкции; $V_к$ – объем бетонной конструкции.

За охлаждаемые принимаются боковые и верхние поверхности. Нижняя поверхность не учитывается, т. к. бетон должен укладываться на отогретое до положительной температуры основание.

Зная $М_п$ конструкции и вид цемента, задают допустимую скорость подъема температуры и максимальную температуру. По этим величинам определяют время разогрева бетона:

$$\tau_р = \frac{t_{max} - t_{б.н}}{V_р},$$

где $V_р$ – скорость разогрева бетона.

С учетом времени разогрева $\tau_р$ и средней температуры разогрева $t^{р}_{б.ср}$ определяют прочность бетона при разогреве (пример определения прочности бетона за время разогрева приводится на рис. 8).

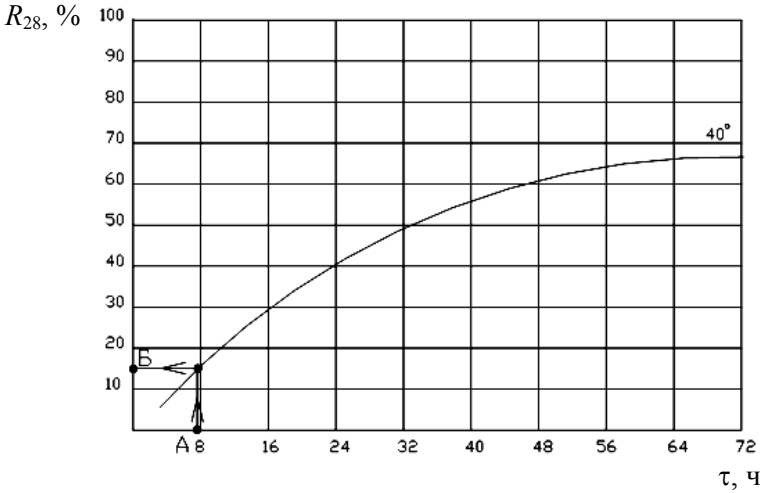


Рис. 8. График нарастания прочности бетона за время разогрева: средняя температура разогрева бетона $t^{р}_{б.ср}$ = 40 °С; продолжительность разогрева $\tau_р$ = 7,6 ч; получаемая прочность при разогреве 15 % от R_{28}

Затем находят время остывания конструкции $\tau_о$ от t_{max} до $t_{б.к}$ ($t_{б.к}$ следует принимать равной не более 5 °С и не менее 0 °С).

Время остывания конструкции определяют по формуле Б.Г. Скрамтаева:

$$\tau_о = \frac{C_б \cdot \gamma_б (t_{max} - t_{б.к}) + Ц \cdot Э}{3{,}6 \cdot K_т \cdot М_п (t_{б.ср} - t_{н.в})},$$

где $C_б$ – удельная теплоемкость бетона, принимаемая равной 1,05 кДж/(кг·°С); $\gamma_б$ – плотность бетона, кг/м^3; Э – тепловыделе-

ние цемента, кДж/кг, за время твердения бетона, определяемое по табл. 4 (при изотермическом режиме с остыванием по рис. 4 и при ступенчатом режиме с остыванием по рис. 5 тепловыделением цемента можно пренебречь, т. к. после окончания изотермического прогрева конструкции с температурой t_{max} оно незначительно); Ц – расход цемента в бетоне, кг/м^3; $K_т$ – коэффициент теплопередачи опалубки или укрытия неопалубленных поверхностей, Вт/(м^2·°С); t_{max} – температура изотермического прогрева (температура начала остывания бетонной конструкции), °С; $t_{б.ср}^{ост}$ – средняя температура за время остывания бетона, °С. Определяется по формуле:

$$t_{б.ср}^{ост} = t_{б.к} + \frac{t_{max} - t_{б.к}}{1,03 + 0,181 \cdot М_{п} + 0,006\left(t_{max} - t_{б.к}\right)}.$$

Таблица 4

Тепловыделение цементов различных видов и марок в зависимости от температуры твердения и времени твердения

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение, Дж/кг							
		Время твердения, сут							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портландцемент М300	10	8,4	25,9	41,9	83,9	125,7	188,6	230,6	272,4
	20	25,2	41,9	75,4	125,7	167,6	230,5	251,4	283,3
	40	50,3	83,8	146,7	188,6	230,5	251,4	293,3	–
	60	83,8	146,7	188,6	230,5	272,4	298,3	–	–
Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение, Дж/кг							
		Время твердения, сут							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портландцемент М400	5	–	–	29,3	62,9	108,9	188,4	209,5	251,4
	10	12,6	25,2	50,3	104,8	146,7	209,5	251,4	293,3

Окончание табл. 4

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение, Дж/кг							
		Время твердения, сут							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
	20	41,9	66,9	104,8	167,6	209,5	272,4	314,3	335,2
	40	83,7	133,9	188,6	230,5	272,4	314,3	335,2	–
	60	129,8	188,4	230,5	272,4	314,3	335,2	–	–
Портландцемент М500	5	12,6	25,2	41,9	88,8	125,7	188,6	230,5	272,4
	10	25,2	41,9	62,9	104,8	167,6	251,4	393,3	314,3
	20	41,9	83,8	125,7	188,6	251,4	293,3	335,2	377,1
	40	104,8	167,6	209,5	272,4	293,3	356,2	377,1	–
	60	188,6	230,5	272,4	314,3	356,2	377	–	–
БТЦ М600	10	33,5	50,3	75,4	125,7	167,6	372,4	335,2	377,1
	20	62,9	104,8	146,7	209,5	293,3	335,2	377,1	419
	40	117,3	188,6	230,5	293,3	335,2	377,1	419	–
	60	209,5	251,4	293,3	335,2	377,1	419	–	–
ШПЦ М300	10	–	25,2	33,5	62,9	104,8	167,6	209,5	230,5
	20	–	33,5	62,9	125,7	146,7	209,5	251,4	272,4
	40	41,9	75,4	117,3	167,6	209,5	251,4	272,4	–
	60	62,9	104,8	146,7	209,5	230,5	272,4	–	–

В зависимости от вида цемента по графику нарастания прочности находят прочность бетона, полученную за время его остывания.

Пример определения прочности бетона за время остывания приведен на рис. 9.

По сумме значений прочности, полученной при разогреве и остывании, определяют метод бетонирования:

– если прочность к концу термообработки соответствует требуемой (за время подъема температуры до t_{max} и за время остывания бетона от t_{max} до $t_{б.к}$), тогда задается электротермосный режим;

– если прочность ниже требуемой, то назначают тепловую обработку с использованием изотермического режима или изотермического режима с остыванием. При этом недостающее до заданного значение прочности (определяемое как разница между прочностью, требуемой к концу термообработки, и суммарным значением прочности, полученным за периоды $\tau_р$ и $\tau_о$) намечается получить за время изотермического прогрева.

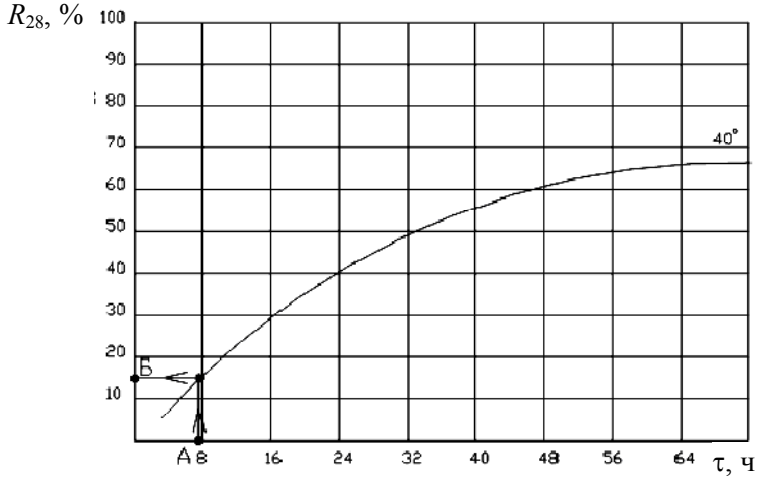


Рис. 9. График нарастания прочности бетона за время остывания: требуемая прочность бетона 70 % от R_{28}; средняя температура остывания бетона $t_{б.ср}$ = 37 °С; продолжительность остывания $\tau_о$ = 17 ч; полученное значение прочности за время остывания бетона равно 13 % от R_{28}

В этом случае по графику нарастания прочности бетона определяют время, в течение которого следует назначить изотермический прогрев для достижения прочности, равной $R_{треб}$ – – ($R_р$ + $R_о$).

Пример определения продолжительности изотермического прогрева приведен на рис. 10.

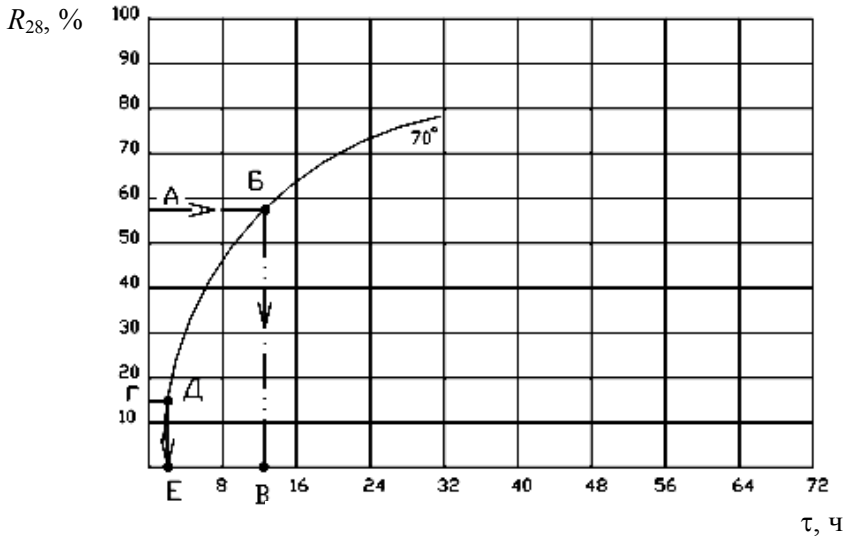


Рис. 10. График нарастания прочности бетона за время изотермического прогрева: максимальная температура прогрева бетона t_{max} = 70 °С; достигнутая прочность за время разогрева $R_р$ = 15 % от R_{28}; полученная прочность при остывании бетона 13 % от R_{28}; требуемая прочность при изотермическом прогреве: $R_и = R_{треб} – (R_р + R_о) =$ $= 70 – (15 +13) = 42$ % от R_{28}; продолжительность изотермического прогрева $\tau_и = 11$ ч

Коэффициент теплопередачи опалубок $K_т$ приведен в табл. П.4.4. Величина этого коэффициента зависит от конструкции опалубок и скорости ветра.

2. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И УКЛАДКИ БЕТОННОЙ СМЕСИ

2.1. Методика расчета температуры бетонной смеси на выходе из смесителя бетонного завода

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

$$t_{см} = \frac{t_{б.н} - t_{н.в} \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i}{1 - \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i},$$

где $t_{б.н}$ – нормативная температура бетонной смеси, °С, т. е. требуемый нижний предел температуры смеси по завершении укладки ее в опалубку либо выгрузки из транспортного средства в приемный бункер для разогрева перед подачей в опалубку; $t_{б.н} > 0$ °С (рекомендуется 2–5 °С) – в случае последующей тепловой интенсификации твердения бетона или применения предварительного разогрева смеси перед укладкой в опалубку (кроме нагнетательных способов подачи); $t_{б.н} > 20$ °С – при подаче бетонной смеси в опалубку нагнетательными способами; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха, °С; $\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i$ – д. ед., составляют потери температуры бетонной смесью на протяжении технологического цикла, включающего все операции, от выгрузки ее из смесителя в транспортное средство до отделки и влаго-, тепло-

изоляции поверхности забетонированной конструкции или до перегрузки смеси из транспортного средства в бункер для разогрева перед укладкой в опалубку, если используется предварительный разогрев бетона.

Снижение температуры бетонной смеси на отдельной *i*-й операции технологического цикла доставки ее на объект и укладки в опалубку, д. ед., определяют по формуле

$$\Delta t_i = \Delta t_i' \cdot \tau_i,$$

где $\Delta t_i'$ – относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения *i*-й операции за 1 мин при разнице температур смеси и наружного воздуха в 1 °С (°С/°С·мин), значения которого приведены в табл. 5; τ_i – продолжительность *i*-й операции в минутах.

Таблица 5

Значения $\Delta t_i'$

№ п/п	Наименование и условия выполнения операций	°С/(°С·мин)
1	Загрузка (погрузка или перегрузка) смеси 1 раз	0,032
2	Транспортирование смеси самосвалами:	
	до 2 м^3	0,003
	до 3,2 м^3	0,0025
	автобетоновозом с теплоизоляцией кузова (до 3,2 м^3)	0,00022
	автобадьевозом (до 1,6 м^3)	0,0009
	автобетоносмесителями:	
	до 2,5 м^3	0,0024
	до 3,5 м^3	0,0019
	до 5 м^3	0,0014
	более 5 м^3	0,001
	то же в зимнем исполнении	0,0004

Окончание табл. 5

№ п/п	Наименование и условия выполнения операций	°С/(°С·мин)
3	Подача смеси к месту укладки в опалубку (в °С/°С м):	
	нагнетательные методы, по бетоноводу на 1 м длины без утепления	0,003
	с утеплением в поворотных (неповоротных) бункерах (бадьях)	0,001; 0,0022
	краном на высоту *H*, м, на каждый метр	
	шахтным подъемником в утепленной шахте высотой *H*, м, на каждый метр	0,001
4	Укладка и уплотнение бетона в конструкцию с минимальным размером или толщиной слоя бетона, в м:	
	0,06	0,03
	0,10	0,018
	0,15	0,012
	0,2	0,009
	0,3	0,007
	0,4	0,006
	0,5	0,004
	> 0,6	0,003
5	Отделка (заглаживание) и гидротеплоизоляция поверхности, на 1 м^2 (в °С/°С·м^2); установка электродов после укладки бетона, за 1 мин	0,001
6	Подключение электродов, греющих проводов, намотка провода индуктора и его подключение после гидро-, теплоизоляции бетона	0,0004

2.1.1. Расчет параметров режима транспортирования смеси и процесса твердения бетона

Разрабатывают пооперационный график ведения работ (операций) технологического цикла доставки бетонной смеси на объект и укладки в опалубку в форме табл. 6.

Таблица 6

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

В графы табл. 6 заносят названия операций в их технологической последовательности и известные исходные данные, которые затем дополняют справочными характеристиками принимаемого для выполнения работ оборудования (механизмов) и расчетными данными о продолжительности отдельных операций технологического цикла транспортирования и укладки бетонной смеси.

Определяют расчетную продолжительность операций технологического цикла по следующей (примерной) схеме.

1. Время приготовления и загрузки бетонной смеси, мин:

$$\tau_{пр} = V_{бет}/П_{мин},$$

где $V_{бет}$ – объем бетонной смеси, м^3, перевозимой транспортным средством за один рейс (принимают по характеристике транспортного средства и конкретным условиям производства работ); $П_{мин}$ – производительность смесителя бетоносмесительного узла (БСУ), м^3/мин, которую определяют из зависимости

$$П_{мин} = \frac{V_{см} \cdot \beta \cdot n}{60}.$$

Здесь $V_{см}$ – объем смесителя на БСУ, м^3; β – коэффициент выхода бетона, значение которого определяют при расчете состава бетона или принимают по табл. 7; n – нормируемое количество

замесов бетоносмесителя в час, с учетом конкретных условий приготовления бетона, принимают по табл. 7.

Таблица 7

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Нормируемое количество замесов
1	Расчетное количество замесов в час, для приготовления на плотных заполнителях тяжелых бетонных и растворных смесей с автоматизированным дозированием, составляющих:		
	бетонные смеси, изготавливаемые в смесителях принудительного действия (жесткие и подвижные)		
	бетонные смеси, изготавливаемые в смесителях гравитационного действия	замес	35
	а) при объеме готового замеса бетонной смеси 500 л и менее:		
	подвижностью 1–4 см	замес	25
	подвижностью 5–9 см	замес	27
	подвижностью 10 см и более	замес	30
	б) при объеме готового замеса бетонной смеси более 500 л:		
	подвижностью 1–4 см	замес	20
	подвижностью 5–9 см	замес	22
	подвижностью 10 см и более	замес	25
	растворные смеси	замес	25
2	Расчетное количество замесов в час для приготовления легких бетонных смесей в бетоносмесителях принудительного действия с автоматизированным дозированием составляющих при плотности бетона в высушенном состоянии:		
	более 1700 кг/м^3	замес	20
	от 1400 до 1700 кг/м^3	замес	17

Окончание табл. 7

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Нормируемое количество замесов
	от 1000 до 1400 кг/м^3	замес	15
	1000 кг/м^3 и менее	замес	13
3	Коэффициент (β) выхода смесей в плотном теле:		
	бетонных тяжелых и легких (только для конструкционного бетона)		0,67
	легких (для конструкционно-теплоизоляционного бетона)		0,75
	растворных		0,80

2. Время загрузки бетонной смеси в транспортное средство, мин, определяют по зависимости

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

где $\tau_{\text{выг}}$ – время выгрузки бетоносмесителя, мин, принимаемое равным 0,25–0,5 мин для смесителей принудительного действия и 0,25 мин – для гравитационных смесителей; $n_{\text{зам}}$ – количество замесов бетоносмесителя, необходимое для загрузки транспортного средства на 1 рейс, т. е.

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

Время загрузки бетонной смеси в расчетах следует выделять из общих затрат времени на ее приготовление и выгрузку, так как при свободном падении через холодный воздух смесь наиболее интенсивно охлаждается (см. данные табл. 5).

Время, которое бетонная смесь будет накапливаться в транспортном средстве за период его нахождения на БСУ под

погрузкой (за вычетом времени загрузки смеси), в расчетах следует суммировать со временем перевозки бетонной смеси для определения общих потерь ее температуры за этот период. Относительное снижение температуры бетонной смеси ($\Delta t'_i$) при этом принимают по табл. 5. Таким же образом учитывают возможный период ожидания перед выгрузкой смеси на объекте.

3. Время транспортирования бетонной смеси, мин:

$$\tau_{тр} = L_{тр} / V_{ср} \cdot 60,$$

где $L_{тр}$ – расстояние транспортирования, км; $V_{ср}$ – средняя скорость транспортирования, принимается равной 30 и 15 км/ч для дорог с жестким и мягким покрытием, соответственно.

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

$$\tau_2 = \tau_{пог} + \tau_{тр} + \tau_{ман},$$

где $\tau_{пог} = \tau_{пр} - \tau_1$ – время нахождения транспортного средства на погрузке за вычетом времени загрузки смеси, мин; $\tau_{ман}$ – время маневров до разгрузки, принимается в зависимости от типа машин от 3 до 10 мин.

4. Время выгрузки бетонной смеси в приемное устройство (бункер, бадью), мин:

$$\tau_3 = V_{бет} / V_{выг},$$

где $V_{выг}$ – скорость выгрузки транспортных средств для автобетоносмесителей, равная 0,25–1,0 м^3/мин, для прочих транспортных средств рекомендуемые значения 0,5–2,0 м^3/мин.

5. Относительные потери температуры бетонной смеси при подаче ее в опалубку (Δt_4), °С, определяют исходя из длины бетоновода (трубопровода), при использовании бетононасосов или

пневмонагнетательных установок (агрегатов), либо с учетом расстояния (высоты) перемещения бункера (бадьи) краном или подъемником. Расчет ведут по следующим зависимостям:

$$\Delta t_4 = \Delta t'_{i\text{б}} \cdot l_{\text{б}};$$

$$\Delta t_4 = \Delta t'_{i\text{к}} \cdot H,$$

где $\Delta t'_{i\text{б}}$ и $\Delta t'_{i\text{к}}$ – соответственно, относительное снижение температуры бетонной смеси при подаче ее в опалубку по бетоноводу или в бункере (бадье) краном или подъемником на 1 м ее перемещения (табл. 5),°С/(°С·м); $l_{\text{б}}$ и H – длина бетоновода или расстояние (высота) подачи бункера (бадьи) краном или подъемником, м.

6. Время укладки и уплотнения бетона, мин, определяют по зависимости

$$\tau_5 = \frac{V_{\text{б}}}{\text{П}},$$

где $V_{\text{б}}$ – объем укладываемого бетона, м^3, при рекомендуемой высоте единовременно укладываемого слоя до 400 мм для смесей на заполнителях плотных горных пород и до 200 мм для смесей на пористых легких заполнителях и допускаемой высоте слоя бетона не более $1{,}15l_{\text{вибр}}$; $l_{\text{вибр}}$ – длина вибровозбудителя глубинного вибратора; П – производительность, с которой укладывается в опалубку (захватку) бетон, м^3/мин.

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

$$t_{\text{в}} = K_{\text{в}} \cdot R_{\text{сд}}(1 - V_{\text{р.с}}),$$

где $K_{\text{в}}$ – коэффициент, зависящий от параметров вибрирования, $K_{\text{в}} \sim 0{,}05$–$0{,}02$ при частоте колебаний $f \sim 50... > 200$ Гц, соответственно, доли ед.; $R_{\text{сд}}$ – предельное напряжение сдвига бетонной

смеси в Па. Его значение в расчетах может быть принято при отсутствии расчетных данных для бетонных смесей подвижностью марок П1–П4 в пределах 1500–500 Па, соответственно; $V_{р.с}$ – объем растворной составляющей в бетоне, м, равный:

$$V_{р.с} = 1 - V_{щ}, \text{ или } V_{р.с} = 1 - \frac{Щ}{\rho_{щ}},$$

где $V_{щ}$ – абсолютный объем щебня в бетоне при его содержании (расходе) в 1 м^3; Щ – расход щебня, кг/м^3; $\rho_{щ}$ – плотность зерен горной породы.

При уплотнении укладываемого бетона с помощью навесных вибраторов производительность будет соответствовать объему слоя бетона, отнесенному ко времени его распределения в опалубке и виброуплотнения, м^3/мин:

$$П = 2K_{исп} \cdot b \cdot R \cdot h \frac{60}{\tau_{в} + \tau_{пер}},$$

где $K_{исп}$ – коэффициент использования вибратора, принимаемый равным 0,85; b – ширина слоя уплотняемой смеси в опалубке, м (при $b > R$, принимают равным R); R – радиус действия вибратора, м, который принимают по справочным данным; в расчетах допускается принять $R \sim 0{,}3–0{,}5$ м; h – высота слоя уплотняемого бетона, м; $\tau_{в}$ – минимально необходимое время вибрирования, с; $\tau_{пер}$ – время перестановки вибратора (5–10 с).

Производительность при укладке и уплотнении бетона с помощью виброреек определяют, относя объем бетона захватки к времени распределения бетонной смеси в направляющих и виброуплотнения бетона. Следует учитывать, что параметры вибрирования виброреек характеризуются частотой $f \sim 50$ Гц, а высота укладываемого слоя бетона должна быть не более 250 мм при однослойном расположении арматуры (по высоте конструкции) и 120 мм – при расположении арматуры в 2 слоя.

При большой толщине слоев бетона его следует вначале уплотнять глубинным вибратором, а затем – виброрейкой. В последнем случае производительность определяют с учетом общих затрат времени на уплотнение бетона.

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

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

где $\Delta t'_{\text{отд}}$, $\Delta t'_{\text{у.э}}$ и $\Delta t'_{\text{под}}$ – соответственно, относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения операций по заглаживанию и гидро-, теплоизоляции открытой поверхности бетона, °С/(°С·м^2), и операции по установке электродов (табл. 5), а также при выполнении операций после гидро-, теплоизоляции неопалубленной поверхности бетона (табл. 5),°С/(°С·мин); F – площадь неопалубленной поверхности бетона захватки или конструкции, м^2; $\tau_{\text{у.э}}$, $\tau_{\text{под}}$ – время установки электродов и время подключения их к сети (время навивки обмотки индуктора или сборки ее из инвентарных элементов, подключения греющих проводов и др.), соответственно, мин.

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

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \approx \Delta t_1 \cdot \tau_1 + \Delta t_2 \cdot \tau_2 + \Delta t_3 \cdot \tau_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 \cdot \tau_5 + \Delta t_6,$$

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

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \approx \Delta t_1 \cdot \tau_1 + \Delta t_2 \cdot \tau_2 + \Delta t_3 \cdot \tau_3,$$

где Δt_1, Δt_2, Δt_3, Δt_5 – относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения операций ее загрузки, транспортирования, выгрузки в бункер (бадью, приемное устройство) и укладки бетонной смеси в опалубку, соответственно (по табл. 5), °С/(°С·мин); τ_1, τ_2, τ_3 и τ_5 – время выполнения операций загрузки, транспортирования, выгрузки и укладки смеси в опалубку, мин; Δt_4 и Δt_6 – относительные потери температуры бетонной смеси при подаче ее в опалубку и при выполнении финишных работ, °С/(°С·мин).

8. Определяют требуемую температуру бетонной смеси на выходе из смесителя по формуле на основании полученного значения $\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i$ принятой величины температуры бетона к началу прогрева или предварительного разогрева его перед укладкой в опалубку ($t_{б.н}$), с учетом физической (или расчетной) температуры наружного воздуха ($t_{н.в}$):

$$t_{см} = \frac{t_{б.н} - t_{н.в} \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i}{1 - \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i}.$$

2.1.2. Расчет температуры бетонной смеси на выходе из смесителя бетонного завода

Задание. Рассчитать требуемую температуру бетонной смеси на выходе из бетоносмесителя, с учетом ее потерь, при следующих исходных данных:

– температура бетона после укладки в опалубку $t_{б.н} = 3$ °С;

– средняя температура наружного воздуха $t_{н.в} = –10$ °С;

– расстояние транспортирования (жесткое покрытие) $l = 20$ км;

– объем бетона $V_{бет} = 4$ м^3, перевозка автобетоносмесителем;

– объем смесителя на бетоносмесительном узле (БСУ) $V_{см} = 1{,}5$ м^3;

– прием смеси (подвижность – 6–7 см) на объекте – выгрузка за 2 приема в опрокидные бадьи; время маневров до разгрузки – 8 мин;

– подача смеси в бадье краном на высоту H – 15 м;

– укладка в опалубку несущей стены с размерами в плане 7,5×0,3 м;

– уплотнение бетона глубинным вибратором (например, ИВ-47Б, принятый радиус воздействия $R \sim 0{,}3$ м) при высоте слоя бетона $h \sim 0{,}40$ м;

– твердение бетона – электродный прогрев; электроды установлены при ведении арматурных работ, поэтому финишные работы включают заглаживание поверхности, гидро-, теплоизоляцию бетона с одновременным выполнением работ по подключению электродов к питающей сети.

Последовательность и результаты расчета

1. Производительность смесителя БСУ, м^3/мин, для рассматриваемого случая при $\beta = 0{,}67$ (табл. 7) и $n = 22$ замеса соответствует:

$$П_{мин} = \frac{V_{см} \cdot \beta \cdot n}{60};$$

$$П_{мин} = \frac{1{,}5 \cdot 0{,}67 \cdot 22}{60} = 0{,}37, \text{м}^3/\text{мин}.$$

2. Время приготовления и загрузки смеси, мин:

$$\tau_{пр} = V_{бет}/П_{мин},$$

$$\tau_{пр} = 4/0{,}37 = 11 \text{ мин.}$$

3. Количество замесов для загрузки автобетоносмесителя:

$$n_{зам} = \frac{V_{бет}}{V_{см} \cdot \beta};$$

$$n_{зам} = \frac{4}{1{,}5 \cdot 0{,}67} \text{ зам.}$$

4. Время загрузки смеси в автобетоносмеситель, мин:

$$\tau_1 = \tau_{выг} \cdot n_{зам};$$

$$\tau_1 = 0{,}5 \cdot 4 = 2{,}0 \text{ мин.}$$

5. Время транспортирования смеси, мин:

$$\tau_{тр} = \frac{L_{тр}}{V_{ср} \cdot 60};$$

$$\tau_{тр} = 20/(30 \cdot 60) = 40 \text{ мин.}$$

6. Общее время транспортирования смеси с учетом ожидания при загрузке и выгрузке, мин, составит:

$$\tau_2 = \tau_{пог} + \tau_{тр} + \tau_{ман};$$

$$\tau_2 = 40 + (11 + 2) + 8 = 57 \text{ мин.}$$

7. Время выгрузки смеси, мин:

$$\tau_3 = V_{бет}/V_{выг};$$

$$\tau_3 = 4/1{,}0 = 4 \text{ мин.}$$

8. Относительные потери температуры смеси при подаче к опалубке при $\Delta t'_{ik} = 0{,}0022$ (п. 3, табл. 5) найдем по формуле

$$\Delta t_4 = \Delta t'_{ik} \cdot H = 0{,}0022 \cdot 15 = 0{,}033 \text{ мин.}$$

Производительность работ по укладке и уплотнению бетона с глубинным вибратором, м^3/мин, при $R \sim 0{,}4$ м, $\tau_в \sim 25$ с, $\tau_{пер} \sim 5$ с найдем по формуле:

$$П = 2K_{исп} \cdot b \cdot R \cdot h \cdot 60/(\tau_в - \tau_{пер});$$

$$П = 2 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}40 \cdot 60/(25 + 5) = 0{,}163 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

9. Время укладки и уплотнения бетона, мин:

$$\tau_5 = \frac{V_б}{П};$$

$$\tau_5 = 4/0{,}163 = 25 \text{ мин}.$$

10. Относительные потери температуры на финишных работах при площади заглаживаемой и гидро-, теплоизолируемой поверхности бетона $F = 2{,}25$ м^2, времени подключения электродов к питающей сети, например $\tau_{под} = 15$ мин, будут равны (пп. 5 и 6 табл. 5):

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

$$\Delta t_6 = 0{,}001 \cdot 2{,}25 + 0{,}0004 \cdot 15 = 0{,}00825 \text{ °C}/(\text{°C} \cdot \text{мин}).$$

Суммарные относительные потери температуры на всех технологических переделах транспортирования и укладки бетона

$$\Sigma\Delta t_п = 0{,}032 \cdot 2 + 0{,}0014 \cdot 57 + 0{,}032 \cdot 4 + 0{,}033 +$$

$$+ 0{,}007 \cdot 25 + 0{,}00825 \approx 0{,}486.$$

Требуемую температуру бетонной смеси на выходе из смесителя находим по формуле

$$t_{см} = \frac{t_{б.н} - t_{н.в} \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i}{1 - \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i},$$

или $t_{см} = (3 + 10 \cdot 0{,}486)/(1 \cdot 0{,}486) = 15$ °C.

Она обеспечит к началу прогрева (подачи электрической энергии) свежеуложенного бетона температуру $t_{б.н}$ больше 3 °С.

2.2. Методика расчета парка машин для транспортирования бетонной смеси

При выборе автотранспортных средств для перевозки бетонной смеси необходимо учитывать расстояние (или время) транспортирования, класс дороги, погодные условия и подвижность смеси.

Максимально допустимое расстояние перевозки бетонной смеси $l_{доп}$ рекомендуется ориентировочно принимать по табл. 8 и 9.

Таблица 8

Время и предельная дальность транспортирования разогретых бетонных смесей подвижностью до 3 см в автосамосвалах* по дорогам с жестким покрытием

$t_{н.в}$, °С	$t_{б.н}$, °С	Предельно допустимые	
		дальность транспортирования, км, при V = 30 км/ч	время транспортирования, мин
От –40 до –50	От +30 до +45	15	30
От –30 до –40	От +20 до +30	22,5	45
От –20 до –30	От +10 до +20	30	60
От 0 до –30	От +20 до +30	30	60
От 0 до –30	От +10 до +20	45	90

Примечание. При подвижности бетонной смеси более 3 см для определения предельной дальности и времени транспортирования следует пользоваться табл. 9.

* Автосамосвалы грузоподъемностью > 5 т рекомендуется применять в том случае, когда в технологической карте по производству бетонных работ в зимних условиях экономически обоснована технология «кран – бадья», а также применение жестких бетонных смесей.

Таблица 9

Максимально технологически допустимые расстояния транспортирования бетонной смеси

Подвижность бетонной смеси, см	Вид дорожного покрытия	Скорость транспортирования, км/ч	Расстояние, км					
			Автобетоносмеситель			Автобетоновоз	Автосамосвал	Автобадьевоз
			Режим транспортирования					
			А	Б	В	Готовая смесь без побуждения в пути		
1–3	Жесткое, асфальтовое, асфальтобетон и т. д.	30	Не ограничено	до 120	до 100	до 45	30	25
4–6				100	80	30	20	15
7–9				80	60	20	15	10
10–14				60	45	15	10	8
1–3	Мягкое, грунтовое, улучшенное	15	Применение не рекомендуется ввиду возможности быстрого выхода из строя			12	7,5	5
4–6						8	5,0	3
7–9						5,4	3,7	2
						4,0	2,5	1,6

При транспортировании бетонная смесь меняет свою подвижность, поэтому на заводе заранее должна быть учтена эта величина по формуле

$$ОК_З = \frac{ОК_{об}}{\eta \cdot \mu},$$

где $ОК_З$ и $ОК_{об}$ – осадка конуса, соответственно, на заводе (до перевозки) и на строительном объекте (после перевозки); η – коэффициент потери подвижности, зависящий от дальности транспор-

тирования, определяется по графику (рис. 11); $\eta = \frac{ОК_{об}}{ОК_з}$, %; μ – коэффициент потери подвижности, зависящий от температуры окружающей среды, принимается по табл. 10.

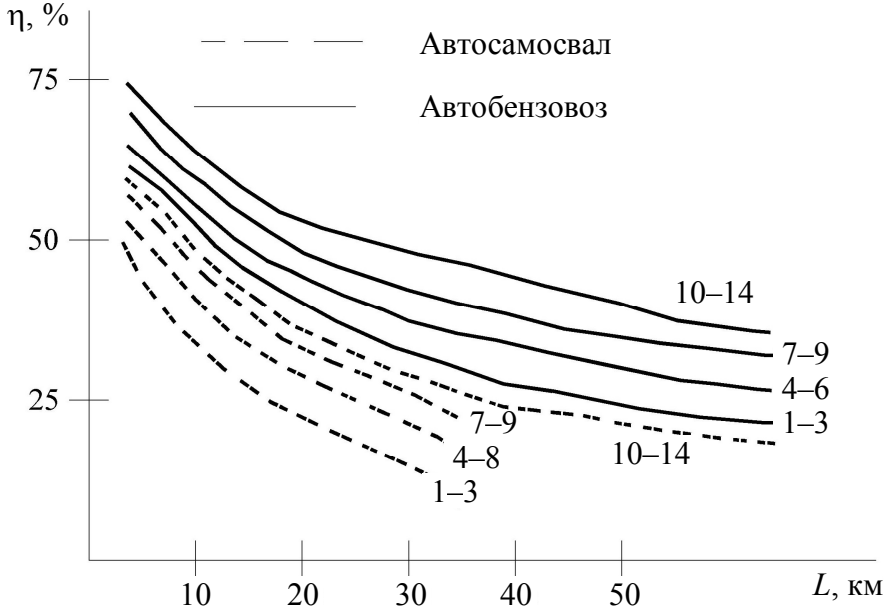


Рис. 11. Зависимость коэффициента потери подвижности от дальности транспортирования бетонной смеси

Таблица 10

Температурный коэффициент потери подвижности смеси μ

Тип машины	Значение коэффициента μ при температуре окружающей среды, °С			
	От –20 до –4	От –5 до +5	От +6 до +20	От +21 до +30
Автобетоновозы	1,10	1,25	1,1	1
Автосамосвалы	1,25	1,4	1,25	1

Бетонную смесь приходится транспортировать по дорогам с различным типом покрытия. Непременным условием в данном случае является ограничение приведенной дальности транспортирования смеси, которая не должна превышать допустимой по дорогам с жестким покрытием:

$$L_{\text{прив}} \le L_{\text{доп}},$$

где $L_{\text{прив}}$ – приведенная дальность транспортирования смеси; $L_{\text{доп}}$ – допустимая дальность транспортирования смеси.

Приведенная дальность транспортирования определяется как сумма произведений расстояния дорог с различным типом покрытия и коэффициента дорожного покрытия K_q:

$$L_{\text{прив}} = \sum_{n \le 1}^{i} L \cdot K_q = L_{\text{доп}},$$

где i – количество участков с различным типом покрытия; L – длина этих участков, км; K_q – коэффициент дорожного покрытия (определяется по табл. 11).

Таблица 11

Значение коэффициента K_q

Вид покрытия дорог	Скорость перевозки, км/ч	Тип автомашины		
		Автосамосвал	Автобетоновоз	Автобадьевоз*
Жесткое (асфальт, бетон, асфальтобетон и т. д.)	30	1	1	1
Мягкое (грунтовое улучшенное)	15	4	3,7	5

В этом случае (если $L_{\text{прив}}$ превышает допустимое расстояние) необходимо подобрать другой маршрут или применить автобетоносмеситель.

Снижение температуры бетонной смеси после ее транспортирования можно определить по формуле

$$t_{\text{тр}} = t_{\text{з}} \pm n \cdot \Delta t_{\text{тр}},$$

где n – коэффициент, зависящий от места расположения смеси в автосамосвале, $n = 1$ при расчете средней температуры всей перевозимой массы; t_3 – температура бетонной смеси в момент ее приготовления и загрузки автомашины; $\Delta t_{\text{тр}}$ – изменение средней температуры бетонной смеси в процессе ее транспортирования

$$\Delta t_{\text{тр}} = \Delta t'_{\text{тр}} \cdot \Delta T \cdot \tau,$$

где $\Delta t'_{\text{тр}}$ – изменение температуры бетонной смеси $\left(\frac{\text{град}}{\text{град} \cdot \text{мин}}\right)$ при транспортировке в течение одной минуты в условиях перепада температур бетонной смеси и окружающего воздуха в 1 °С (значения $\Delta t'_{\text{тр}}$ приведены в табл. 12); ΔT – перепад температур наружного воздуха и перевозимой бетонной смеси, град; τ – время транспортирования смеси, мин.

Знак «минус» берется в случае остывания смеси при перевозке в зимних условиях, знак «плюс» – в летних.

Таблица 12

Изменение температуры $\Delta t'_{\text{тр}}$ при транспортировке различными автосредствами

Способ транспортирования	Марка транспортирующего устройства	Объем перевозимой смеси, м^3	$t_{\text{б.п}}$ град/град × × мин
Автосамосвалы	ЗИЛ-ММЗ-555	2	0,003
	МАЗ-50051	3,2	0,0025
Автобадьевозы	Бадья опрокидная прямоугольная	0,3	0,0022
	Бадья цилиндрическая со шторно-роликовым затвором	1,6	0,0009

Значения $\Delta t_{тр} = \Delta t_{ср}$ (при $n = 1$) и $\Delta t_{тр} = \Delta t_{тр}^{max}$ (при $n = 2$) для автосамосвалов в зависимости от ΔT и τ можно ориентировочно определить по рис. 12.

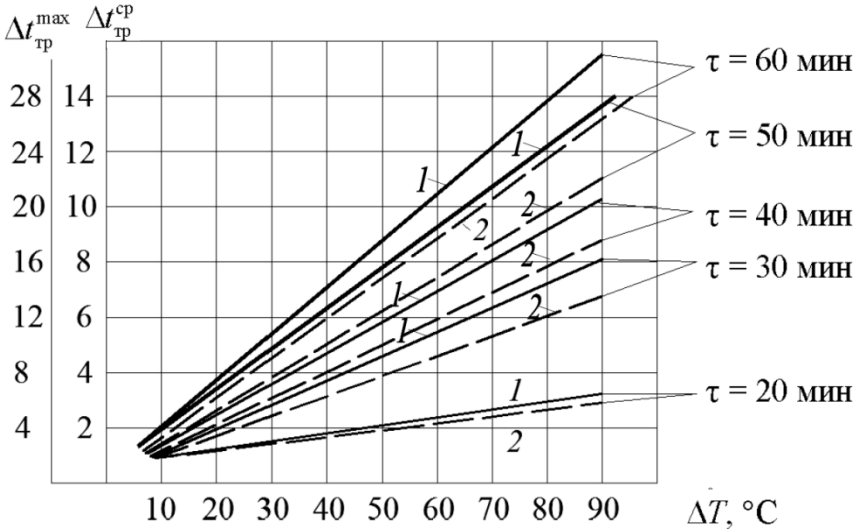


Рис. 12. Теплоизменение бетонной смеси при перевозке в автосамосвалах типа:

1 – МАЗ-5551-020; *2* – КАМАЗ-55111; τ – время транспортирования; ΔT – перепад температуры бетонной смеси и наружного воздуха; $\Delta t_{тр}^{max}$ – максимальное температурное изменение бетонной смеси, °С; $\Delta t_{тр}^{ср}$ – среднее температурное изменение бетонной смеси, °С

При определении минимальной (зимние условия) и максимальной (летние условия) температур верхнего и нижнего слоев перевозимой в автомашине смеси берем $n = 2$.

Количество транспорта, необходимое для перевозки бетонной смеси, при соблюдении заданного темпа бетонирования $\frac{Q}{S} = P_i$ определяется из условия

$$\sum_{i=1}^{n} N = \frac{Q_i \cdot \gamma_б \cdot L_{трi}}{\omega_i \cdot S},$$

где i – количество автомашин данного типа; Q – общий объем укладываемой бетонной смеси, м^3; $\gamma_б$ – плотность бетонной смеси, кг/м^3, $Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i$; Q_i – объем смеси, перевозимой с данного завода в данном типе автомашины, м^3; $L_{трi}$ – расстояние маршрута от завода до объекта, по которому производится перевозка смеси в данном типе автомашин, км; ω_i – выполняемая одним автомобилем полезная работа в тонно-километрах при перевозке бетонной смеси с данного завода на данный объект.

$$\omega_i = n_i \cdot g_i \beta_i L_{трi},$$

где n_i – число оборотов данного автомобиля в смену; g_i – грузоподъемность автомашины; β_i – коэффициент использования грузоподъемности; S – количество смен, в течение которых должно быть произведено бетонирование; P_i – масса перевозимого автомашиной груза $P_i = Q_i \cdot \gamma_б$; $\gamma_б$ – объемная масса бетонной смеси, равная 2,4 т/м^3.

$$n_i = \frac{T}{t_{об}},$$

где T – время одной смены; $t_{об}$ – время оборота одного автомобиля:

$$t_{об} = t_{пi} + t_{рi} + t_{мi} + t_{пер} + \frac{L_{грi}}{\upsilon_{грi}} + \frac{L_{порi}}{\upsilon_{порi}},$$

где $t_{пi}$ – время загрузки; $t_{рi}$ – время выгрузки; $t_{мi}$ – время маневров до разгрузки; $t_{пер}$ – дополнительное время для перемешивания смеси (для автобетоносмесителей); $L_{грi}$ – расстояние маршрута перевозки бетонной смеси от данного завода до данного

объекта; $L_{\text{пор}i}$ – расстояние маршрута порожнего рейса от данного объекта до данного завода; $\upsilon_{\text{гр}i}$ – скорость автомашины с грузом; $\upsilon_{\text{пор}i}$ – скорость автомашины без груза. В расшифрованном виде формула будет следующей:

$$\sum_{i=1}^{n} N_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{P}{T_{qi}\beta_i}\left(t_{ni} + t_{\text{р}i} + t_{\text{м}i} + t_{\text{пер}} + \frac{L_{\text{гр}i}}{\upsilon_{\text{гр}i}} + \frac{L_{\text{пор}i}}{\upsilon_{\text{пор}i}}\right).$$

2.2.1. Пример расчета парка машин для транспортирования бетонной смеси

Определить парк машин для транспортирования бетонной смеси. Запроектировать производство бетонных работ на нефтехимическом комбинате.

Бетонирование должно происходить в три этапа. На первом этапе, продолжающемся один месяц, темп бетонирования составляет P_1 = 200 м^3/смену; на втором (в течение 2-х мес) P_2 = 500 м^3/смену, на третьем этапе (в течение 3-х мес) P_3 = 250 м^3/см. Доставка бетонной смеси на объект производится с трех заводов. Мощность первого завода – 200 м^3/смену, второго – 180 м^3/смену, третьего – 250 м^3/смену. Среднее расстояние пробега груженого автомобиля l соответственно с первого завода до объекта составляет 8 км, с третьего – 40 км по асфальтированным дорогам.

Со второго завода существует два выездных пути: 1) 10 км по асфальтированной дороге и 2 км по проселочной; 2) 6 км по проселочной дороге. Расстояние пробега груженых и порожних рейсов совпадает. Скорость движения груженого и порожнего автотранспорта по различным дорогам указана в табл. 13.

Бетон, доставленный на объект, должен иметь подвижность $\text{ОК}_{\text{об}}$ = 4–6 см. Доставка идет при температуре наружного воздуха +8 °С.

Таблица 13

Скорость движения различных машин в зависимости от дорожного покрытия, км/ч

Тип пробега	Тип дорожного покрытия	Тип автомашины		
		Автосамосвал	Автобетоновоз	Автобетоносмеситель
Груженый	Жесткое	30	30	25
	Мягкое	15	15	15
Порожний	Жесткое	40	40	35
	Мягкое	20	20	18
Масса перевозимой за одну поездку смеси, т	–	6	7,68	7,68

Определить:

1) маршруты и типы машин, осуществляющие перевозки с завода на строительный объект;

2) количество автомашин, доставляющих смеси с каждого из заводов;

3) подвижность бетонной смеси.

Решение:

1. Бетонная смесь с первого и третьего заводов транспортируется по асфальтированной дороге одним маршрутом. С первого завода бетон можно подавать автосамосвалами, так как расстояние от завода до объекта меньше допустимого ($l \le l_{\text{доп}}$).

Третий завод находится на расстоянии 40 км. На это расстояние допускается транспортирование бетона с ОК = 1–3 см. Допустимое расстояние $l_{\text{доп}}$ для осадки конуса 4–6 см будет равно 30 км, отсюда

$$l = 40\,\text{км} > l_{\text{доп}} = 30\,\text{км}.$$

Таким образом, перевозка смеси с третьего завода не может осуществляться в автобетоновозах или автосамосвалах (см. табл. 9). В этом случае бетонную смесь необходимо транс-

портировать автобетоносмесителем. Учитывая, что транспортирование смеси со второго завода возможно двумя маршрутами, необходимо помимо типа автомашин выбрать также наиболее рациональный маршрут.

По проселочной дороге расстояние от второго завода до объекта 6 км, что больше $l_{доп}$ для автосамосвала и меньше $l_{доп}$ для автобетоновоза. Следовательно, по этой дороге можно везти смесь только автобетоновозом.

Приведенное расстояние при перевозке смеси автобетоновозом по проселочной дороге (второй маршрут) составит:

$$l_{2прив} = 6 \cdot 3,7 = 22,2 \text{ км}.$$

На первом маршруте (асфальтированная дорога) приведенное расстояние $l_{1прив} = 10 + 2 \cdot 3,7 = 10 + 7,4 = 17,4$ км, следовательно на этом маршруте необходимо применять автобетоновоз.

Сравнивая $l_{1прив}$ и $l_{2прив}$, устанавливаем, что транспортирование со второго завода на строительный объект должно осуществляться автобетоновозами по первому маршруту, несмотря на то, что он практически в два раза длиннее.

2. Определяем количество автомашин каждого типа для транспортирования бетонной смеси. Пооперационные затраты времени представлены в табл. 14.

Выход смеси из бетоносмесителей кратен 0,8 м^3. Для транспортирования смеси рекомендованы автосамосвалы и автобетоновозы. Объем перевозимого бетона в этом транспорте составит 3,2 м^3 (7,68 т). Коэффициент использования грузоподъемности автомобиля равен:

$$\beta = \frac{7,68}{8} = 0,96.$$

На первом этапе работ бетонная смесь будет подаваться с первого завода, который обеспечит заданный темп бетонирования, равный

$P_1 = 200$ м^3/смену, или $P_1 = 200$ м$^3 \cdot 2{,}4 = 480$ т/смену.

В автохозяйстве имеются самосвалы грузоподъемностью 8 т.

Таблица 14

Данные для расчета *t* цикла

Параметр перевозки	Автобетоно-смеситель	Автобетоно-воз	Автосамосвал
Время погрузки, мин	12	6	6
Время разгрузки, мин	15	1,5	3
Время маневрирования, мин	6	3	3
Время перемешивания, мин	15	–	–
Коэффициент использования грузоподъемности	1	0,96	0,96
Объем перевозимой за одну поездку смеси	2,5	3,2	3,2

На первом этапе используется один тип автомашин ($i = 1$). Автосамосвал не перемешивает смесь в пути, поэтому $t_{\text{пер}} = 0$, следовательно формула примет вид

$$N_1 = \frac{P}{Tq_1\beta_1}\left(t_{n1} + t_{\text{р}1} + t_{\text{м}1} + \frac{l_{\text{гр}1}}{\upsilon_{\text{гр}1}} + \frac{l_{\text{пор}i}}{\upsilon_{\text{пор}i}}\right),$$

или $$N_1 = \frac{480}{8 \cdot 8 \cdot 0{,}96}\left(0{,}1 + 0{,}025 + 0{,}5 + \frac{8}{30} + \frac{5}{40}\right) = 4{,}45 \approx 5.$$

На втором этапе необходим темп бетонирования $P_2 = 500$ м^3/смену, для чего потребуется совместная работа всех трех заводов:

$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

где $P_1 = 200$ м^3/смену; $P_2 = 180$ м^3/смену; $P_3 = 120$ м^3/смену, или $P_1 = 480$ т/смену; $P_2 = 432$ т/смену; $P_3 = 288$ т/смену.

Общее количество машин определяется из условия

$$\sum_{i=1}^{n} N_i = N_1 + N_2 + N_3,$$

где N_1 – количество автосамосвалов; N_2 – количество автобетоновозов; N_3 – количество автобетоносмесителей.

Найдем количество автобетоновозов, перевозящих смесь со второго завода:

$$N_2 = \frac{432}{8 \cdot 8 \cdot 0,96}\left(0,1 + 0,025 + 0,5 + \frac{17,4}{30} + \frac{17,4}{40}\right) \approx 9.$$

Количество автобетоносмесителей, перевозящих смесь с третьего завода, равно:

$$N_3 = \frac{288}{8 \cdot 6 \cdot 1}\left(0,2 + 0,25 + 0,1 + 0,25 + \frac{40}{30} + \frac{40}{40}\right) = 18,78 \approx 19.$$

Третий завод оставшуюся продукцию в количестве 130 м^3 будет поставлять другим стройкам.

На третьем этапе необходимый темп бетонирования (P_3 = 250 м^3/смену) могут обеспечить первый и второй заводы, работая совместно, причем

$$P = P_1 + P_2,$$

где P_1 = 200 м^3/смену, а P_2 = 50 м^3/смену, или P_1 = 480 т/смену, а P_2 = 120 т/смену, причем N_1 = 5.

Количество автобетоновозов, доставляющих смесь со второго завода, равно:

$$N_2 = \frac{120}{8 \cdot 8 \cdot 0,96}\left(0,1 + 0,025 + 0,5 + \frac{17,4}{30} + \frac{17,4}{40}\right) = 1,9 \approx 2.$$

Таким образом, на первом этапе, продолжающемся один месяц, в течение каждой смены бетонная смесь поставляется

с первого завода пятью автосамосвалами. На втором этапе, продолжающемся два месяца, поставка бетона осуществляется одновременно с трех заводов. С первого завода осуществляется подача бетонной смеси 5 автосамосвалами, со второго – 9 автобетоновозами, с третьего – 19 автобетоносмесителями.

На третьем этапе, продолжающемся три месяца, поставка бетонной смеси осуществляется одновременно с 2-х заводов (с первого – 5 автосамосвалов, а со второго – 2 автобетоновоза).

3. Необходимо определить первоначальную подвижность бетонной смеси при выходе из бетономешалки с учетом ее снижения при транспортировании.

Дано: бетонная смесь, доставленная на строительный объект, должна иметь осадку конуса, равную 4–6 см. Доставка бетонной смеси осуществляется при температуре +8 °С.

Рассмотрим первоначальную ОК бетонной смеси, приготовляемой на каждом из трех заводов (см., например, рис. 11):

а) бетонная смесь, приготовленная на первом заводе, после перевозки в автосамосвалах на 5 км до объекта должна иметь подвижность $ОК_{об}$ = 4–6 см, а первоначальная подвижность должна быть равна:

$$ОК_З = \frac{ОК_{об}}{\eta \cdot \mu}.$$

Коэффициент потери подвижности η, зависящий от дальности транспортирования, будет равен 0,52, а коэффициент потери подвижности μ, зависящий от температуры окружающей среды (см. табл. 10), равен 1,25, тогда

$$ОК_З = \frac{5}{0,52 \cdot 1,25} \approx 7,7\,\text{см},$$

окончательно $ОК_З$ = 8;

б) аналогично определяем подвижность бетонной смеси, приготавливаемой на втором заводе:

$$\text{ОК}_3 = \frac{5}{0,43 \cdot 1,1} \approx 10\,\text{см};$$

в) при транспортировании сухой смеси с третьего завода в автобетоносмесителях все компоненты дозируются так, чтобы подвижность была порядка 4–6 см.

В табл. 15 наглядно представлен поэтапный график транспортирования бетонной смеси на строительный объект в три этапа с трех бетонных заводов.

Таблица 15

<table>
<tr><td rowspan="6">Номер и адрес завода-поставщика</td><td rowspan="6">Мощность завода, м^3/смену</td><td rowspan="3">Расстояние перевозок (км) по дорогам с покрытием</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3">Характеристика бетонной смеси</td><td rowspan="3"></td><td>Этапы бетонирования</td><td>I</td><td colspan="2">II</td><td colspan="2">III</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Темп бетонирования, м^3/смену</td><td rowspan="2">200</td><td colspan="2" rowspan="2">500</td><td colspan="2" rowspan="2">250</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td>твердым</td><td>мягким</td><td>всего</td><td>Прочность, кг/см^2</td><td>Подвижность, см</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Объем бетонной смеси, доставляемой в смену по месяцам</td><td>I</td><td>II</td><td>III</td><td>IV</td><td>V</td><td>VI</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Завод № 1</td><td rowspan="3">200</td><td rowspan="3">8</td><td rowspan="3">–</td><td rowspan="3">8</td><td rowspan="3">200/200</td><td rowspan="3">8/4–6</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td><td>200</td></tr>
<tr><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td></tr>
<tr><td colspan="6">Доставка самосвалом</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Завод № 2</td><td rowspan="3">180</td><td rowspan="3">10</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">12</td><td rowspan="3">200/200</td><td rowspan="3">10/4–6</td><td>–</td><td>180</td><td>180</td><td>50</td><td>50</td><td>50</td></tr>
<tr><td>–</td><td>xx</td><td>xx</td><td>xxxx</td><td>xxxx</td><td>xxxx</td></tr>
<tr><td colspan="6">Доставка бетоновозом</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Завод № 3</td><td rowspan="3">250</td><td rowspan="3">40</td><td rowspan="3">–</td><td rowspan="3">40</td><td rowspan="3">200/200</td><td rowspan="3">сухая/4–6</td><td>–</td><td>120</td><td>120</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td></tr>
<tr><td>–</td><td>xxx</td><td>xxx</td><td>–</td><td>–</td><td>–</td></tr>
<tr><td colspan="6">Доставка бетоносмесителем</td></tr>
</table>

Условные обозначения: *x* – 5 автосамосвалов; *xx* – 9 автосамосвалов; *xxx* – 19 автобетоносмесителей; *xxxx* – 2 автобетоновоза.

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАЗОГРЕВ БЕТОННОЙ СМЕСИ

3.1. Предварительный электроразогрев бетонной смеси

Предварительный электроразогрев бетонных смесей был предложен в 60-е гг. С.А. Арбеньевым. С тех пор он прочно занял свое место среди методов ускорения твердения бетона.

Область применения

Рациональной областью применения метода предварительного электроразогрева бетона является возведение массивных и средней массивности конструкций при близких к 0 °С отрицательных температурах. Предварительный электроразогрев бетона требует строгого соблюдения техники безопасности, поскольку разогрев осуществляется электрическим током напряжением 220–380 В.

Сущность метода

Этот метод по расходу электроэнергии является самым экономичным, ибо электрическая энергия превращается в тепловую непосредственно в бетоне и по всей его массе. Поскольку разогрев длится короткое время от 3 до 15 мин, то теплопотери в окружающую среду сводятся к минимуму. Разогретую смесь очень важно быстро уложить в опалубку, уплотнить и укрыть теплоизоляцией, обеспечивая твердение бетона за счет внесенного при прогреве и экзотермического тепла, выделяемого при гидратации цемента с дальнейшим выдерживанием по методу термоса. При этом теплопотери в окружающую среду должны быть значительно меньше поступающих за счет экзотермии.

Различаются следующие виды электроразогрева:

1) предварительный электроразогрев. Бетонная смесь быстро разогревается вне опалубки, быстро укладывается, уплот-

няется в горячем состоянии и укрывается. Применяется при возведении массивных монолитных бетонных и железобетонных конструкций. Для конструкций с $М_п < 6$ требуемая прочность достигается путем термосного выдерживания. Для конструкций с $М_п > 6$ необходим дополнительный прогрев или обогрев бетона. Ориентировочный расход электроэнергии на 1 $м^3$ бетона 40–80 кВт/ч;

2) форсированный электроразогрев бетона в конструкции с повторным уплотнением. Бетонная смесь в холодном состоянии укладывается и уплотняется в опалубке, а затем быстро разогревается и повторно уплотняется. Применяется при возведении монолитных бетонных и малоармированных железобетонных конструкций, дорожных покрытий.

Для конструкций с $М_п < 6$ требуемая прочность достигается путем термосного выдерживания. Для конструкций с $М_п > 6$ необходим дополнительный прогрев или обогрев бетона.

Ориентировочный расход электроэнергии на 1 $м^3$ бетона 40–60 кВт/ч.

3.1.1. Методика расчета предварительного электроразогрева бетонной смеси

Для обеспечения равномерности разогрева бетонной смеси необходимо правильно подобрать геометрические размеры оборудования, размеры нагревателей, расстояние между ними, а также параметры электроэнергии. С учетом равномерности загрузки фаз электрической сети число электродов определяется по формуле

$$n_э = 3_n + 1,$$

где n – натуральный ряд чисел, соответствующий количеству параллельно подключенных групп электродов к трехфазной электрической сети; $3_n = (n_э - 1)$ – количество отсеков.

Объем разогреваемой смеси определяется по формуле

$$V = \frac{h \cdot b \cdot l\left(n_э - 1\right)}{10^6},$$

где h – высота слоя разогреваемой бетонной смеси, см; l – расстояние между электродами, см; $n_э$ – количество электродов; $(n_э - 1)$ – количество отсеков, шт.

$$V = 3 \cdot n \cdot V^1,$$

где V^1 – объем разогреваемой бетонной смеси, заключенный между двумя соседними электродами, м^3.

Дана принципиальная схема подключения сопротивления в бункере при разогреве смеси на рис. 13. Как видно из схемы, в каждую пару проводов параллельно включено m элементов сопротивления бетонной смеси r_i, тогда сопротивление в одной из пар проводов будет равно:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \cdots \frac{1}{r_m}.$$

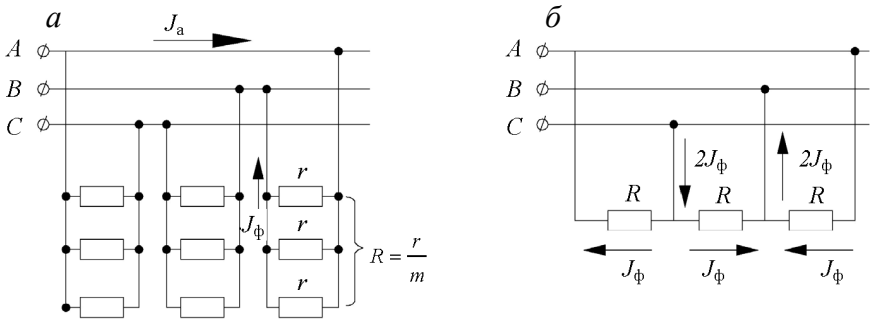


Рис. 13. Принципиальная электрическая схема подключения сопротивления (бетонных смесей) треугольником (*а*) и расчетная схема (*б*)

Учитывая, что расстояние между электродами l постоянно, имеем $r = r_2 = ... r_m$. Следовательно,

$$\frac{1}{R} = \frac{m}{r},$$

откуда

$$R = \frac{r}{m}.$$

Линейная сила тока равна:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}},$$

где

$$I_{\text{ф}} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}.$$

В нашем случае

$$I_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{\text{ф}}} = \frac{U_{\text{л}}}{\frac{r}{m}} = \frac{m \cdot U_{\text{л}}}{r},$$

или

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}} = \frac{\sqrt{3} \cdot m \cdot U_{\text{л}}}{r}.$$

Сопротивление элемента бетонной смеси (r) определяется по формуле

$$r = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление бетонной смеси, Ом·см; l – длина формы, см; S – площадь поперечного сечения бетонной смеси, проводящей электрический ток, см^2.

Удельный расход электроэнергии $W_{\text{уд}}$, кВт·ч/м^3, будет равен:

$$W_{\text{уд}} = q_0 \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}}}{864} \Delta t = q_0 \cdot C_V \cdot \Delta t,$$

где q_0 – коэффициент, учитывающий теплопотери в окружающую среду (1,2–1,4); $C_б$ – удельная теплоемкость бетонной смеси, ккал/(кг·град); $\gamma_б$ – объемная масса бетонной смеси, кг/м^3; Δt – разность температур, град; C_V – объемная теплоемкость смеси, кВт·ч/(м^3·град).

Удельная электрическая мощность $P_{уд}$ определяется по формуле

$$P_{уд} = q_0 \cdot C_V \cdot V_р,$$

где $V_р$ – скорость разогрева бетонной смеси в течение 1 ч, град,

$$V_р = \frac{t_к - t_о}{\tau_1} 60.$$

Здесь τ_1 – время разогрева бетонной смеси, мин (ориентировочно 5–15 мин).

Мощность, необходимая для разогрева бетонной смеси, определяется по следующим формулам:

– по теплотехническому расчету

$$S_т = q \cdot C_V \cdot \Delta t \frac{V}{\tau_р} = W_{уд} \cdot П;$$

– по электротехническому расчету

$$S_э = \frac{\sqrt{3} \cdot U_л \cdot I_л}{1000}.$$

Подставляя значения R, $n_э$ и $I_л$ в последнюю формулу и умножая числитель и знаменатель правой части равенства на l, получим:

$$S_э = \frac{V_л^2 \cdot V^1 (n_э - 1)}{1000 \cdot \rho_р \cdot l^2}.$$

Приравнивая значения $S_т$ и $S_э$, получим:

$$q_0 \cdot C_V \cdot \Delta t \frac{V}{\tau_р} = \frac{U_л^2 \cdot V^1 \left(n_э - 1\right)}{1000 \cdot \rho_р \cdot l^2}.$$

Подставляя в это выражение

$$q_0 \cdot C_V \cdot \Delta t \frac{V}{\tau_р} = \frac{U_л^2 \cdot V^1 \left(n_э - 1\right)}{1000 \cdot \rho_р \cdot l^2},$$

получим $$q_0 \cdot C_V \cdot \Delta t \frac{h \cdot b \cdot l \left(n_э - 1\right)}{10^6 \cdot \tau_р} = \frac{U_л^2 \cdot V^1 \left(n_э - 1\right)}{1000 \cdot \rho_р \cdot l^2},$$

откуда $$\frac{W_{уд} \cdot \Delta t}{10^6 \cdot \tau_р} = \frac{U_л^2}{1000 \cdot \rho_р \cdot l^2}.$$

Решив уравнение относительно l (расстояние между электродами), получим:

$$l = \frac{U_л}{\sqrt{\frac{60 \cdot W_{уд} \cdot \rho_р}{1000 \cdot \tau_р}}} = \frac{U_л^2}{\sqrt{\frac{P_{уд} \cdot \rho_р}{1000}}}.$$

Время разогрева бетонной смеси $\tau_р$ определяем как

$$\tau_р = \frac{V}{П},$$

где П – производительность разогреваемого устройства, м^3/ч.

Для предварительных расчетов при известном $\rho_н$ можно принять:

– для тяжелых бетонов $\rho_р = 0{,}8\rho_н$;

– для легких бетонов $\rho_р = 0{,}85\rho_н$.

Расчетная электрическая мощность $S_р$ определяется по формуле, кВт:

$$S_р = \frac{P_{max}}{K_{к.п} \cdot \eta \cos\varphi},$$

где P_{max} – максимальная электрическая мощность, кВт; η и $\cos\varphi$ – КПД и коэффициент мощности (их произведение можно принять равным 0,9); $K_{к.п}$ – коэффициент кратковременной перегрузки трансформатора (ориентировочно 1,3–1,5).

Максимальная электрическая мощность P_{max} при ρ_{min} определяется по формуле

$$P_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_л \cdot I_{max}}{10^3},$$

где I_{max} – максимальная сила тока, А.

При соединении разогревателей установки в цепь треугольником

$$I_{max} = \sqrt{3} \cdot I_ф; \;\; U_ф = U_л,$$

где фазный ток $I_ф$ будет равен:

$$I_ф = \frac{U_ф}{R_ф} = \frac{U_л}{R_ф}.$$

Здесь $R_ф$ – сопротивление бетонной смеси, находящейся между двумя соседними электродами, Ом;

$$R_ф = \rho_{min} \frac{l}{S},$$

где l – расстояние между электродами, см.

Подставляя значение I_{max}, $I_ф$, $R_ф$ в формулу значения P_{max}, получим

$$P_{\max} = \frac{U_{л}^2 \cdot V}{1000 \cdot \rho_{\min} \cdot l^2}.$$

Номинальная (установленная) мощность трансформатора принимается из условия $S_н \geq S_р$. Максимальную силу тока можно вывести из формулы по определению максимальной электрической мощности $P_{\max}$, тогда

$$I_{\max} = \frac{P_{\max} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{л}}.$$

Вся аппаратура для поста электроразогрева смеси должна быть подобрана с учетом максимальной силы тока. Производительность установок по электроразогреву смеси непрерывным способом будет равна:

$$П = 3600 \cdot F' \cdot V,$$

где F' – площадь сечения потока бетонной смеси, см^2; V – скорость движения ленты, м/мин.

3.1.2. Расчет параметров установки по электроразогреву бетонной смеси

Задача. Рассчитать параметры установки по электроразогреву бетонной смеси при следующих исходных данных: сменная производительность 80 м^3; длительность смены $Т_{см}$ – 8,0 ч; начальная температура бетонной смеси $t_н$ = +10 °С; конечная температура разогрева бетонной смеси $t_к$ = +80 °С; время разогрева бетонной смеси $\tau_р$ = 10 мин; начальное удельное электрическое сопротивление бетонной смеси $\rho_н$ = 700 Ом·см; минимальное $\rho_{\min}$ = 409 Ом·см; плотность смеси $\gamma_б$ = 2400 кг/м^3; удельная теплоемкость C = 0,25 ккал/ кг·град; напряжение в сети U = 380 В.

Решение:

1. Определим удельный расход электроэнергии с учетом теплопотерь в окружающую среду

$$W_{\text{уд}} = q_0 \frac{C \cdot \gamma_{\text{б}}}{864} \Delta t = 1,3 \frac{0,25 \cdot 2400 \cdot 70}{864} = 63 \ \ \text{кВт} \cdot \text{ч/м}^3.$$

2. Найдем расчетное значение удельного электрического сопротивления

$$\rho_{\text{р}} = \frac{\rho_{\text{н}} + \rho_{\min}}{2} = \frac{700 + 490}{2} = 595 \ \ \text{Ом} \cdot \text{см}.$$

3. Вычислим расстояние между электродами

$$l = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{\dfrac{60 \cdot W_{\text{уд}} \cdot \rho_{\text{р}}}{1000 \cdot \tau_{\text{р}}}}} = \frac{380}{\sqrt{\dfrac{60 \cdot 63 \cdot 595}{1000 \cdot 10}}} = 25 \ \ \text{см}.$$

4. Определим объем разогреваемой смеси

$$V = \Pi \cdot \tau_{\text{р}} = \frac{80 \cdot 10}{8 \cdot 60} = 1,66 \ \ \text{м}^3.$$

5. Рассчитаем максимальную электрическую мощность

$$P_{\max} = \frac{U_{\text{л}}^2 \cdot V}{1000 \cdot \rho_{\min} \cdot l^2} = \frac{380^2 \cdot 1,66 \cdot 10^6}{1000 \cdot 490 \cdot 25^2} = 782 \ \ \text{кВт}.$$

6. Определим количество электродов (δ электрода = 1 см)

$$n_{\text{э}} = 3 \cdot n + 1 = 3 \cdot 2 + 1 = 7.$$

Тогда количество отсеков установки будет:

$$3 \cdot n = n_{\text{э}} - 1 = 7 - 1 = 6.$$

7. Найдем ширину установки (бункера)

$$b = (n_э - 1)l + n_э \cdot \delta = 6 \cdot 25 + 7 \cdot 1 = 157 \text{ см.}$$

8. Определим активную поверхность электрода

$$F = \frac{V_б \cdot 10^6}{b} = \frac{1,66 \cdot 10^6}{157} 10573 \text{ см}^2.$$

9. Рассчитаем длину электрода, приняв высоту бадьи h = 80 см,

$$l = \frac{F}{h} = \frac{10573}{80} = 132 \text{ см.}$$

10. Определим максимальный линейный ток

$$I_{max} = \frac{10^3 \cdot P_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_л} = \frac{10^3 \cdot 782}{1,73 \cdot 380} = 1190 \text{ А.}$$

11. Найдем расчетную электрическую мощность

$$S_р = \frac{P_{max}}{K_{к.п}\, \eta \cos\varphi} = \frac{782}{1,5 \cdot 0,9} = 580 \text{ кВт.}$$

3.1.3. Пример расчета предварительного электроразогрева бетонной смеси

Исходные данные:

Конструкция плита	6×6×0,5 (h), м
Город	г. Барнаул
Месяц	ноябрь
Температура предварительного разогрева бетонной смеси	$t_{раз}$ = +75 °С
Время перевозки	$\tau_{пер}$ = 8 мин
Высота подъема краном	$H_{под}$ = 12 м
Марка автомобиля	ГАЗ-93
Время укладки	$\tau_{укл}$ = 10 мин

Тип опалубки	V
Класс бетона	В15
Расход цемента	Ц = 350 кг/м^3
Марка цемента	М400
Расход арматуры	$Р_а$ = 70 кг/м^3
Температура бетона конечная	$t_{б.к}$ = +5 °С
Температура бетона начальная до разогрева	$t_{б.н}$ = +5 °С

Решение:

1. Определим объем бетона конструкции:

$$V_б = 6 \cdot 6 \cdot 0{,}5 = 18 \text{ м}^3.$$

2. Рассчитываем поверхность охлаждения конструкции:

$$F_{охл} = 4 \cdot 6 \cdot 0{,}5 + (6 \cdot 6)2 = 84 \text{ м}^2.$$

3. Определим модуль поверхности конструкции:

$$М_п = \frac{F_{охл}}{V_б} = \frac{48}{18} = 2{,}67 \text{ м}^{-1}.$$

4. Определим суммарное относительное снижение температуры бетонной смеси при всех операциях: при транспортировании, перегрузке, укладке и уплотнении.

4.1. При транспортировании:

$$\Delta t_{тр} = \Delta t'_{тр} \cdot \tau_{тр} = 0{,}0037 \cdot 8 = 0{,}0296 \text{ °С/°С},$$

где $\Delta t'_{тр}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при транспортировке (табл. П.4.1).

4.2. При перемещении краном:

$$\Delta t_{пер} = 0{,}0022 \cdot H_{под} = 0{,}0022 \cdot 12 = 0{,}0264 \text{ °С/°С}.$$

4.3. При перегрузке и погрузке: $\Delta t_п = 0{,}032$ °С/°С.

4.4. При укладке и уплотнении

$$\Delta t_{\text{упл}} = \Delta t'_{\text{у}} \cdot \tau_{\text{упл}} = 0,004 \cdot 10 = 0,04 \ ^\circ\text{C}/^\circ\text{C},$$

где $\Delta t'_{\text{у}}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при уплотнении и укладке (табл. П.4.2).

4.5. Определим суммарное относительное снижение температуры:

$$\sum \Delta t_{\text{тр}} = \Delta t_{\text{тр}} + \Delta t_{\text{пер}} + \Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{упл}} =$$
$$= 0,0296 + 0,0264 + 0,032 + 0,04 = 0,128 \ ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}.$$

5. Определим начальную среднюю температуру бетонной смеси после укладки в опалубку, уплотнения и укрытия:

$$t_{\text{раз}} = \frac{t_{\text{б.н}} - t_{\text{н.в}} \sum \Delta t_{\text{тр}}}{1 - \sum \Delta t_{\text{тр}}},$$

где $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона начальная, °С; $t_{\text{см}}$ – температура бетонной смеси при выходе из транспортного средства, °С; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С (табл. П.4.3).

$$t_{\text{б.н}} = 75\left(1 - 0,128\right) + (-7,9)0,128 = 64,39 \approx 64,4 \ ^\circ\text{C}.$$

6. Определим температуру бетона с учетом нагрева арматуры:

$$t'_{\text{б.н}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot t_{\text{б.н}} + C_{\text{а}} \cdot P_{\text{а}} \cdot t_{\text{н.в}}}{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} + C_{\text{а}} \cdot P_{\text{а}}},$$

где $C_{\text{а}}$ – удельная теплоемкость арматуры, кДж/(кг·°С); $C_{\text{а}}$ = 0,48 кДж/(кг·°С); $C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость бетона, кДж/(кг·°С); $C_{\text{б}}$ = 1,05 кДж/(кг·°С); $\gamma_{\text{б}}$ – объемная масса бетона, кг/м^3; $\gamma_{\text{б}}$ = 2400 кг/м^3; $P_{\text{а}}$ – расход арматуры, кг/м^3; $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона начальная, °С; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С (табл. П.4.3).

$$t'_{\text{б.н}} = \frac{1,05 \cdot 2400 \cdot 64,4 + 0,48 \cdot 70(-7,9)}{1,05 \cdot 2400 + 0,48 \cdot 70} = 63,4 \ ^\circ\text{C}.$$

7. Определим среднюю температуру остывания бетона:

$$t_{\text{б.ср}} = t_{\text{б.к}} + \frac{t'_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}}}{1,03 + 0,181 \cdot \text{М}_{\text{п}} + 0,006\left(t'_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}}\right)};$$

$$t_{\text{б.ср}} = 5 + \frac{63,4 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 4,67 + 0,006\left(63,4 - 5\right)} = 31,2 \ ^\circ\text{C}.$$

8. Пренебрегая тепловыделением цемента (экзотермия), определим время остывания бетона по формуле Б.Г. Скрамтаева:

$$\tau_{\text{о}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} (t'_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}})}{3,6 \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}} (t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}})},$$

где $K_{\text{оп}}$ – коэффициент теплопередачи опалубки, зависит от конструкции опалубки и скорости ветра (табл. П.4.4).

$$\tau_{\text{о}} = \frac{1,05 \cdot 2400(63,4 - 5)}{3,6 \cdot 1,07 \cdot 4,67(31,2 - (-7,9))} = 209,2,$$

где $\tau_{\text{о}} = 8,7$ сут.

9. Определим прочность, которую наберет бетон за время остывания $\tau_{\text{ост}} = 209,2$ ч, и среднюю температуру остывания бетона $t_{\text{б.ср}} = 31,2$ °С. По номограмме, для бетона марки М200 (В15) на портландцементе М400 бетон набирает 100 % от R_{28} (рис. П.4.1) .

10. Определим необходимую электрическую мощность для разогрева бетонной смеси:

$$P = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} (t_{\text{раз}} - t_{\text{б.н}}) 1,16 \cdot K \cdot 60 \cdot V_{\text{б}}}{1000 \cdot 4,18 \cdot K_{\text{эр}} \cdot T_{\text{р}}},$$

где K – коэффициент, учитывающий потери тепла в процессе разогрева, $K = 1{,}1$; $V_б$ – объем одновременно разогреваемой порции бетонной смеси (табл. П.4.1); $K_{эр}$ – коэффициент использования электроэнергии; $K_{эр} = 0{,}95$; $T_р$ – время разогрева бетонной смеси; $T_р = 13$ мин.

$$P = \frac{1{,}05 \cdot 2400(75-5)1{,}16 \cdot 1{,}1 \cdot 60 \cdot 1{,}4}{1000 \cdot 4{,}18 \cdot 0{,}95 \cdot 13} = 366{,}3.$$

11. Принимаем силовой трансформатор мощностью 400 кВт типа ТМ 400/10 (табл. П.4.5).

12. Расход электрической энергии на разогрев 1 м^3 бетонной смеси:

$$W = \frac{P_{ном} \cdot T_р}{60 \cdot V_б},$$

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

$$W = \frac{400 \cdot 13}{60 \cdot 1{,}4} = 61{,}9 \text{ кВт·ч/м}^3.$$

3.2. Предварительный разогрев бетонной смеси паром в миксере автобетоносмесителя

Термообработка бетона предусматривает паропрогрев миксера в автобетоносмесителе, типа СБ-92, непосредственно на строительной площадке (10–15 мин) и укладку в утепленную опалубку с последующим остыванием бетона. Необходимость утепления диктуется требованием такого режима энергообмена бетона в опалубке с окружающей средой, чтобы произошло постепенное (не более 5 °С) остывание конструкции, что гарантирует ее трещиностойкость.

Характерной особенностью данной технологии является непременное вращение барабана с бетонной смесью в автобетоносмесителе, что позволяет, во-первых, удалить с компонентов смеси загрязненные частицы, во-вторых, увеличить площадь контактов цементных зерен, и, в-третьих, отодвигать время начала схватывания бетона, т. е. внесение максимального количества энергии происходит в момент максимальной концентрации реагирующих веществ.

Паропрогрев бетонной смеси осуществляется на объекте на тепловом узле, представляющем комплект оборудования, включающего:

– парогенератор типа МН-700, с техническими параметрами:

– производительность – 400 кг/ч;

– температура – 110–120 °С;

– давление пара – 1,4–1,5 МПа;

– систему трубопровода с гибким шлангом длиной, достаточной для непосредственной подачи внутрь барабана пара с параметрами t = 110–120 °С;

– эстакады для размещения автобетоносмесителя при «перегрузке» смеси в поворотные и неповоротные бадьи и последующей ее подаче в опалубку с помощью монтажного крана;

– бетононасос, сблокированный с работой автобетоносмесителя по схеме, исключающей сложный маневр последнего при установке его под «прогрев».

Паропрогрев смеси в автобетоносмесителе осуществляется с непрерывным вращением барабана в течение 10–15 мин с подачей пара от парогенератора и с контролем температуры смеси по термодатчику, установленному в корпусе барабана.

Учитывая, что параметры бетонной смеси на всех этапах ее довольно жесткой термообработки существенно меняются, необходима методика расчета основных технологических параметров бетонной смеси при бетонировании данным методом.

3.2.1. Методика расчета паропрогрева бетонной смеси

Расчет паропрогрева в автобетоносмесителе требуемого объема бетонной смеси при заданной геометрии барабана, скорости подъема, температуре и параметрах пара (давление и температура) сводится к определению площадей пароконденсатных поверхностей, возможности прихода пароконденсата за 1 мин, часовой производительности источника пара и наименьшей частоты вращения барабана смесителя, при котором происходит конденсация требуемого количества пара.

Конденсатообразующими поверхностями барабана смесителя являются:

– внутренние поверхности барабана;

– вертикальные поверхности лопастей;

– горизонтальная и наклонная поверхности бетонной смеси.

Конденсатообразующие поверхности F', отнесенные к 1 м длины барабана смесителя, определяются следующим образом:

– свободная поверхность бетонной смеси, м^2,

$$F'_{\text{бет}} = 2R' \cdot \sin\frac{\varphi}{2};$$

– вертикальная поверхность барабана над бетоном $F'_{\text{брб}}$, м^2,

$$F'_{\text{брб}} = \pi \cdot R'\left(2 - \frac{\varphi}{180}\right);$$

– вертикальная поверхность лопостей, м^2, при их высоте $h_{\text{лоп}} = 0{,}5R'$

$$F'_{\text{лоп}} = 1{,}5 \cdot \pi \cdot n'(1 - K_{\text{з}})(R')^2,$$

где $K_{\text{з}}$ – объемный коэффициент заполнения барабана; $K_{\text{з}} = \frac{V_{\text{бет}}}{V_{\text{брб}}}$; $h_{\text{лоп}} = 0{,}5R'$; $V_{\text{бет}}$ – объем бетонной смеси, м^3; $V_{\text{брб}}$ – геометрический объем смесителя, м^3; $R' = \sqrt{\frac{V_{\text{брб}}}{\pi \cdot l_{\text{брб}}}}$ – приведенный радиус

смесителя; $l_{брб}$ – длина смесителя, м; n' – количество лопастей на 1 п. м длины барабана; φ – центральный угол, определяемый из выражения

$$K_з = \frac{\varphi}{360} - \frac{\sin\varphi}{2 \cdot \pi}.$$

Полная активная конденсатообразующая поверхность, м^2/мин, при частоте вращения барабана n в минуту определяется:

$$F_{бет} = F'_{бет} \cdot l_{брб} \left(\frac{2 \cdot \pi}{\frac{\pi \cdot \varphi}{180} + 2\sin\frac{\varphi}{2}} \right);$$

$$F_{брб} = F'_{брб} \cdot l_{брб} \cdot n;$$

$$F_{лоп} = F'_{лоп} \cdot l_{брб} \cdot n.$$

Коэффициент конденсатообразующей пленки на свободной поверхности бетонной смеси $\alpha_{бет}$, Вт/(м^2·°С), с учетом ее наклона в процессе перемешивания, определяется:

$$\alpha_{бет} = K_\beta \cdot \lambda \cdot 14,3 \cdot \mathrm{Re}^{0,4} \left(\frac{t_м}{t_с} \right)^{3,8} \left(\frac{r}{C \cdot \Delta t} \right)^{0,36},$$

где K_β – коэффициент, зависящий от наклона поверхности бетонной смеси при вращении барабана (K_β = 1,05–1,1); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); Re – критерий Рейнольдса, равный

$$\mathrm{Re} = \frac{U_{брб}\sqrt{F}}{\nu},$$

где $U_{брб}$ – окружная скорость поверхности барабана, м/с; F – поверхность теплообмена (при расчете за единицу поверхности: F = = 1 м^2), м^2; ν – кинематическая вязкость теплоносителя; $\frac{t_м}{t_с}$ – па-

раметрический критерий; $t_м$ и $t_с$ – температура мокрого и сухого термометров, соответственно, °С; K – критерий Кутателадзе;

$$K = \frac{r}{C \cdot \Delta t},$$

где r – теплота парообразования, кДж/кг; C – теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°С); Δt – разность температуры пара и средней температуры конденсатообразующей поверхности, °С.

Коэффициент теплопередачи поверхности лопастями барабана $\alpha_{брб}$, Вт/(м^2·°С), рассчитывается по формуле

$$\alpha_{брб} = 1{,}33 \cdot \lambda \left(\frac{1}{4} \frac{\nu}{a} \frac{K_g \cdot l^3}{\nu^2} \frac{r}{C \cdot \Delta t} \right)^{0{,}25},$$

где $K_g = \left(g - \frac{U_{брб}^2}{R'} \right)$ – параметр, учитывающий затруднительное скольжение конденсатной пленки вследствие центробежных сил; l – характерный размер, м; $\frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля, Pr; $\frac{q \cdot l^3}{\nu^2}$ – критерий Галилея, Ga.

Коэффициент теплопередачи пленки, конденсирующейся на нижней внутренней поверхности барабана $\alpha_{брб}$, Вт/(м^2·°С), с учетом центробежной силы, определяется по формуле

$$\alpha_{брб} = 0{,}149 \left(\frac{\lambda_ж \rho \cdot r \cdot K_g}{\nu \cdot \Delta t \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}} \right)^{0{,}25},$$

где ρ – плотность, кг/м^3; σ – коэффициент поверхностного натяжения, кг/м.

Весовой приход конденсата за 1 мин, кг/мин, составляет

$$Q' = \frac{n\Delta t}{r}\sum F''\alpha'\left(1-\frac{\varphi}{360}\right) =$$

$$= \frac{n\Delta t}{60r}\left(F''_{\text{бет}}\alpha_{\text{бет}} + F''_{\text{брб}}\alpha_{\text{брб}} + F''\alpha_{\text{лоп}}\right)\left(1-\frac{\varphi}{360}\right),$$

где $F'' = \frac{F}{n}$; $\alpha' = \frac{\alpha}{60}$ – удельная величина теплопередачи за 1 мин.

Наименьшая скорость вращения барабана смесителя, для обеспечения требуемой конденсации пара за время τ, составляет:

$$n_{\min} = \frac{60Q''r}{\tau\cdot\Delta t}\left(F''_{\text{бет}}\cdot\alpha_{\text{бет}} + F''_{\text{брб}}\cdot\alpha_{\text{брб}} + F''_{\text{лоп}}\cdot\alpha_{\text{лоп}}\right)\left(1-\frac{\varphi}{360}\right),$$

откуда часовая производительность парогенератора, кг/ч,

$$Q = \frac{60\cdot Q''}{\tau} = 60Q',$$

где Q'' – количество пара, необходимое для прогрева заданного объема бетонной смеси, ориентировочно можно принять из условия, что для 1 м^3 смеси при изменении температуры на 1 °С расходуется 1 кг. Объемная теплоемкость бетонной смеси 2520 кДж/(м^3·°С), теплота фазового перехода пара – 2250 кДж/кг.

Паропрогрев может осуществляться по следующим технологическим схемам:

– прогрев заготовленной бетонной смеси на пункте паропрогрева завода товарного бетона (при времени доставки горячей смеси в утепленном миксере не более 15 мин);

– прогрев смеси до температуры 70–80 °С на стройплощадке от парогенератора (стационарного или передвижного) на специально оборудованном тепловом пункте (при времени доставки смеси на объект от 15 до 30 мин);

– прогрев бетонной смеси в два цикла: 1) на тепловом пункте завода товарного бетона до температуры 30–35 °С; 2) на пункте паропрогрева стройплощадки до температуры 70–80 °С.

При этом время доставки смеси может быть продолжительностью до 40 мин. Очевидно, что выбор той или иной схемы обусловлен конкретными условиями строительства и возможной (допустимой) продолжительностью транспортного цикла.

Преимуществом последней схемы термообработки бетона является меньший по времени цикл прогрева смеси и, как следствие, меньшее количество конденсата, выделяемого в бетон в процессе прогрева. Это весьма существенно, так как «избыточная влага» в смеси изменяет водоцементное соотношение бетона, что негативно отражается на качестве бетонируемой конструкции. Поэтому проектное водоцементное соотношение $\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)$ бетонной смеси корректируется следующим образом.

Определяется количество воды от конденсации пара за весь цикл прогрева, кг, по формуле

$$q_{\text{вк}} = \frac{q_{\text{тр}}^{\text{б}}}{\gamma_{\text{уд}}}\left(t_{\text{к}}^{\text{р}} - t_{\text{н}}^{\text{р}}\right),$$

где $q_{\text{вк}}$ – количество воды, конденсируемой в пар, за весь цикл паропрогрева, кг; $q_{\text{тр}}^{\text{б}}$ – объем бетонной смеси в барабане смесителя, м^3; $\gamma_{\text{уд}}$ – объем 1 м^3 бетона; $t_{\text{к}}^{\text{р}}$; $t_{\text{н}}^{\text{р}}$ – температура конечная и начальная прогрева смеси в барабане смесителя, соответственно, °С.

Рассчитывается водоцементное соотношение в конце паропрогрева по формуле

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)' = \frac{\text{В}}{\text{Ц}} + q_{\text{вк}},$$

где $\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)'$ – фактическое соотношение $\frac{\text{В}}{\text{Ц}}$ в конце паропрогрева.

При этом возможны следующие варианты:

– рассчитывается $\Delta\frac{\text{В}}{\text{Ц}}$ по формуле

$$\Delta\frac{\text{В}}{\text{Ц}}=\left(\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\right)'-\frac{\text{В}}{\text{Ц}},$$

где $\Delta\frac{\text{В}}{\text{Ц}}$ – превышение проектного водоцементного соотношения.

Если $\Delta\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\le 5\ \%,$ то никакие технологические мероприятия не предусматриваются, так как смесь приобретает большую подвижность, что благоприятно сказывается на технологии бетонирования конструкции.

Если $\Delta\frac{\text{В}}{\text{Ц}}\le 5\text{–}20\ \%,$ то необходимо предусмотреть следующую технологию приготовления смеси:

– уменьшение $\frac{\text{В}}{\text{Ц}}$ при затворении смеси до $\frac{1}{3}:\frac{1}{2}$ проектного значения;

– введение в воду затворения химической добавки «Феламикс» – 0,6 % от массы цемента;

– осуществить подогрев заполнителей паром, что позволит поступление части конденсата в объем воды затворения и, как следствие, требуемую подвижность смеси в период ее транспортировки до объекта;

– оставшийся дефицит $\frac{\text{В}}{\text{Ц}}$ компенсируется на стройплощадке за счет конденсата при паропрогреве смеси до температуры ее укладки в опалубку.

3.2.2. Расчет предварительного разогрева бетонной смеси паром в миксере автобетоносмесителя

Условие задачи

Необходимо:

а) рассчитать теплотехнические параметры паропрогрева бетонной смеси в автобетоносмесителе СБ-92 (геометрический объем 6 м^3, объем бетона 3,5 м^3, длина барабана 3,25 м);

б) поднять температуру бетонной смеси от 20 до 80 °С за 20 мин.

Параметры пара:

– давление 1 МПа;

– температура 100 °С;

– барабан утеплен.

Потерями тепла с его поверхности в ходе прогрева пренебрегаем.

Расчет паропрогрева:

1. Определим объемный коэффициент заполнения барабана смесью

$$K_з = \frac{3,5}{6,0} = 0,58.$$

2. Приведенный радиус барабана смесителя

$$R' = \sqrt{\frac{6,0}{3,14 \cdot 3,25}} = 0,77 \text{ м}.$$

3. Определим центральный угол φ:

$$0,58 = \frac{\varphi}{360} - \frac{\sin\varphi}{2\pi}; \quad \varphi = 196°.$$

4. Расчитаем свободную поверхность бетонной смеси, отнесенную к 1 п. м длины барабана:

$$F'_{бет} = 2 \cdot 0,77 \cdot \sin\frac{196}{2} = 1,53 \text{ м}^2.$$

5. Внутренняя поверхность барабана над бетоном в миксере, отнесенная к 1 п. м длины барабана, составит:

$$F'_{\text{брб}} = 3,14 \cdot 0,77\left(2 - \frac{146}{180}\right) = 2,2 \text{ м}^2.$$

6. Вертикальную поверхность лопастей смесителя при их высоте 0,50 R', отнесенную к 1 п. м длины барабана, рассчитаем по формуле

$$F'_{\text{лоп}} = 1,5 \cdot 3,14 \frac{7}{3,25}(1 - 0,58)0,77^2 = 2,53 \text{ м}^2.$$

7. Определим активную конденсатообразующую поверхность, м^2/мин, при частоте вращения барабана n:

$$F_{\text{бет}} = 1,53 \cdot 3,25 \cdot n\left(\frac{2 \cdot 3,14}{\frac{3,14 \cdot 196}{180} + 2\sin\frac{196}{2}}\right) = 5,76n;$$

$$F_{\text{брб}} = 2,2 \cdot 3,25n = 7,15n;$$

$$F_{\text{лоп}} = 2,53 \cdot 3,25n = 8,22n.$$

8. Коэффициент теплопередачи $\alpha_{\text{бет}}$ пленки, конденсирующейся на свободной поверхности бетонной смеси, определим так:

$$\alpha_{\text{бет}} = 1,1 \cdot 0,681 \cdot 14,3\left(\frac{0,4 \cdot 1}{23,7 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,4}\left(\frac{70}{100}\right)^{3,8} \times$$

$$\times\left(\frac{2257}{4,2 \cdot 50}\right)^{0,36} = 318 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

где 0,681 – коэффициент теплопроводности воды при 100 °С; 0,4 – число, рассчитанное из условия частоты вращения бараба-

на 5 об/мин; 23,7 – кинематическая вязкость; 70, 100 – температура мокрого, и сухого пара, соответственно; 2257 – теплота парообразования; 4,2 – теплоемкость теплоносителя; 50 – разность температур пара и бетонной смеси.

9. Удельный приход пара на единицу поверхности бетона $q_{бет}$ составит:

$$q_{бет} = 318 \cdot 50 = 10\,900 \text{ Вт/м}^2 = 25{,}3 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{ч)}.$$

10. Коэффициент теплопередачи пленки, конденсирующейся на вертикальных лопастях смесителя, определим следующим образом:

$$\alpha_{лоп} = 1{,}33 \cdot 0{,}681 \times$$

$$\times \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{23{,}7 \cdot 10^{-6}}{0{,}12 \cdot 10^{-4}} \frac{\left(9{,}8 - \frac{0{,}42}{0{,}77}\right)^2 l^3}{(23{,}7 \cdot 10^{-6})^2} \frac{2257}{4{,}2 \cdot 50} \right)^{0{,}25} = 488 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

где $0{,}12 \cdot 10^{-4}$ – температуропроводимость влажного воздуха при 100 °С, м^2/ч; 0,6 – коэффициент шероховатости поверхности лопастей.

11. Удельный приход пара на единицу поверхности вертикальных лопастей $q_{лоп}$ составит:

$$q_{лоп} = 488 \cdot 50 \cdot 0{,}6 = 8784 \text{ Вт/м}^2 = 23{,}3 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{ч)}.$$

12. Коэффициент теплопередачи пленки, конденсирующейся на внутренней поверхности барабана $\alpha_{брб}$, находим по формуле:

$$\alpha_{брб} = 0{,}149 \left(\frac{0{,}681^3 960 \left(9{,}8 - \frac{0{,}42}{0{,}77}\right) 2257}{23{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \sqrt{\frac{72 \cdot 10^{-4}}{960}}} \right)^{0{,}25} = 178 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)},$$

где p – плотность воды при 100 °С; p = 960; σ – коэффициент поверхностного натяжения пленки конденсата $\sigma = 72 \cdot 10^{-4}$.

13. Удельный приход пара на единицу внутренней поверхности барабана $q_{\text{брб}}$ составит:

$$q_{\text{брб}} = 178 \cdot 50 \cdot 0{,}6 = 5340 \text{ Вт/м}^2 = 8{,}5 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}.$$

14. Весовой объем конденсата ко всем конденсатообразующим поверхностям за 1 мин, кг/мин, составит:

$$Q = \frac{n}{60}\left(5{,}76 \cdot 25{,}3 + 7{,}15 \cdot 8{,}5 + 8{,}22 \cdot 23{,}3\right)\left(1 - \frac{196}{360}\right) = 3{,}01n.$$

15. Нагрев бетона объемом 3,5 м^3 на 60 °С в течение 20 мин, с учетом теплопотерь в барабане миксера, потребует: Q = (1,6 · 3,5)1,2 = 250 кг пара. Тогда производительность генератора должна быть не менее

$$Q' = \frac{60 \cdot 250}{20} = 750 \text{ кг/ч}.$$

16. Поступление пара в течение 1 мин рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{мин}} = \frac{250}{20} = 12{,}5 \text{ кг/мин}.$$

17. Такое поступление пара обеспечивает требуемый прогрев бетонной смеси. Если по условиям производства работ необходимо сократить цикл паропрогрева до 10 мин, то потребуется увеличить частоту вращения барабана смесителя до следующих значений $\Pi_{\min}^{\text{кор}}$:

$$\Pi_{\min}^{\text{кор}} = \frac{250 \cdot 60}{10 \cdot 3.01} = 8 \text{ об/мин},$$

где $\Pi_{\min}^{\text{кор}}$ – откорректированная скорость вращения барабана смесителя.

4. ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕЗПРОГРЕВНЫХ МЕТОДОВ ВЫДЕРЖИВАНИЯ БЕТОНА

4.1. Метод термоса

Область применения

Метод термоса целесообразно применять для следующих монолитных конструкций: массивных фундаментов, блоков, плит, стен, колонн, рамных конструкций с разными значениями модуля поверхности ($М_п$), а также температурных режимов подогрева и выдерживания бетонной смеси.

Сущность метода

Сущность способа заключается в использовании тепла бетона за счет подогрева заполнителей и воды или бетонной смеси до укладки ее в опалубку, а также в использовании экзотермического тепла, выделяющегося при твердении цемента, для приобретения бетоном заданной прочности в процессе его медленного остывания в утепленной опалубке до 0 °С.

4.1.1. Методика расчета методом термоса

Расчет основных параметров бетонирования в зимних условиях с выдерживанием бетона способом термоса.

Приняты следующие основные параметры бетонирования в зимних условиях:

– $t_{б.н}$ – начальная температура бетона после укладки и уплотнения, обычно задается и равна 25–30 °С;

– $t_{см}$ – температура изготовления бетонной смеси, измеряемая сразу после выпуска с завода, обычно задается и равна 35–40 °С;

– $\Delta t_{тр}$ – потери температуры бетонной смеси при транспортировании, °С, определяются по табл. 16;

Таблица 16

Ориентировочные потери температуры, °С, при перевозке в автомашинах с укрытием брезентом ($\Delta t_{тр}$)

Емкость кузовов, м^3	Температура бетонной смеси, отпускаемой с завода	Температура наружного воздуха, °С																							
		0						–10						–20						–30					
		Время транспортирования, мин																							
		10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
1–1,4	35	1,5	2,8	4	5	6,5	7,5	2	3,5	5	6,5	8,5	9,5	2,5	4	6	8	10	12	3	5	7	10	12	14
2	35	1	2	3	4	5	6	1,5	3	4	5	6,5	8	2	3	5	7	9	10	2,5	4	6	8	10	12

– $\Delta t_{\text{у}}$ – потери температуры за время укладки и уплотнения бетона, при перепаде температур в 1 °С, определяются по табл. 17;

Таблица 17

Потери температуры бетона за время укладки и уплотнения (при перепаде температур 1 °С) ($\Delta t_{\text{у}}$)

Наименование и размеры конструкции, см	Снижение температуры бетона, в долях °С, при длительности укладки и уплотнения, мин			
	1	5	10	15
Плиты и стены толщиной:				
6	0,003	0,15	0,3	0,45
8	0,0022	0,11	0,22	0,33
10	0,0018	0,09	0,18	0,27
12	0,0015	0,075	0,15	0,23
15	0,0012	0,06	0,12	0,18
20	0,009	0,045	0,09	0,14
25	0,008	0,04	0,08	0,12
30	0,007	0,035	0,07	0,11
40	0,005	0,025	0,05	0,08
50	0,004	0,02	0,04	0,06
Балки высотой:				
25	0,006	0,04	0,08	0,12
30	0,007	0,035	0,07	0,11
40	0,005	0,025	0,05	0,08
50	0,003	0,015	0,03	0,04
60	0,003	0,015	0,03	0,05
70	0,003	0,015	0,03	0,05

– $\Delta t_{\text{оп}}$ – потери температуры на нагрев опалубки и арматуры, °С, определяется по табл. 18;

Таблица 18

Потери температуры бетона на нагрев арматуры и опалубки, °С (при перепаде температур 1 °С)

№ теплоограждения	Расход арматуры бетона, кг/м^3	Модуль поверхности, м$^{-1}$					
		2	4	6	8	10	12
1	50	0,023	0,037	0,051	0,073	0,078	0,092
	150	0,042	0,055	0,069	0,083	0,097	0,11
	300	0,068	0,082	0,096	0,109	0,123	0,137
2	50	0,032	0,053	0,075	0,098	0,119	0,142
	150	0,05	0,072	0,093	0,116	0,138	0,16
	300	0,076	0,098	0,122	0,143	0,164	0,186
3	50	0,012	0,014	0,017	0,019	0,022	0,024
	150	0,03	0,033	0,035	0,038	0,04	0,043
	300	0,057	0,059	0,062	0,064	0,067	0,068
4	50	0,019	0,028	0,038	0,047	0,056	0,065
	150	0,038	0,047	0,056	0,065	0,074	0,083
	300	0,63	0,073	0,083	0,092	0,101	0,11

– $\tau_{тр}$ – время транспортирования бетонной смеси, мин, определяется по табл. 16;

– $\tau_у$ – время укладки и уплотнения, мин;

– $\tau_о$ – время остывания, ч;

– R % от R_{28} – требуемая прочность к моменту замораживания бетона, задается или берется по СНиП. Расчет сводится к определению либо $\tau_{тр}$ по заданной величине $t_{б.н}$, либо $t_{б.н}$ – по заданной величине $\tau_{тр}$ и определению $\tau_о$;

$\tau_у$ – определяется опытным путем. По найденному $\tau_у$ в табл. 17 определяется $\Delta t_у$.

Потери температуры за время укладки и уплотнения бетона при разности температур бетона и наружного воздуха равны:

$$\Delta t_{\text{у}} = (t_{\text{б.н}} - t_{\text{н.в}}).$$

При заданной величине $t_{\text{б.н}}$

$$\Delta t_{\text{тр}} = t_{\text{см}} - t_{\text{б.н}} - t_{\text{б.оп}} - \Delta t_{\text{у}}(t_{\text{б.н}} - t_{\text{н.в}}).$$

По $\Delta t_{\text{тр}}$, найденному по табл. 16, определяется $\tau_{\text{тр}}$.

При заданной величине $\tau_{\text{тр}}$ по табл. 16 определяется $\Delta t_{\text{тр}}$.

$$t_{\text{бн}} = \frac{t_{\text{см}} - t_{\text{б.оп}} - t_{\text{тр}} + \Delta t_{\text{у}} \cdot t_{\text{н.в}}}{1 + \Delta t_{\text{у}}},$$

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

Продолжительность остывания бетона рассчитывается по формуле Б.Г. Скрамтаева:

$$\tau_{\text{о}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} (t_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}}) + \text{Э} \cdot \text{Ц}}{3{,}6 \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{M}_{\text{п}} (t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}})},$$

где $C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость бетона, кДж/кг·°С; $\gamma_{\text{б}}$ – объемная масса бетона, кг/м^3; $t_{\text{б.к}}$ – конечная температура бетона, до которой проводится расчет продолжительности остывания, °С; Э – тепловыделение 1 кг цемента за время остывания бетона; Ц – расход цемента в бетоне, кг/м^3; $K_{\text{т}}$ – коэффициент теплопередачи опалубки, Вт/(м^2·°С), табл. П.4.4; $\text{M}_{\text{п}}$ – модуль поверхности, равный м$^{-1}$; $t_{\text{б.ср}}$ – среднее значение температуры за время остывания, °С; $t_{\text{б.ср}} = (t_{\text{б.н}} + 3{,}6 \cdot 2\text{M}_{\text{п}})0{,}5$, °С; $\text{M}_{\text{п}}$ – подставляется без размерности.

Тепловыделение цемента различных видов и марок в зависимости от температуры твердения и времени твердения определяется по табл. 19.

При нескольких различных теплоограждениях одной конструкции с K_1, K_2, K_n и соответствующих площадях F_1, F_2, F_n:

$$K_{\text{т}} = \frac{F_1 \cdot K_1 + F_2 \cdot K_2 + \ldots + F_n \cdot K_n}{F_1 + F_2 + \ldots + F_n}.$$

Таблица 19

Тепловыделение цемента различных видов и марок в зависимости от температуры твердения и времени твердения

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение, Дж/кг							
		Время твердения, сут							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портланд-цемент М300	10	8,4	25,9	41,9	83,9	125,7	188,6	230,6	272,4
	20	25,2	41,9	75,4	125,7	167,6	230,5	251,4	283,3
	40	50,3	83,8	146,7	188,6	230,5	251,4	293,3	–
	60	83,8	146,7	188,6	230,5	272,4	298,3	–	–
Портланд-цемент М400	5	–	–	29,3	62,9	108,9	188,4	209,5	251,4
	10	12,6	25,2	50,3	104,8	146,7	209,5	251,4	293,3
	20	41,9	66,9	104,8	167,6	209,5	272,4	314,3	335,2
	40	83,7	133,9	188,6	230,5	272,4	314,3	335,2	–
	60	129,8	188,4	230,5	272,4	314,3	335,2	–	–
Портланд-цемент М500	5	12,6	25,2	41,9	88,8	125,7	188,6	230,5	272,4
	10	25,2	41,9	62,9	104,8	167,6	251,4	393,3	314,3
	20	41,9	83,8	125,7	188,6	251,4	293,3	335,2	377,1
	40	104,8	167,6	209,5	272,4	293,3	356,2	377,1	–
	60	188,6	230,5	272,4	314,3	356,2	377	–	–
БТЦ М600	10	33,5	50,3	75,4	125,7	167,6	372,4	335,2	377,1
	20	62,9	104,8	146,7	209,5	293,3	335,2	377,1	419
	40	117,3	188,6	230,5	293,3	335,2	377,1	419	–
	60	209,5	251,4	293,3	335,2	377,1	419	–	–
ШПЦ М300	10	–	25,2	33,5	62,9	104,8	167,6	209,5	230,5
	20	–	33,5	62,9	125,7	146,7	209,5	251,4	272,4
	40	41,9	75,4	117,3	167,6	209,5	251,4	272,4	–
	60	62,9	104,8	146,7	209,5	230,5	272,4	–	–

Порядок расчета продолжительности остывания следующий:

– по формуле Б.Г. Скрамтаева определяется продолжительность остывания без учета тепловыделения бетона ($Q = 0$);

– по найденному τ_o, пользуясь табл. 19, определяется Q;

– подставляя Q в формулу Б.Г. Скрамтаева, снова определяется τ_o, которое будет больше предыдущего;

– далее по табл. 19 уточняется Q и снова подставляется в формулу;

– так повторяется до тех пор, пока последнее τ_o не будет отличаться от предыдущего на величину 5 %; R – определяется по рис. 14 в зависимости от τ_o и $t_{б.ср}$.

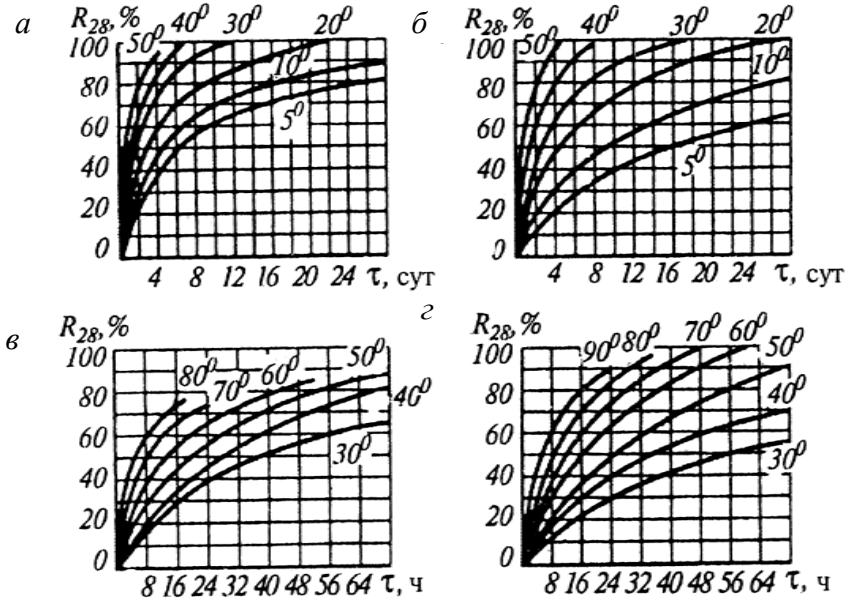
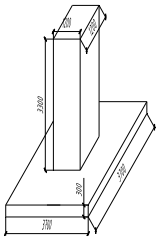


Рис. 14. Кривые набора прочности бетона классов В15–В22,5:
а – при температуре твердения до 50 °С на портландцементе М400–500; *б* – то же, при температуре твердения до 80 °С; *в* – при температуре твердения до 50 °С на шлакопортландцементе М400–500; *г* – то же, при температуре до 90 °С

4.1.2. Расчет методом термоса

Исходные данные:



Город	г. Томск
Месяц	январь
Температура бетонной смеси при выходе из транспортного средства	$t_{см}$ = +40 °С
Время перевозки	$\tau_{пер}$ = 8 мин
Высота подъема краном	$H_{под}$ = 12 м
Марка автомобиля	ЗИЛ ММЗ-555
Время укладки	$\tau_{укл}$ = 10 мин
Тип опалубки	V
Класс бетона	В15
Расход цемента	Ц = 350 кг/м^3
Марка цемента	М400
Расход арматуры	$Р_а$ = 70 кг/м^3
Температура бетона конечная	$t_{б.к}$ = +5 °С

Решение:

1. Определим объем бетона в конструкции:

$$V_б = 3,7 \cdot 3,7 \cdot 0,3 + 1,2 \cdot 1,2 \cdot 3,3 = 8,859 \text{ м}^3.$$

2. Рассчитаем поверхность охлаждения конструкции:

$$F_{охл} = 4 \cdot 3,7 \cdot 0,3 + 4 \cdot 1,2 \cdot 3,3 + 3,7 \cdot 3,7 = 33,97 \text{ м}^2.$$

3. Определим модуль поверхности конструкции:

$$М_п = \frac{F_{охл}}{V_б} = \frac{33,97}{8,859} = 3,83 \text{ м}^{-1}.$$

4. Определим суммарное относительное снижение температуры бетонной смеси при всех операциях: транспортировании, перегрузке, укладке и уплотнении.

4.1. При транспортировании:

$$\Delta t_{\text{тр}} = \Delta t'_{\text{тр}} \cdot \tau_{\text{пер}} = 0,003 \cdot 8 = 0,024 \ \text{°C/°C},$$

где $\Delta t'_{\text{тр}}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при транспортировке (табл. П.4.1).

4.2. При перемещении краном:

$$\Delta t_{\text{пер}} = 0,0022 \cdot H_{\text{под}} = 0,0022 \cdot 12 = 0,0264 \ \text{°C/°C}.$$

4.3. При перегрузке и погрузке:

$$\Delta t_{\text{п}} = 0,032 \ \text{°C/°C}.$$

4.4. При укладке и уплотнении:

$$\Delta t_{\text{упл}} = \Delta t'_{\text{упл}} \cdot \tau_{\text{упл}} = 0,007 \cdot 10 = 0,07 \ \text{°C/°C},$$

где $\Delta t'_{\text{упл}}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при уплотнении и укладке (табл. П.4.2).

4.5. Определим суммарное относительное снижение температуры:

$$\sum \Delta t_{\text{тр}} = \Delta t_{\text{тр}} + \Delta t_{\text{пер}} + \Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{упл}} =$$
$$= 0,024 + 0,0264 + 0,03 = 0,1524 \ \text{°C/°C}.$$

5. Определим начальную среднюю температуру бетонной смеси после укладки в опалубку, уплотнения и укрытия:

$$t_{\text{см}} = \frac{t_{\text{б.н}} - t_{\text{н.в}} \sum \Delta t_{\text{тр}}}{1 - \sum \Delta t_{\text{тр}}},$$

где $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона начальная, °C; $t_{\text{см}}$ – температура бетонной смеси при выходе из транспортного средства, °C; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °C (табл. П.4.3).

$$t_{\text{б.н}} = t_{\text{см}}\left(1-\sum\Delta t_{\text{тр}}\right)+t_{\text{н.в}}\sum\Delta t_{\text{тр}};$$

$$t_{\text{б.н}} = 40\left(1-0{,}1524\right)+\left(-19{,}1\right)0{,}1524 = 30{,}99\ ^{\circ}\text{C};\quad t_{\text{б.н}} \approx 31\ ^{\circ}\text{C}.$$

6. Определим температуру бетона с учетом нагрева арматуры:

$$t'_{\text{б.н}} = \frac{C_{\text{б}}\gamma_{\text{б}}t_{\text{б.н}} + C_{\text{а}}\text{P}_{\text{а}}t_{\text{н.в}}}{C_{\text{б}}\gamma_{\text{б}} + C_{\text{а}}\text{P}_{\text{а}}},$$

где $C_{\text{а}}$ – удельная теплоемкость арматуры, кДж/(кг·°С); $C_{\text{а}}$ = = 0,48 кДж/(кг·°С); $C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость бетона, кДж/(кг·°С); $C_{\text{б}}$ = 1,047 кДж/(кг·°С); $\gamma_{\text{б}}$ – объемная масса бетона, кг/м^3; $\gamma_{\text{б}}$ = 2400 кг/м^3; $\text{P}_{\text{а}}$ – расход арматуры, кг/м^3; $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона начальная, °С; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С.

$$t'_{\text{б.н}} = \frac{1{,}047\cdot 2400\cdot 31 + 0{,}48\cdot 70\left(-19{,}1\right)}{1{,}047\cdot 2400 + 0{,}48\cdot 70} = 30{,}34\ ^{\circ}\text{C}.$$

7. Определим среднюю температуру остывания бетона:

$$t_{\text{б.ср}} = t_{\text{б.к}} + \frac{t'_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}}}{1{,}03 + 0{,}181\cdot \text{M}_{\text{п}} + 0{,}006\left(t_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}}\right)};$$

$$t_{\text{б.ср}} = 5 + \frac{30{,}34-5}{1{,}03+0{,}181\cdot 3{,}83+0{,}006\left(30{,}34-5\right)} = 18{,}54\ ^{\circ}\text{C}.$$

8. Пренебрегая тепловыделением цемента (экзотермия), определим время остывания бетона по формуле Б.Г. Скрамтаева:

$$\tau = \frac{C_{\text{б}}\cdot\gamma_{\text{б}}(t'_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}})}{3{,}6\cdot K_{\text{т}}\cdot \text{M}_{\text{п}}(t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}})},$$

где $K_{\text{т}}$ – коэффициент теплопередачи опалубки, зависит от конструкции опалубки и скорости ветра (табл. П.4.4).

$$\tau_{ост} = \frac{1,047 \cdot 2400\left(30,34-5\right)}{3,6 \cdot 1,07 \cdot 3,83\left(18,34-\left(-19,1\right)\right)} = 115,27 \text{ ч}; \quad \tau_{ост} = 4,8 \text{ сут}.$$

9. Определим прочность, которую наберет бетон за время остывания $\tau_{ост}$ = 115,27 ч и средней температуры остывания бетона $t_{б.ср}$ = 18,34 °С. По номограмме (рис. П.4.1) для бетона марки М200 (В15) на портландцементе М400 бетон набирает 58 % от R_{28}.

4.2. Метод ускоренного (горячего) термоса

Метод ускоренного термоса включает:

– обычный «термос» при укладке бетонной смеси в опалубку с начальной температурой ($t_{б.н}$) 10, 20, 30 °С;

– предварительный электроразогрев бетонной смеси на строительной площадке до 50–70 °С с помощью электродов с питанием от сети переменного тока с напряжением 380 (220, 127) В.

Укладка бетонной смеси выполняется на отогретое и подготовленное к бетонированию основание.

Ранее уложенный бетон и промерзшее основание отогреваются на глубину 300 мм. Мерзлые пучинистые грунты отогреваются до положительной температуры на глубину не менее 500 мм.

Арматура диаметром более 25 мм, а также арматура из жестких прокатных профилей и крупные закладные детали при температуре наружного воздуха ниже –10 °С отогреваются до положительной температуры.

Допустимое время нахождения бетонной смеси в пути, от момента выгрузки из бетоносмесителя до начала укладки в конструкцию, устанавливается строительной лабораторией в зависимости от вида цемента, состояния погоды и начальной температуры бетонной смеси. Допустимое время, исходя из условий удобоукладываемости, не должно превышать:

– 30 мин при температуре смеси $t_{б.с}$ = 40 °С;

– 45 мин при температуре смеси $t_{б.с}$ = 20–30 °С;

– 120 мин при температуре смеси $t_{б.с}$ = 5–10 °С.

Оптимальная температура отпускаемой с завода бетонной смеси составляет 30 °С, а с учетом предварительного разогрева бетонной смеси у места укладки – 10 °С.

4.2.1. Методика расчета конструкции опалубки и тепловой защиты, процесса набора прочности бетона и подбора электрической мощности трансформатора

Расчет подбора необходимой электрической мощности для предварительного разогрева бетонной смеси производится с учетом требуемой температуры разогрева, температуры смеси после транспортирования, ее удельного сопротивления, емкости бункеров для разогрева смеси.

По данным условиям возможный поток укладки бетонной смеси в смену определяется по формуле:

$$П_{б} = \frac{q \cdot K_{вр} \cdot 480}{\tau_{ц} \cdot K_{зу}},$$

где q – емкость бункера; $K_{вр}$ – коэффициент использования оборудования по времени (0,8); $K_{зу}$ – коэффициент учета зимних условий, равный поправочному коэффициенту к нормам времени, принят условно 1,3.

Расход электроэнергии для разогрева 1 м^3 бетонной смеси, кВт·ч/м^3, определяется по формуле:

$$W_{эр} = 0{,}75(t_{бр} - t_{бт}),$$

где $t_{бр}$ – температура разогретой бетонной смеси; $t_{бт}$ – температура бетонной смеси после транспортирования; 0,75 – коэффи-

циент, учитывающий расход электроэнергии для разогрева 1 м^3 бетонной смеси на 1 °С.

Требуемая мощность трансформатора определяется по формуле:

$$P_{\text{тр}} = \frac{\Pi_{\text{б}} \cdot W_{\text{эр}}}{8 \cdot K_{\text{вр}} \cdot \cos\varphi},$$

где $\Pi_{\text{б}}$ – поток бетонной смеси в смену; $W_{\text{эр}}$ – расход электроэнергии для разогрева 1 м^3 бетонной смеси; 8 – количество часов в смену; $K_{\text{вр}}$ – коэффициент использования оборудования по времени, принимаем 0,9; $\cos\varphi$ – при отдельном трансформаторе, равном 1.

Укладка бетонной смеси послойно производится темпами, не допускающими время перекрытия каждого слоя более 2,5–3 ч. Предварительно допустимая продолжительность перекрытия слоев должна назначаться строительной лабораторией. При цементах с началом схватывания не менее 1 ч 30 мин допустимая продолжительность перекрытия слоев бетонной смеси назначается расчетными данными (табл. 20).

Таблица 20

Допустимая продолжительность перекрытия слоев укладываемой бетонной смеси в конструкцию

Температура бетонной смеси, °С	Предельно допустимый возраст бетонной смеси к началу ее укладки	Предельно допустимая продолжительность укладки слоя
5–10	1 ч 30 мин	3 ч
10–25	1 ч 15 мин	2 ч 30 мин
15–20	45 мин	2 ч 15 мин

Примечание. В таблице приведены данные для бетонных смесей, приготовляемых с добавками ССБ и СДБ в количестве 0,2 % массы цемента.

Величина снижения температуры бетонной смеси за время ее укладки и уплотнения приводится в зависимости от толщины, высоты бетонируемой конструкции и длительности укладки и уплотнителя смеси (табл. 21).

Таблица 21

Снижение температуры бетона за время укладки и уплотнения (при перепаде температуры 1 °С)

Наименование конструкции, мм	Длительность укладки и уплотнения, мин			
	1	5	10	15
Плиты и стены толщиной:				
100	0,018	0,9	0,18	0,27
150	0,012	0,06	0,12	0,18
200	0,009	0,045	0,09	0,14
250	0,008	0,4	0,08	0,12
300	0,007	0,035	0,07	0,11
400	0,005	0,025	0,05	0,08
500	0,004	0,02	0,04	0,06
Балки высотой:				
250	0,008	0,04	0,08	0,12
300	0,007	0,035	0,07	0,11
400	0,005	0,025	0,05	0,08
500	0,003	0,015	0,03	0,04
600	0,003	0,015	0,03	0,05
700	0,003	0,015	0,03	0,05

Перепад температуры между открытой поверхностью бетонируемой конструкции и наружным воздухом для предотвращения появления трещин в конструкциях не должен превышать:

– 20 °С для монолитных конструкций с $М_п < 5$;

– 30 °С для монолитных конструкций с $М_п > 5$.

В случае невозможности соблюдения указанных условий поверхность конструкции после распалубливания укрывается брезентом, толью, щитами и т. д.

После укладки бетонной смеси в опалубку открытые поверхности бетона укрываются полиэтиленовой пленкой и теплоизоляцией в виде минераловатных плит для сохранения требуемой температуры.

Основными параметрами термосного выдерживания монолитных конструкций являются: марка цемента, его расход на

1 м^3 бетона, класс бетона, его начальная температура, температура наружного воздуха, модуль поверхности, коэффициент теплопередачи опалубки и продолжительность остывания бетона.

Прочность бетона в конструкции, в % от R_{28}, определяется по результатам измерения температуры твердеющего бетона. Ориентировочно для этого можно пользоваться графиками нарастания прочности (рис. 15, 16).

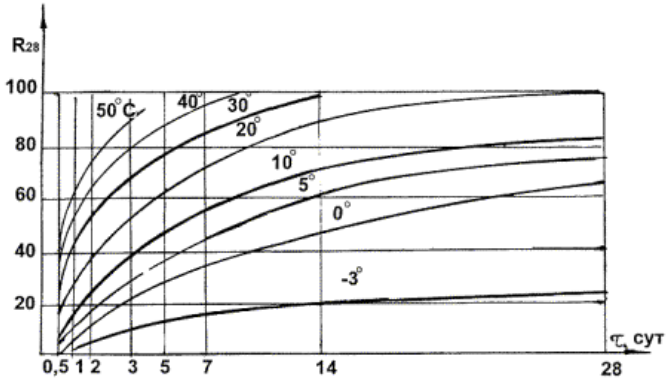


Рис. 15. График нарастания прочности бетона класса В15, В25 на портландцементе марки 400

График нарастания прочности бетона при различных температурах подготавливается строительной лабораторией в процессе подбора состава бетона. При определении прочности бетона по кривым нарастания прочности рассчитывается средняя температура бетона для интервала времени, перепад температур в котором не превышает 10 °С. При снятии с бетонируемых конструкций опалубки или теплоизоляции соблюдаются следующие требования:

– не допускается распалубливание или снятие теплоизоляции с конструкции, если температура бетона в ее центре продолжает повышаться;

– снятие с конструкции опалубки и теплоизоляции разрешается не ранее достижения в контрольной точке требуемой прочности;

– опалубка или тепловая изоляция конструкции снимается, когда температура бетона в наружных слоях конструкции достигает +5 °С и не позже, чем слои остынут до 0 °С. Не допускается примерзание опалубки гидро-, теплоизоляции к бетону;

– распалубка и снятие теплозащиты с монолитных массивных конструкций с $M_п \geq 2$ допускается при перепаде температур между центром конструкции и средней температурой наружного воздуха (в ближайшие 10 дней после распалубки) не более 30 °С при оптимальной теплоизоляции и 27 °С при теплоизоляции выше оптимальной.

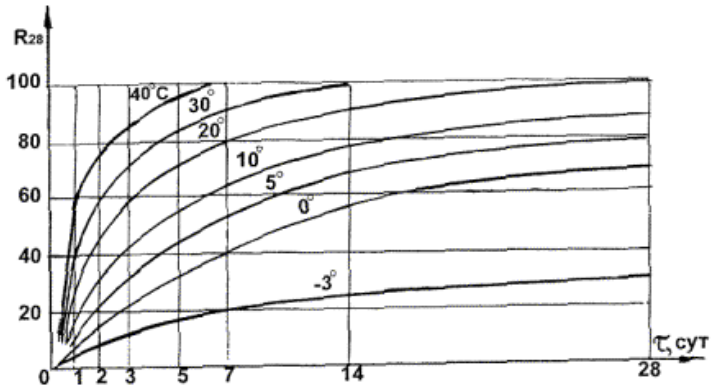


Рис. 16. График нарастания прочности бетона класса В35 на портландцементе марки 500

Примеры определения модуля поверхности $M_п$ *некоторых конструкций.* Модуль поверхности определяется отношением суммы площадей охлаждаемых поверхностей конструкции ΣF к ее объему V:

$$M_п = \frac{\sum F}{V}.$$

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

а) для колонн и балок квадратного сечения со стороной

$$M_п = \frac{4}{b};$$

б) для цилиндрической оболочки

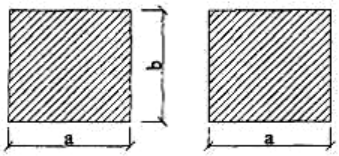
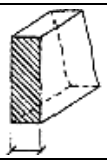
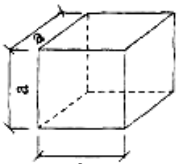
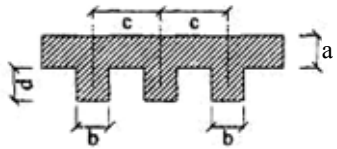
$$M_п = \frac{2}{b_1 \cdot m} + \frac{2}{h \cdot m},$$

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

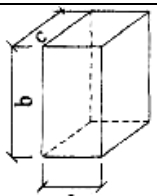
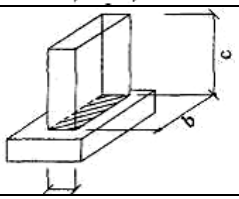
Для цилиндрических оболочек без заделки торцов m = 1, с пробкой на одном торце m = 1,5 и пробками на обоих торцах m = 2.

Формулы определения модуля поверхности $M_п$ для других видов конструкций представлены в табл. 22.

Таблица 22

	Балки и колонны прямоугольного сечения со сторонами *a* и *b* То же, квадратного сечения со стороной *a*	$M_п = \frac{2}{a} + \frac{2}{b}$ $M_п = \frac{4}{a}$
	Стены и плиты толщиной *a*	$M_п = \frac{2}{a}$
	Куб	$M_п = \frac{6}{a}$
	Ребристое перекрытие	$M_п = 2\frac{d+c}{bd+ca}$

Окончание табл. 22

	Параллелепипед со сторонами *a*, *b*, *c*	$M_п = \frac{2}{a} + \frac{2}{b} + \frac{2}{c}$
	Параллелепипед, примыкающий к массиву	$M_п = \frac{2}{a} + \frac{2}{b} + \frac{1}{c}$
	Для цилиндра с радиусом *R* и высотой *C*, м	$M_п = \frac{2}{R} + \frac{2}{C}$

4.2.2. Расчет конструкции опалубки и тепловой защиты, процесса набора прочности бетона, подбора электрической мощности трансформатора

Исходные данные:

– монолитная железобетонная плита размерами:

a = 30 000 мм, b = 20 000 мм и толщиной h = 500 мм;

– температура наружного воздуха $t_{н.в}$ = –10 °С;

– бетон укладывается на отогретое грунтовое основание;

– бетон марки 300 (В22,5) на портландцементе марки 400;

– скорость ветра ω = 5 м/с;

– температура бетонной смеси сразу после выхода с завода $t_{б.с}$ = 35 °С;

– температура бетона после транспортирования $t_{тр}$ = 30 °С;

– время укладки и уплотнения $t_у$ = 10 мин;

– расход цемента 320 кг на м^3 бетона;

– требуемая прочность к моменту замерзания бетона – 40 % от R_{28}.

Решение:

а) определяется модуль поверхности охлаждения:

$$M_п = \frac{2ab + 2ah + 2bh}{abh} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 20 + 2 \cdot 30 \cdot 0,5 + 2 \cdot 20 \cdot 0,5}{30 \cdot 20 \cdot 0,5} = 4,1 \approx 4;$$

б) определяется начальная температура бетона (после укладки и уплотнения) $t_{б.н}$ при h = 500 мм, t = 10 мин и перепада температур Δt = 1 °С, снижение температуры $t_{1\ °C}$ = 0,04 °С при заданном перепаде $\Delta t = t_{тр} - t_{нв} = 30 - (-10) = 40$ °С;

$$t_{40\ °C} = 0,04 \cdot 40 = 1,6\ °C;$$

$$t_{б.н} = 30 - 1,6 = 28,4\ °C \approx 28\ °C;$$

в) по номограмме на рис. 17, для бетона марки 300, на портландцементе марки 400 с расходом цемента 320 кг/м^3 при температуре наружного воздуха $t_{н.в}$ = –10 °С; $M_п$ = 4 и начальной температурой бетона $t_{б.н}$ = 28 °С, находящейся между значениями $t_{б.н}$ = 20 °С и $t_{б.н}$ = 30 °С, методом интерполяции определяются:

– продолжительность остывания $t_0 = (81 - 67)2/10 + 67 \approx 70$ ч;

– коэффициент теплопередачи $K_т$ = 5,35 – (5,35 – 3,75) × × 2/10 = 5,03 Вт/(м^2·°С);

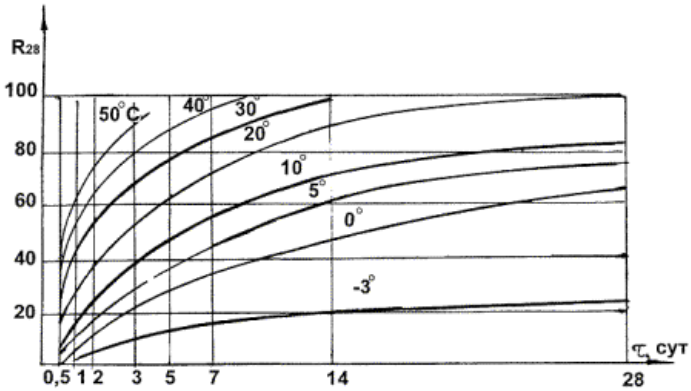
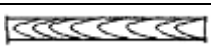


Рис. 17. График нарастания прочности бетона класса В15–В25 на портландцементе марки 400

г) по найденному коэффициенту $K_т$ (табл. 23) определяется конструкция опалубки и тепловая защита: при $K_т$ = 5,03 Вт/(м^2·°С) подходит тип опалубки II.

Таблица 23

Коэффициенты теплопередачи для различных типов теплоограждений опалубки

№ п/п	Конструкция теплоограждения опалубки	Схема	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·°С), при скорости ветра, м/с		
			0	5	15
1	Доска, 25 мм		2,44	5,22	5,97
2	Доска, 40 мм		2,01	3,6	3,94
3	Толь (или рубероид), 1 слой Минераловатная плита или шлаковата, 40 мм Толь (или рубероид), 1 слой		1,2	1,57	1,65
4	Сталь, 3 мм Минеральная вата, 50 мм Фанера, 4 мм		1,02	1,27	1,33
5	Электронагреватель, 3 мм Доска, 25 мм		1,5–23		
6	Электронагреватель, 3 мм Доска, 40 мм		1,3–2		
7	Электронагреватель, 3 мм Сталь, 3 мм		1,9–3,7		
8	Доска, 25 мм Толь Доска, 25 мм		1,8	3,02	3,25
9	Доска, 25 мм Пенопласт, 30 мм Фанера, 4 мм		0,67	0,80	0,82
10	Доска, 25 мм Толь Минеральная вата, 50 мм Фанера, 4 мм		0,87	1,07	1,10

Определение прочности бетона

Бетон класса В25. Режим остывания:
– при 45 °С – 12 ч;
– при 50 °С – 3 ч;
– при 43 °С – 3 ч;
– при 35 °С – 6 ч;
– при 30 °С – 7 ч;
– при 18 °С – 14 ч.

Отсчет прочности, в % от R_{28}, ведется по оси ординат по соответствующей температурной кривой (для данного интервала). Переход на последующие средние температуры твердения бетона осуществляется параллельно оси абсцисс. Отсчет времени производится путем суммирования его интервалов, соответствующих средним температурам (рис. 18).

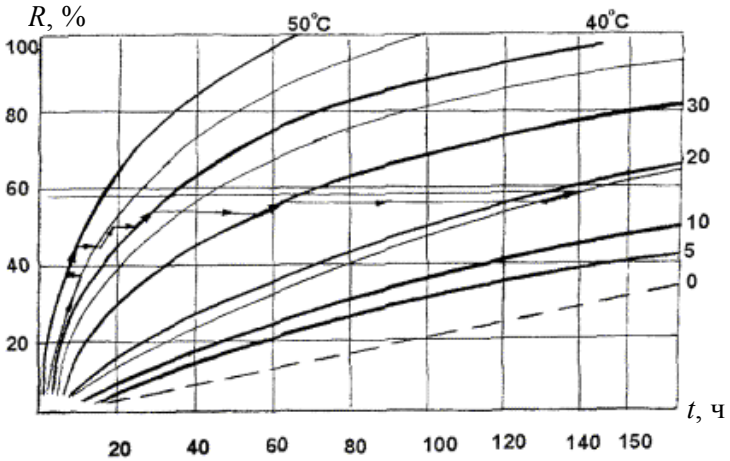


Рис. 18. Кривая набора прочности бетоном класса В25 при различных температурах его выдерживания

Таким образом, соблюдение приведенного режима остывания позволит получить 58 % от R_{28} прочности.

Расчет электрической мощности трансформатора

Определить требуемую мощность трансформатора для разогрева бетонной смеси в бункере, если известно, что:

– температура разогрева бетонной смеси $t_{бр} = 75$ °С;

– температура бетонной смеси после транспортирования $t_{бт} = 10$ °С;

– удельное сопротивление смеси $\rho = 600$ Ом·см;

– на площадке имеются бункера для разогрева бетонной смеси емкостью $q = 1{,}1$ м^3;

– укладка бетонной смеси в конструкцию предполагается осуществлять краном с продолжительностью цикла $t_ц = 8$ мин;

– транспортирование бетонной смеси осуществляется автобетоносмесителем $V_{бт} = 4$ м^3.

Решение:

По данным условиям возможный поток укладки бетонной смеси в смену определяется так:

$$П_б = \frac{1{,}1 \cdot 0{,}8 \cdot 480}{8 \cdot 1{,}3} = 40{,}6 \text{ м}^3/\text{смену}.$$

Расход электроэнергии для разогрева 1 м^3 бетонной смеси определяется следующим образом:

$$W_{эр} = 0{,}75(75 - 10) = 49 \text{ кВт·ч/м}^3.$$

Требуемая мощность трансформатора определяется:

$$P_{тр} = \frac{40{,}6 \cdot 49}{8 \cdot 0{,}9 \cdot 1} = 276 \text{ кВА}.$$

4.3. Метод выдерживания бетона с противоморозными добавками

Область применения

Область применения метода выдерживания бетона с противоморозными добавками представлена в табл. 24.

Таблица 24

№ 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) сборно-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 5 мм	–	+	+	+	+	+
	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)	–	+	–	–	+	+

Примечание. + – означает «допускается»; «–» – означает «не допускается»; П – поташ; НН – нитрит натрия; НКМ – нитрат кальция с мочевиной; ННХК – нитрит-нитрат-хлорид 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-нитрат кальция в сочетании с мочевиной; ННХК + М – нитрит-нитрат-хлорид кальция в сочетании с мочевиной.

Сущность метода

Сущность метода заключается во введении в бетонную смесь при ее изготовлении добавок, понижающих температуру замерзания воды, обеспечивающих протекание реакции гидратации цемента и его замедленное твердение при отрицательных температурах.

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.

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 и 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. 19). 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 раствора составит 28 %, а температура –19,6 °С, оставшаяся в нём вода полностью перейдёт в твёрдую фазу, образуя смесь льда и кристаллов $NaNO_2 \cdot 2H_2O$.

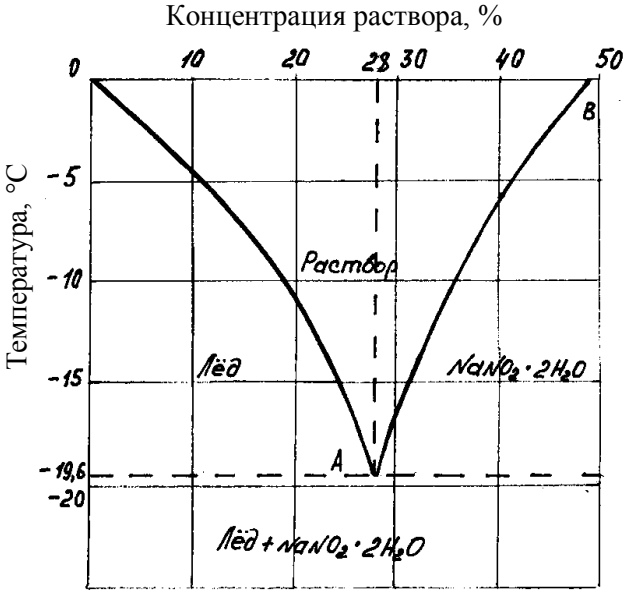


Рис. 19. Диаграмма состояния водных растворов нитрита натрия при температуре ниже 0 °С

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 ВА, а замерзание раствора также произойдёт в эвтектической точке А 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.

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 °С, при эвтектической температуре растворов этой соли – 19,6 °С. Обусловлено это тем, что с повышением концентрации раствора в нём уменьшается содержание «свободных» молекул воды, способных взаимодействовать с минералами цемента.

Указанное обстоятельство является причиной того, что противоморозные добавки вводятся в бетон 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.

Противоморозные добавки оказывают очень важное влияние на механические показатели льда: он характеризуется де-

фектной 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 в основном 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 °С), хлорид кальция (–55 °С), нитрат кальция (–28,2 °С), нитрит-нитрат кальция (–29,6 °С). Ускорение твер-

дения 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.

4.3.1. Методика расчета выдерживания бетона с противоморозными добавками

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. 25) в зависимости от температуры наружного воздуха.

Таблица 25

Рекомендуемый вид конструкций для возведения из бетонов с противоморозными добавками

Модуль поверхности конструкции $M_п$	Наименование конструкции	Средняя температура воздуха за период выдерживания, °С	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
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
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
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

Окончание табл. 25

Модуль поверхности конструкции $М_п$	Наименование конструкции	Средняя температура воздуха за период выдерживания, °С	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
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 °С – при применении добавки НН;

– 20 °С – при применении добавок ХК + ХН, НК + М, НКМ, ННК + М;

– 25 °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. 26, а после 28-суточного выдерживания при температурах выше 0 °С бетон, как правило, приобретает проектную прочность. Данные табл. 26 для выбранной добавки должны уточняться применительно к ис-

пользуемому на стройке цементу, так как темп твердения бетона с добавками зависит от вида и состава цемента.

Таблица 26

Нарастание прочности бетона с противоморозными добавками на портландцементах

Добавки	Расчётная температура твердения бетона, °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

3. Бетонные смеси с добавками НН и ХК + НН и температурой 15–20 °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 °С, имеют более длительные сроки загустевания (нача-

ло – 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.

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. 27).

Таблица 27

Продолжительность выдерживания бетона с противоморозными добавками до набора критической прочности

Добавки	Расчётная температура твердения бетона, °С	Время выдерживания, сут, при марке бетона		
		М200	М300	М400
–5	7	6	4	
–10	12	9	7	
–15	19	14	11	
–5	6	5	4	
–10	9	7	5	
–15	19	14	10	
–20	58	45	28	
–5	7	6	5	
–10	12	9	7	
–15	19	14	10	
–20	28	19	14	
–5	5	4	3	
–10	9	7	5	
–15	11	9	7	
–20	14	11	9	
–25	40	28	20	
–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. 27). При этом требующаяся продолжительность твердения до получения указанной в проекте или нормативных документах требуемой прочности, % от R_{28}, может оказаться достаточно боль-

шой 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.

Расчет выдерживания бетона с противоморозными добавками

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, % от R_{28}, и допустимая, исходя из темпов ведения работ, продолжительность выдерживания до получения указанной прочности, сут;

3) особенности возводимой конструкции и условий её эксплуатации (в соответствии с табл. 24):

– 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.

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.

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 % от R_{28}.

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

Особенности возводимой конструкции:

Фундамент с модулем охлаждаемой поверхности $М_п$ = 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·°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 пола-

гаем, что коэффициент теплопередачи по указанному утеплению равен теплопередаче через опалубку.

Выбор вида противоморозной добавки проводим в следующей последовательности:

1. В соответствии с табл. 24 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 следующих условий: температура наружного воздуха до –25 °С, относительная прочность – 50 % от R_{28}, срок выдерживания – 7 сут.

В соответствии с данными табл. 25, 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 °С для НН и –25 °С для П), определить которую помогут рекомендации разд. 1.3. Зададим начальную температуру бетона в конструкции $t_{б.н}$ = +10 °С, что вполне соответствует практике северных строительных площадок, где зимний бетон готовится только на подогретых воде и заполнителях. $t_{б.ср}$ 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 (табл. 28).

Таблица 28

$t_{н.в}$	–5 °С, –10 °С, –15 °С, –20 °С, –25 °С
$t_{б.к}$	–5 °С, –10 °С, –15 °С, –20 °С, –25 °С

Бетон остывает до температуры наружного воздуха.

Напомним, что средняя температура определяется по формуле

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

После соответствующих расчётов полученные данные сведём в табл. 29, отражающую связь между температурой наружного воздуха и температурой бетона независимо от вида добавки.

Таблица 29

$t_{\text{н.в}}$, °С	–5	–10	–15	–20	–25
$t_{\text{б.ср}}$, °С	2,6	0	–2	–4,95	–7,3

Затем выполним расчёт продолжительности остывания без учёта экзотермии по формуле

$$\tau_{\text{о}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} (t_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}})}{3{,}6 \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}} (t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}})}, \text{ ч.}$$

Указанная зависимость справедлива при размерностях: $\gamma_{\text{б}}$, кг/м^3; $C_{\text{б}}$, кДж/(кг·°С); $K_{\text{т}}$, Вт/(м^2·°С); температура, °С.

Примем по соответствующим табличным данным $\gamma_{\text{б}}$ = = 2500 кг/м^3, $C_{\text{б}}$ = 0,84 кДж/(кг·°С), $K_{\text{т}}$ = 3,6 Вт/(м^2·°С) при скорости ветра 5 м/с, и проведём расчёт продолжительности остывания без учёта экзотермии (табл. 30).

Таблица 30

$t_{\text{н.в}} = t_{\text{б.к}}$	Продолжительность остывания τ, ч
–5	$\frac{0{,}84 \cdot 2500(10+5)}{3{,}6 \cdot 3{,}6 \cdot 4{,}5(2{,}6+5)} = 71$
–10	$\frac{0{,}84 \cdot 2500(10+10)}{3{,}6 \cdot 3{,}6 \cdot 4{,}5(0+10)} = 72$

Окончание табл. 30

$t_{н.в} = t_{б.к}$	Продолжительность остывания τ, ч
–15	$\frac{0,84 \cdot 2500(10+15)}{3,6 \cdot 3,6 \cdot 4,5(-2,5+15)} = 74$
–20	$\frac{0,84 \cdot 2500(10+20)}{3,6 \cdot 3,6 \cdot 4,5(-4,95+20)} = 72$
–25	$\frac{0,84 \cdot 2500(10+25)}{3,6 \cdot 3,6 \cdot 4,5(-7,3+25)} = 71,2$

В связи с тем, что учёт тепловыделения при положительных температурах бетона не пригоден для рассматриваемого примера, воспользуемся рекомендацией, приведённой в руководстве по применению бетонов с противоморозными добавками, в которой тепловыделение учитывается членом «+α·Ц·Э·*R*», где α – коэффициент интенсивности тепловыделения; Ц – расход цемента на 1 м^3 бетона, кг; Э – тепловыделение 1 кг цемента за 28 сут твердения при 20 °С, кДж/кг; *R* – прочность, набираемая бетоном за время остывания бетона, % от марочной. Соответствующие величины α и Э приведены в табл. 31, 32.

Таблица 31

Коэффициент интенсивности тепловыделения α

$t_{б.н} - t_{б.к}$	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 32

Тепловыделение цементов Э за 28 сут твердения при 20 °С, кДж/кг

Портландцемент марки		
М400	М500	М600
335,2	337,1	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 назначим четверо суток.

Приняв по табл. 26 температуру наружного воздуха –15 °С, $t_{б.ср}$ = –2,5 °С и продолжительность остывания около 4 сут, путём экстраполяции определяем прочность бетона с добавкой НН – R = 20–25 % R_{28}.

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

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

Тепловыделение бетона с добавкой НН составит:

$t_{б.ср}$ = –2,5 °С, α = 0,014 ($t_{перепада}$ = 25 °С), Ц = 250 кг/м^3;

R = 22 %, Э = 335 кДж/кг;

$+\alpha \cdot Ц \cdot Э \cdot R = +0{,}014 \cdot 250 \cdot 335 \cdot 22 = 25795$ кДж/м^3.

Внесём соответствующие поправки в расчёт продолжительности остывания (табл. 33).

Таблица 33

$t_{н.в}$	Добавка	Продолжительность остывания τ
–15 °С	НН	$\tau = \dfrac{52500 - 25795}{711{,}5} = 110$ ч = 4,6 сут
	П	$\tau = \dfrac{52500 - 37520}{711{,}5} = 126$ ч = 5,2 сут

Окончание табл. 33

$t_{н.в}$	Добавка	Продолжительность остывания τ
–25 °С	НН	$\tau = \frac{73500 + 16080}{1032,2} = 87$ ч = 3,6 сут
	П	$\tau = \frac{73500 + 22780}{1032,2} = 93$ ч = 3,9 сут

$t_{б.ср} = –7,3$ °С, $\alpha = 0,016$ ($t_{перепада} = 35$ °С), $R = 12$ %,

$–0,016 \cdot 250 \cdot 12 \cdot 335,2 = 16080$ кДж/м^3.

Тепловыделение бетона с добавкой П составит:

$t_{б.ср} = –2,5$ °С, $\alpha = 0,014$, $R = 32$ %;

$–0,014 \cdot 250 \cdot 32 \cdot 335,2 = 37520$ кДж/м^3;

$t_{б.ср} = –7,3$ °С, $\alpha = 0,016$, $R = 17$ %;

$–0,016 \cdot 250 \cdot 17 \cdot 335,2 = 22780$ кДж/м^3.

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: определению температуры наружного воздуха, при которой могут быть выполнены требования получения прочности 50 % от R_{28} для бетона с добавкой НН и П не более чем за 7 сут.

Режим твердения бетона рассматриваемого фундамента в зависимости от температуры наружного воздуха имеет следующие характеристики (табл. 34).

Таблица 34

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 $t_{б.к}$	Всего суток
–15 °С	+10 °С	НН	4,60	–2 °С	2,40	7
		П	5,25		1,75	7
–25 °С	+10 °С	НН	3,60	–7,3 °С	3,40	7
		П	3,90		3,10	7

Прочность бетона определяется по продолжительности и температуре соответствующего промежутка времени (табл. 35).

Таблица 35

Прочность бетона в течение 7 суток твердения

$t_{н.в}$	Вид добавки	Прочность, % от R_{28}, за время		Всего за 7 сут
		остывания	дополнит.	
–15 °С	НН	30–35	До 5	35–40
	П	45–50	5–10	50–60
–25 °С	НН	10–12	–	10–12
	П	20– 25	10	30–35

Как видно из табл. 35, для бетона с НН $t_{н.в}$ = –15 °С ниже предельной, т. к. прочность не достигла требуемых 50 %. Поэтому даже без уточняющих расчётов можно считать $t_{н.в}$ = –10 °С предельной для выполнения поставленных требований к бетону.

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

Выполненные по принципу теплового баланса расчёты позволяют почувствовать влияние на режим остывания (и соответст-

вующее нарастание прочности) таких основных факторов, как температура наружного воздуха, температура бетона, эффективность теплоизоляции конструкции, состав бетона, 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.

Подбор состава бетона для производства работ в зимних условиях

Подбор состава выполняют в соответствии с ГОСТ 27006–86 расчетно-экспериментальным способом, который включает решение следующих вопросов:

– определение всех требований к качеству бетонной смеси и бетона;

– оценку качества и выбор материалов для приготовления бетонной смеси;

– расчет номинального состава бетона;

– экспериментальную проверку расчетного состава;

– корректировку состава и расчет производственного состава бетона.

При приготовлении бетонной смеси возможен подогрев воды затворения, отогрев или подогрев составляющих, а также отопление бетоносмесительного узла, дозаторного и бункерных отделений.

Максимальная температура бетонной смеси не должна превышать 35 °С, а минимальная определяется расчетом по формуле

$$t_{\text{см}} = \frac{\left(t_{\text{б.н}} - t_{\text{н.в}} \sum \Delta t_{\text{тр}}\right)}{1 - \sum \Delta t_{\text{тр}}},$$

где $t_{\text{б.н}}$ – начальная средняя температура бетона после укладки в опалубку, уплотнения и укрытия, $t_{\text{б.н}} = 0$ °С; $t_{\text{н.в}}$ – расчетная температура наружного воздуха; $\sum \Delta t_{\text{тр}}$ – суммарное относительное снижение температуры бетонной смеси при всех операциях, $\sum \Delta t_{\text{тр}} = \Delta t_{\text{тр}} + \Delta t_{\text{пер}} + \Delta t_{\text{укл}}$; $\sum \Delta t_{\text{тр}} = t'_{\text{тр}} \cdot \tau_{\text{тр}}$; $\tau_{\text{тр}}$ – время транспортирования бетонной смеси; $\Delta t'_{\text{тр}}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при транспортировании; $\Delta t_{\text{пер}}$ – относительное снижение температуры бетонной смеси при перегрузке бетонной смеси из кузова в бункер; $\Delta t_{\text{укл}}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при укладке бетонной смеси,

$$\Delta t_{\text{укл}} = \Delta t'_{\text{укл}} \cdot \tau \cdot T,$$

где τ – время укладки бетонной смеси; $\Delta t'_{\text{укл}}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при укладке; T – перепад температур наружного воздуха и укладываемой бетонной смеси.

Для получения максимальной температуры бетонной смеси на выходе из бетоносмесителя производят подогрев воды до максимально допустимой температуры +80 °С.

Цемент и крупный заполнитель не подогревают. Производят прогрев песка до температуры, определяемой по формуле

$$t_n = \left(0{,}84\left(q_{\text{п}} + q_{\text{ц}} + q_{\text{щ}}\right)t_{\text{см}} + 4{,}2q_{\text{в}}t_{\text{см}} - 0{,}84\left(q_{\text{ц}}t_{\text{ц}} + q_{\text{щ}}t_{\text{щ}}\right) - 4{,}2q_{\text{в}}t_{\text{в}}\right)\Big/ 8{,}4q_{\text{п}},$$

где $q_{\text{ц}}$, $q_{\text{п}}$, $q_{\text{щ}}$, $q_{\text{в}}$ – соответственно, масса цемента, песка, щебня и воды в 1 м^3 бетонной смеси; $t_{\text{ц}}$, $t_{\text{см}}$, $t_{\text{щ}}$, $t_{\text{в}}$ – соответственно, температура цемента, бетонной смеси, щебня и воды перед загрузкой их в бетоносмеситель.

Время перемешивания бетонной смеси в бетоносмесителе должно быть больше, по сравнению с летними условиями, на 25 %.

Установленное в соответствии с рекомендациями количество химических добавок вводят при приготовлении бетонных смесей в виде водных растворов рабочей концентрации. Растворы солей готовят на подогретой до 40 °С воде в смесителях. Основные показатели водных растворов противоморозных и пластифицирующих добавок приведены в табл. 36–38.

Таблица 36

Концентрация противоморозных добавок в зависимости от температуры наружного воздуха

Расчетная температура бетона, 0 °С		Количество безводных добавок, % от массы цемента						
От	До	НН	ХН + ХК	НКМ НК + М	ННК + М, НК + М	ННХК ХК + НН	ННХК + М	П
0	–5	4–6	(0 + 3) – – (2 + 3)	3–5	(3 + 1) – – (4 + 1,5)	3–5	(2 + 1) – – (4 + 1)	5–6
–6	–10	6–8	(3,5 + 3,5) – – (2,5 + 4)	6–9	(5 + 1,5) – – (7 + 2,5)	6–9	(4,5 + 1,5) – – (7 + 2,5)	7–8
–11	–15	8–10	(4,5 + 3) – – (5 + 3,5)	7–10	(6 + 2) – – (8 + 3)	7–10	(6 + 2) – – (8 + 3)	8–10
–16	–20	9–10	(6 + 2,5) – – (7 + 3)	9–12	(7 + 3) – – (9 + 4)	8–12	(7 + 2) – – (9 + 4)	10–12
–21	–25	–	–	–	–	10–14	(8 + 3) – – (10 + 4)	12–15

Таблица 37

Рекомендуемые виды пластифицирующих добавок

Вид добавки	Обозначение	Основной эффект
Суперпластификатор	С-3	Водопонижение на 20 %, замедляет схватывание
Суперпластификатор	ЛСТМ	Увеличивает подвижность, снижает расход воды на 20 %
Сульфитно-дрожжевая бражка	СДБ	Снижает водопотребность на 10 %. Замедляет схватывание и твердение бетона
Тетраборат натрия	ТН	Замедляет схватывание поташа
Тринатрийфосфат	ТНФ	Замедляет схватывание поташа

Таблица 38

Рекомендуемое количество комплексных противоморозных добавок

Компоненты	Количество добавки в расчете на сухое вещество, % от массы цемента	Основной эффект
СДБ + (НН, НК)	(0,1–0,3) + (0,3–1,5)	Водопонижение на 10 %
П + СДБ	(5–6) + (0,2–0,3)	Нормальные сроки схватывания, водопонижение на 10 %
М + ННК	(1–1,2) + (2–4)	Нормальные сроки схватывания
М + НК	(1,5–2,5) + (1,5–2,5)	Поставляется в готовом виде в полиэтиленовых мешках
НКМ	3–5	Поставляется в готовом виде в полиэтиленовых мешках
С-3 + ННК	(0,5–0,7) + (2–4)	Водопонижение на 25 %, ускорение твердения в 1,15 раза
С-3 + НК	(0,5–0,7) + (1,0–1,5)	Водопонижение на 25 %, ускорение твердения в 1,15 раза
С-3 + П	(0,5–0,7) + (5–6)	Нормальные сроки схватывания, водопонижение на 25 %
П + ТН	(5–6) + (1–1,2)	При содержании C_3A до 5 %
П + ТНФ	(5–6) + (1–1,2)	При содержании C_3A до 10 %

Расход раствора химической добавки рабочей концентрации определяют по формуле

$$А = \frac{100 \cdot В + Ц \cdot C}{100 \cdot П},$$

где Ц – расход цемента на 1 м^3 бетона, кг; В – расход воды на 1 м^3 бетона, л; *С* – дозировка добавки, % от массы цемента; П – плотность раствора затворения, кг/м^3.

Транспортирование приготовленной бетонной смеси производят автобетоносмесителями. Чтобы потери тепла были минимальными, открытые части барабана автобетоносмесителя закрывают влагонепроницаемыми материалами и утепляют. Горловину барабана автобетоносмесителя утепляют и закрывают теплоизоляционной крышкой или организовывают обогрев горловины отработавшими газами от двигателя. При использовании только поташа рекомендуется добавлять его на объекте путем введения водного раствора поташа с перемешиванием всех компонентов в барабане автобетоносмесителя. Место перегрузки бетонной смеси из барабана бетоносмесителя в поворотный бункер должно быть защищено от ветра и атмосферных осадков. Бункер для подачи бетонной смеси также должен быть утеплен.

При использовании для подачи бетонной смеси бетононасосных установок все узлы и детали, соприкасающиеся с бетонной смесью, утепляют. При этом особо тщательно утеплять трубопроводы и основные узлы бетононасоса, чтобы сохранить начальную температуру бетона. При экстремальных температурах до –40 °С, кроме утепления основных узлов бетононасоса, требуется дополнительный отогрев утепленного бетоновода гибкими нагревательными элементами. Должно быть также предусмотрено наличие горячей воды в утепленных емкостях для промывки бетоноводов после бетонирования.

Выдерживание монолитных бетонных и железобетонных конструкций, возводимых из бетонов с противоморозными добавками, выполняют с соблюдением следующих требований:

– поверхности бетона, не защищенные опалубкой, во избежание потери влаги или повышенного увлажнения за счет атмосферных осадков следует по окончании бетонирования немедленно укрывать слоем гидроизоляционного материала (полиэтиленовая пленка, прорезиненная ткань, рубероид и др.);

– поверхности бетона, не предназначенные в дальнейшем для монолитной связи с бетоном или раствором, могут покрываться пленкообразующими составами или защитными пленками (битумно-этинолевым, этинолевым лаком и др.);

– при резком понижении температуры бетона, ниже расчетной, конструкцию необходимо утеплять или обогревать до набора бетоном критической прочности.

Распалубливание несущих бетонных и железобетонных конструкций следует производить после достижения бетоном прочности, приведенной в табл. 39.

Таблица 39

Распалубочная прочность несущих конструкций из бетона с противоморозными добавками

Конструкции	Прочность бетона (% от проектной) при фактической нагрузке	
	свыше 70 % от расчетной	менее 70 % от расчетной
С напрягаемой арматурой	100	80
Находящиеся в мерзлом грунте	100	70–85
Несущие, длиной менее 6 м	100	70
Несущие, длиной 6 м и более	100	80
Плиты пролетов, до 3 м	100	70

При невозможности обеспечить требуемую прочность бетона к моменту загрузки конструкции нормативной нагрузкой допускается, при соответствующем технико-экономическом обосновании, применение класса бетона, увеличенного на одну ступень.

Допускается снятие опалубки, воспринимающей массу бетона конструкций, армированных несущими сварными каркасами, а также боковых элементов, не несущих нагрузки от массы конструкций, после достижения бетоном критической прочности.

Прочность бетона перед распалубливанием должна быть подтверждена испытаниями. Снятие теплозащиты и опалубки с конструкций, при применении бетонов с противоморозными добавками – по достижении прочности, указанной в разд. 3.

При укладке и уплотнении бетонной смеси с противоморозными добавками, укладываемой в зимних условиях, следует выполнять требования, приведенные в табл. 40.

Таблица 40

Технические требования при укладке бетонной смеси

Технические требования	Предельные отклонения, мм	Контроль (метод, объем)
Температура бетонной смеси на выходе из смесителя: только с добавкой П с другими добавками	 Не более 15 °С Не более 30 °С	Измерительный, при приготовлении каждой партии
Подвижность бетонной смеси	5–6 см	Стандартный конус, в каждой партии
Высота свободного сбрасывания бетонной смеси	Не более 1 м	Измерительный, во время укладки
Толщина укладываемых слоев бетонной смеси	180 мм	Визуально, при бетонировании
Шаг перестановки глубинных вибраторов	1,5 радиуса действия – 40–50 см	Измерительный, при бетонировании
Время уплотнения глубинным вибратором на одной стоянке	12–17 с	Измерительный, при бетонировании
Скорость передвижения виброрейки по поверхности	0,5–1,0 м/мин	Измерительный, при бетонировании
Время укладки бетонной смеси: с добавкой только П с другими добавками	 Не более 45–50 мин Не более 120 мин	Измерительный, при бетонировании

Окончание табл. 40

Технические требования	Предельные отклонения, мм	Контроль (метод, объем)
Температура уложенной бетонной смеси к началу термообработки	Не менее 0 °С	Измерительный, по окончании бетонирования

При выдерживании бетона с противоморозными добавками контролируют:

– поддержание температурно-влажностного режима;

– предохранение твердеющего бетона от механических повреждений;

– время выдерживания бетона.

Технические требования при выдерживании бетона с противоморозными добавками приведены в табл. 41.

Таблица 41

Технические требования при выдерживании бетона с противоморозными добавками

Технические требования	Величина параметра	Контроль (метод, объем)
1. Температура наружного воздуха	Не более 5 °С среднесуточная, не более 0 °С минимальная	Измерительный, до начала выдерживания
2. Время выдерживания бетона	До набора заданной прочности	Измерительный, при выдерживании бетона
3. Прочность бетона с противоморозными добавками монолитных и сборно-монолитных конструкций к моменту замерзания	К моменту охлаждения бетона до температуры, на которую рассчитано количество добавок, не менее 20 % проектной прочности	Измерительный, по ГОСТ 18105–86, журнал работ

Продолжение табл. 41

Технические требования	Величина параметра	Контроль (метод, объем)
4. Загружение конструкций расчетной нагрузкой допускается после достижения бетоном прочности	Не менее 100 % от проектной	Измерительный, 2 раза в смену, журнал работ
5. Температура воды и бетонной смеси на выходе из смесителя, приготовленной:		
на портландцементе, шлакопортландцементе, пуццолановом портландцементе марок ниже М600	Воды не более 70 °С, смеси не более 35 °С	Измерительный, в местах, определенных ППР, журнал работ
на быстротвердеющем портландцементе и портландцементе марки М600 и выше	Воды не более 60 °С, смеси не более 30 °С	Измерительный, в местах, определенных ППР, журнал работ
на глиноземистом портландцементе	Воды не более 40 °С, смеси не более 25 °С	Измерительный, в местах, определенных ППР, журнал работ
8. Температура в процессе выдерживания и тепловой обработки для бетона на:	Определяется расчетом, но не выше, °С:	Измерительный, через каждые 2 ч, журнал работ
портландцементе	80	
шлакопортландцементе	90	
9. Скорость подъема температуры при тепловой обработке бетона:	Не более, °С/ч:	Измерительный, журнал работ
для конструкций с модулем поверхности:		
до 4	5	
от 5 до 10	10	
св. 10	15	
для стыков	20	

Окончание табл. 41

Технические требования	Величина параметра	Контроль (метод, объем)
10. Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки для конструкций с модулем поверхности: до 4 от 5 до 10 св. 10	 Определяется расчетом Не более 5 °С/ч Не более 10 °С/ч	Измерительный, журнал работ
11. Разность температур наружных слоев бетона и воздуха при распалубке с коэффициентом армирования от 1 до 3 % и более должна быть соответственно для конструкций с модулем поверхности: от 2 до 5 св. 5	 Не более 20, 30, 40 °С Не более 30, 40,50 °С	Измерительный, журнал работ

4.3.2. Расчет определения параметров выдерживания бетона с применением противоморозных добавок

Исходные данные:

Конструкция – ростверк	0,6×0,5(h)×6,5 м
Город	г. Минусинск
Месяц	декабрь
Температура бетонной смеси	$t_{см}$ = +10 °С
Время перевозки	$\tau_{тр}$ = 8 мин
Высота подъема краном	$H_{под}$ = 12 м
Марка автомобиля	ЗИЛ ММЗ-555
Время укладки	$\tau_{у}$ = 10 мин
Тип опалубки	V
Класс бетона	В15
Расход цемента	Ц = 350 кг/м^3

Марка цемента	М400
Расход арматуры	$P_а = 70$ кг/м^3

Решение:

1. Определим объем бетона в конструкции:

$$V_б = 0{,}6 \cdot 6{,}5 \cdot 0{,}5 = 1{,}95 \text{ м}^3.$$

2. Рассчитаем поверхность охлаждения конструкции:

$$F_{охл} = 2 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}5 + 2 \cdot 0{,}5 \cdot 6{,}5 + 0{,}6 \cdot 6{,}5 = 11{,}6 \text{ м}^2.$$

3. Определим модуль поверхности конструкции:

$$М_п = \frac{F_{охл}}{V_б} = \frac{11{,}6}{1{,}95} = 5{,}95 \text{ м}^{-1}.$$

4. Определим суммарное относительное снижения температуры бетонной смеси при всех операциях: при транспортировании, перегрузке, укладке и уплотнении.

4.1. При транспортировании:

$$\Delta t_{тр} = \Delta t'_{тр} \cdot \tau_{тр} = 0{,}003 \cdot 8 = 0{,}024 \text{ °С/°С},$$

где $\Delta t'_{тр}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при транспортировке (табл. П.4.1).

4.2. При перемещении краном:

$$\Delta t_{пер} = 0{,}0022 \cdot H_{под} = 0{,}0022 \cdot 12 = 0{,}0264 \text{ °С/°С}.$$

4.3. При перегрузке и погрузке:

$$\Delta t_п = 0{,}032 \text{ °С/°С}.$$

4.4. При укладке и уплотнении:

$$\Delta t_у = \Delta t'_у \cdot \tau_у = 0{,}004 \cdot 10 = 0{,}04 \text{ °С/°С},$$

где $\Delta t'_у$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при уплотнении и укладке (табл. П.4.2).

4.5. Определим суммарное относительное снижение температуры:

$$\sum \Delta t_{\text{тр}} = \Delta t_{\text{тр}} + \Delta t_{\text{пер}} + \Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{у}} =$$

$$= 0,024 + 0,0264 + 0,032 + 0,04 = 0,1224 \text{ °С/°С}.$$

5. Определим начальную среднюю температура бетонной смеси после укладки в опалубку, уплотнения и укрытия:

$$t_{\text{см}} = \frac{\left(t_{\text{б.н}} - t_{\text{н.в}} \sum \Delta t_{\text{тр}}\right)}{1 - \sum \Delta t_{\text{тр}}},$$

где $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона начальная, °С; $t_{\text{см}}$ – бетонной смеси при выходе из транспортного средства, °С; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С (табл. П.4.3).

$$t_{\text{б.н}} = t_{\text{см}}(1 - \sum \Delta t_{\text{тр}}) + t_{\text{н.в}} \sum \Delta t_{\text{тр}};$$

$$t_{\text{б.н}} = 10(1 - 0,1224) + (-17,8)0,1224 = 6,6 \text{ °С}.$$

6. Определим температуру бетона с учетом нагрева арматуры:

$$t'_{\text{б.н}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot t_{\text{б.н}} + C_{\text{а}} \cdot \text{Р}_{\text{а}} \cdot t_{\text{н.в}}}{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} + C_{\text{а}} \cdot \text{Р}_{\text{а}}},$$

где $C_{\text{а}}$ – удельная теплоемкость арматуры, кДж/(кг·°С), $C_{\text{а}}$ = = 0,48 кДж/(кг·°С); $C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость бетона, кДж/(кг·°С), $C_{\text{б}}$ = 1,047 кДж/(кг·°С); $\gamma_{\text{б}}$ – объемная масса бетона, кг/м^3; $\gamma_{\text{б}}$ = 2400 кг/м^3; $\text{Р}_{\text{а}}$ – расход арматуры, кг/м^3; $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона начальная, °С; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С.

$$t'_{\text{б.н}} = \frac{1,05 \cdot 2400 \cdot 6,6 + 0,48 \cdot 70(-17,8)}{1,05 \cdot 2400 + 0,48 \cdot 70} = 6,28 \text{ °С}.$$

7. Определим вид противоморозной добавки в зависимости от температуры наружного воздуха.

При $t_{н.в} = -17{,}8$ °С, В/Ц = 0,65 принимаем противоморозную добавку поташ K_2CO_3, равную 14,65 %. Рассчитываем количество добавки поташ от расхода цемента: $350 \cdot 0{,}1465 = 51{,}28$ кг/м^3.

8. Определим среднюю температуру остывания бетона. Расчетную конечную температуру для добавки 6,06 % поташ принимаем $t_{б.к} = t_{н.в} = -17{,}8$ °С.

$$t_{б.ср} = t_{б.к} + \frac{t'_{б.н} - t_{б.к}}{1{,}03 + 0{,}181 \cdot \text{М}_п + 0{,}006(t'_{б.н} - t_{б.к})};$$

$$t_{б.ср} = -17{,}8 + \frac{6{,}28 - (-17{,}8)}{1{,}03 + 0{,}181 \cdot 5{,}95 + 0{,}006(6{,}28 - (-17{,}8))} = -7{,}1 \text{ °С}.$$

9. Пренебрегая тепловыделением цемента (экзотермия), определим время остывания бетона по формуле Б.Г. Скрамтаева:

$$\tau_о = \frac{C_б \cdot \gamma_б \left(t'_{б.н} - t_{б.к}\right)}{86{,}4 \cdot K_т \cdot \text{М}_п \left(t_{б.ср} - t_{н.в}\right)},$$

где $K_т$ – коэффициент теплопередачи опалубки, зависит от конструкции опалубки и скорости ветра (табл. П.4.4);

$$\tau_{ост} = \frac{1{,}05 \cdot 2400\left(6{,}28 - (-17{,}8)\right)}{86{,}4 \cdot 1{,}07 \cdot 5{,}95\left(-7{,}1 - (-17{,}8)\right)} = 10{,}3 \text{ сут}.$$

10. Определим прочность, которую наберет бетон за время остывания $\tau_{ост} = 10{,}3$ сут и при средней температуре остывания бетона $t_{б.ср} = -7{,}1$ °С. По табл. 26 для бетона марки М200 (В15) на портландцементе М400 бетон набирает 50,93 % от R_{28}.

5. ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРЕВНЫХ МЕТОДОВ ВЫДЕРЖИВАНИЯ БЕТОНА

5.1. Электропрогрев (электродный прогрев) бетонной смеси

Область применения

Областью применения электродного прогрева монолитных конструкций являются монолитные бетонные и малоармированные конструкции. Применение этого метода наиболее эффективно для фундаментов, колонн, стен и перегородок, плоских перекрытий, бетонных подготовок под полы с модулем поверхности $М_п$ = от 5 до 20 $м^{-1}$.

В зависимости от принятой схемы расстановки и подключения электродов электродный прогрев разделяется на сквозной, периферийный и с использованием в качестве электродов арматуры.

Сущность метода

Электродный прогрев – это наиболее эффективный и распространенный способ термообработки. Он основан на использовании тепла, выделяющегося в бетоне при прохождении по нему электрического тока. Достигается это путем включения свежеуложенной бетонной смеси как сопротивления в цепь переменного тока промышленной частоты с помощью металлических электродов различной конструкции и схем расположения. Благодаря использованию переменного тока явления электролиза в цементном тесте в процессе прогрева практически не происходит.

В целях экономии стали стремятся к расположению электродов на наружной поверхности прогреваемой конструкции, что позволяет снять их после окончания прогрева, в случае же внутренней установки электродов расход стали должен быть

минимальным. Использование в качестве электродов арматуры прогреваемой конструкции, как правило, не рекомендуется, так как это приводит к увеличению потребляемой электрической мощности, искажению электрического, а следовательно, и температурного поля в бетоне, пересушиванию примыкающих к электродам слоев бетона и, как следствие, к уменьшению сцепления арматуры с бетоном.

5.1.1. Методика расчета электропрогрева (электродного прогрева) бетонной смеси

Интенсивность и количество выделяемой тепловой энергии при прохождении тока зависят от электрической мощности, напряжения и электрического сопротивления бетона. При твердении бетона, сопровождающемся уменьшением количества жидкой компоненты смеси, в результате взаимодействия воды с минералами цемента и частичного ее испарения, удельное электрическое сопротивление бетона ρ меняется в течение первых 2–5 ч. Оно снижается до минимальной величины, а затем начинает возрастать, поэтому напряжение изменяют ступенями с помощью понизительных трансформаторов для сохранения необходимых токовых нагрузок и поддержания режимов прогрева.

Образующаяся теплота расходуется на нагрев бетона и опалубки до заданной температуры и возмещение теплопотерь в окружающую среду, происходящих в процессе выдерживания. Температура бетона при электропрогреве определяется величиной выделяемой в бетоне электрической энергии, которая должна назначаться в зависимости от выбранного режима термообработки и величины теплопотерь, имеющих место при электропрогреве на морозе.

Энергия, требуемая для разогрева конструкции с заданной скоростью, складывается из энергии на разогрев бетона, разогрев опалубки и для возмещения теплопотерь. Учитывая экзо-

термическое тепловыделение, которому эквивалентна некоторая энергия, баланс энергий можно записать в виде

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P_5,$$

где P – требуемая энергия для разогрева конструкции, кВт; P_1 – энергия на разогрев бетона, кВт; P_2 – энергия на разогрев опалубки, кВт; P_3 – мощность на нагрев арматуры, кВт/м^3; P_4 – энергия на восполнение теплопотерь в окружающую среду, кВт; P_5 – энергия, эквивалентная экзотермическому тепловыделению, кВт.

Удельная энергия, требуемая для разогрева 1 м^3 бетона от начальной температуры $t_{б.н}$ до t_{max} в течение $\tau_р$, т. е. со скоростью разогрева $(t_{max} - t_{б.н})\cdot\tau_р$, составит:

$$P_1 = \frac{C_б \cdot \gamma_б \left(t_{max} - t_{б.н}\right)}{3600 \cdot \tau_р} = \frac{C_б \cdot \gamma_б \cdot V_р}{3600},$$

где $C_б$ – удельная теплоемкость бетона, кДж/(кг·°С); $\gamma_б$ – плотность бетона, кг/м^3; $V_р$ – скорость разогрева, °С/ч.

Если приближенно считать, что за время $\tau_р$ температура опалубки поднимается на $(t_{max}/2) - t_{н.в}$, то

$$P_2 = \frac{C_{оп} \cdot \gamma_{оп} \cdot \mathrm{M}_п \cdot \delta_{оп}}{3600 \cdot \tau_р}\left(\frac{t_{max}}{2} - t_{н.в}\right),$$

где $C_{оп}$, $\gamma_{оп}$ и $\delta_{оп}$ – соответственно, теплоемкость, удельная масса материала опалубки и ее толщина; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха, °С. Удельная мощность, требуемая на нагрев арматуры, составит:

$$P_3 = \frac{C_а \cdot \mathrm{P}_а \cdot V_р}{3600},$$

где $C_а$ – удельная теплоемкость арматуры, кДж/(кг·°С); $\mathrm{P}_а$ – расход арматуры, кг/м^3.

Удельная энергия, требуемая на возмещение теплопотерь за время $\tau_р$, в среднем составит:

$$P_4 = \frac{K_т \cdot М_п}{1000}\left(\frac{t_{max} \cdot t_{б.н}}{2} - t_{н.в}\right).$$

Удельную энергию P_5, соответствующую интенсивности тепловыделения при твердении цемента, усредненно принимают равной 0,8 кВт/м^3.

Удельная энергия $P_{из}$, потребная на период изотермического прогрева, равна:

$$P_{из} = P_{3из} - P_{4из},$$

где $P_{3из}$ – удельная энергия, затрачиваемая на возмещение теплопотерь при изотермическом прогреве;

$$P_{3из} = \frac{K_т \cdot М_п \left(t_{из} - t_{н.в}\right)}{1000},$$

где $t_{из}$ – температура изотермического прогрева, равная обычно t_{max}; $P_{4из}$ – удельная энергия, соответствующая интенсивности тепловыделения при твердении цемента, усредненно принимают равной 0,2 кВт/м^3.

При расчете электродного прогрева бетона в качестве расчетного параметра $\rho_{расч}$ (Ом·см) принимают полусумму величин начального и минимального удельного электрического сопротивления:

$$\rho_{расч} = \frac{\rho_{нач} + \rho_{min}}{2}.$$

В предварительных расчетах, если $\rho_{нач}$ известно, принимают: $\rho_{расч} = 0{,}85\rho_{нач}$ (для тяжелых бетонов) и $\rho_{расч} = 0{,}8\rho_{нач}$ (для легких бетонов). При достижении бетоном 50–60 % от проектной прочности прогрев без увлажнения становится нецелесообразным, так как это связано с большим расходом электроэнергии из-за резкого увеличения сопротивления.

Ниже представлены графики расчета электропрогрева и схемы размещения электродов при термообработке различных конструкций. Графики позволяют:

– по заданному напряжению на электродах U, расстоянию между разноименными электродами b и известному (определенному экспериментальным путем) удельному электрическому сопротивлению ρ найти величину электрической мощности P;

– по заданным величинам электрической мощности P и напряжению U, по известному удельному сопротивлению ρ найти необходимое расстояние между разноименными электродами b;

– по заданным величинам электрической мощности P и расстоянию между разноименными электродами b, по известному удельному сопротивлению ρ найти требуемое напряжение U.

Пример. Определить прочность бетона класса В25 в конструкции с $М_п$ = 4 на портландцементе марки 400 при скорости подъема температуры 10 °С в час, температуре изотермического прогрева 70 °С, его продолжительности 12 ч и остывании со скоростью 5 °С в час до конечной температуры 8 °С.

Решение:

Кривые набора прочности бетоном класса В25 при различных температурах его выдерживания представлены на рис. 20.

1. Определить величину относительной прочности за период подъема температуры:

– при продолжительности подъема температуры $\frac{70-10}{10}=6$ ч;

– при средней температуре $\frac{70+10}{2}=40$ °С.

Для этого из точки А (рис. 21) проводим перпендикуляр до пересечения с кривой прочности при 40 °С (точка Б).

Величина прочности за время подъема температуры определяется проекцией точки Б на ось ординат (точка В) и составляет 15 %.

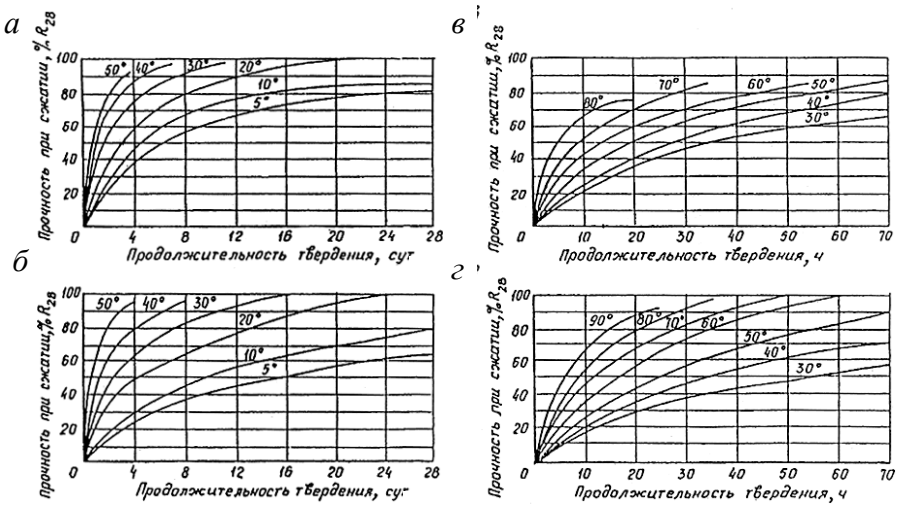


Рис. 20. Кривые набора прочности бетоном при различных температурах его выдерживания:

а, *в* – для бетона класса В25 на портландцементе активностью 400–500; *б*, *г* – для бетона класса В25 на шлакопортландцементе активностью 300–400

Определяем прирост относительной прочности при изотермическом прогреве за 12 ч как проекцию участка (точки Л и К) кривой прочности при 70 °С (отрезок В-3), что соответствует 46 % от R_{28}.

Определяем прирост прочности бетона за 12 ч остывания по кривой прочности при 38 °С как проекцию участка ЖГ на ось ординат. Отрезок ЗИ соответствует 9 % от R_{28}.

За весь цикл термообработки бетон приобретает прочность 15 + 46 + 9 = 70 % от R_{28}.

Для каждого конкретного состава бетона строительной лабораторией должен быть уточнен на опытных образцах-кубах оптимальный режим выдерживания.

Пример определения прочности по графику приведен на рис. 21.

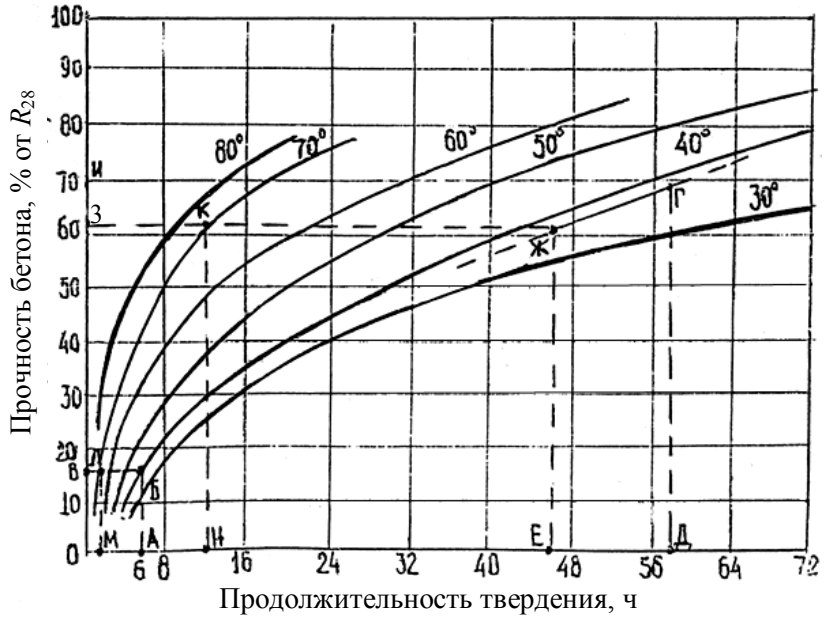


Рис. 21. Пример определения прочности бетона по графику

В зависимости от расположения электродов и места прохождения электрического тока прогрев подразделяют на *сквозной* и *периферийный.* При сквозном прогреве ток протекает через всю массу бетона, и тепловая энергия выделяется в теле конструкции. В случае периферийного прогрева ток протекает через бетон между электродами, установленными по наружной поверхности конструкции. Бетон прогревается при передаче тепловой энергии от периферии вовнутрь конструкции, а также за счет экзотермии цемента.

Для осуществления электропрогрева бетона применяют пластинчатые, полосовые (ленточные), стержневые, струнные, а также кольцевые типы электродов.

В табл. 42 приведены виды электродов, применяемые для элетропрогрева бетонных конструкций, и область их применения.

Таблица 42

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

По месту установки электроды подразделяют на *внутренние* и *поверхностные.* Внутренние электроды, оставляемые в бетоне после прогрева, подразделяются на стержневые, струнные и плавающие.

Стержневые электроды представляют собой короткие стержни из круглой стали диаметром 6–12 мм, располагаемые в теле бетона перпендикулярно поверхности конструкции непосредственно через открытые поверхности или через отверстия, просверленные в опалубке. Для удобства присоединения электропроводов электроды выпускают из опалубки на 8–15 см. Стержневые электроды применяют при прогреве любых конструкций, особенно сложной конфигурации, со значительной толщиной (в этих случаях применять полосовые или пластинчатые электроды не представляется возможным). Наиболее целесообразно применять стержневые электроды в виде плоских электродных групп, обеспечивающих достаточную равномерность температурного поля.

Чем меньше расстояние между одноименными электродами в плоской группе, тем равномернее температурное поле, но больше расход металла на электроды, больше и трудоемкость их установки и подключения. При прогреве конструкций с весьма густой арматурой, когда невозможно использовать плоские группы, применяют одиночные стержневые электроды, размещаемые в шахматном порядке на равных расстояниях. Однако такое размещение приводит к значительной неравномерности распределения температурного поля в бетоне.

Недостатком стержневых электродов является то, что после прогрева электроды остаются в бетоне, т. е. появляются безвозвратные потери металла. К стержневым относятся и так называемые плавающие электроды – стальные прутки, располагаемые на глубине 3–4 см в бетоне конструкций малой толщины – подливок, подготовок и т. п., либо при периферийном прогреве верхних неопалубленных поверхностей массивных конструкций.

Расчет прогрева конструкций с использованием стержневых и плавающих электродов производится по графикам, приводимым в специальной справочной литературе.

Струнные электроды имеют вид струн длиной 2,5–3,5 м, выполненных из арматурной стали диаметром 12–16 мм. Устанавливают их в конструкции и натягивают перед бетонированием параллельно продольной оси конструкции отдельными звеньями, а концы выводят наружу.

Электроды подключают к разным фазам электрической цепи после укладки бетонной смеси.

При прогреве конструкций прямоугольного сечения с четырьмя продольными арматурными стержнями в углах, струнный электрод, устанавливаемый по оси конструкции, подключают к одной фазе, а арматурный каркас – к другой. Струнные электроды применяют для прогрева протяженных бетонных конструкций (колонны, балки, прогоны и др.), длина которых во много раз больше размеров их поперечного сечения.

При установке электродов тщательно следят за тем, чтобы не допускать их смещения и соприкосновения с арматурой, так как при соприкосновении электродов разных фаз произойдет короткое замыкание. Открытые поверхности по окончании бетонирования и установки электродов укрывают изоляционными материалами, поскольку прогрев бетона с не укрытыми поверхностями не допускается. Способ установки электродов и расстояния между ними указываются в проекте. Расчет прогрева можно производить по графикам, приводимым в специальной технической литературе.

Поверхностные электроды, снимаемые после прогрева бетона конструкций, подразделяют на пластинчатые и полосовые.

Пластинчатые электроды представляют собой пластины, которые располагают снаружи бетона на двух противоположных плоскостях прогреваемой конструкции. Расстояние между ними не должно превышать 40 см. Изготавливают пластинчатые элек-

троды из стали толщиной 3–4 мм. Крепят электроды к опалубке, которую в месте их установки изолируют. В качестве электродов разрешается использовать металлические щиты опалубки. Пластинчатые электроды используют для прогрева неармированных конструкций, а также конструкций с негустой арматурой – колонн, стен, перегородок и т. п.

Полосовые электроды также располагают снаружи бетона прогреваемой конструкции, что позволяет исключить бросовые расходы металла. Изготавливают электроды шириной 2–5 см из кровельной или полосовой стали толщиной 1–2 мм. Крепят их к деревянной опалубке на определенном расстоянии друг от друга. Электрический ток проходит между соседними разноименными электродами, главным образом в периферийном слое бетона, толщина которого составляет около половины расстояния между соседними электродами.

Периферийный прогрев конструкций толщиной менее 30 см, как правило, осуществляют полосовыми электродами с односторонним расположением при негустой арматуре: при толщине от 30 до 80 см (ленточные фундаменты, колонны, балки, перекрытия) – полосовыми электродами с двусторонним размещением, а более массивных – с размещением на всех поверхностях конструкций.

Виды электродов, схемы их расстановки и формулы расчета выделяемой удельной мощности представлены в табл. 43.

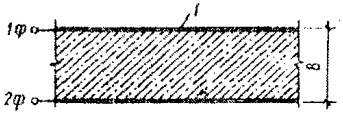
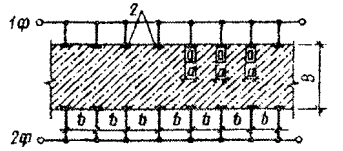
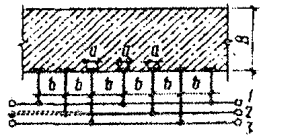
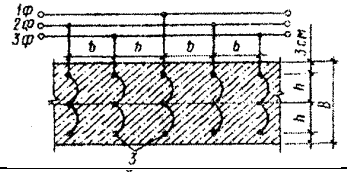
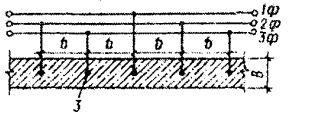
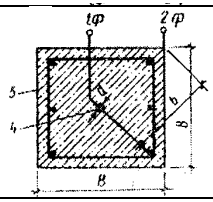
При периферийном прогреве массивных конструкций с расположением электродов по периметру соблюдают следующие дополнительные условия:

– температура периферийных слоев бетона не должна превышать температуру в ядре конструкции;

– температурные градиенты в сечении не должны превышать 0,15 °С/см. При распалубливании этих конструкций учитывают перепады температур между ядром и поверхностью, а также между поверхностью и наружным воздухом.

Таблица 43

Виды электродов, схемы их расстановки и формулы расчета выделяемой удельной мощности

№ п/п	Электроды	Схема расстановки электродов и подключения к электрической сети	Формула расчета выделяемой удельной мощности, кВт/м^3
1	Пластинчатые		$P = \dfrac{U^2 \cdot 10^{-3}}{B^2 \cdot \rho_{\text{расч}}}$
2	Полосовые (сквозной прогрев)		$P = \dfrac{10^{-3} \cdot U^2}{B^2 \cdot \rho_{\text{расч}} \left(1 + \dfrac{\alpha \cdot b}{\pi \cdot B} \ln \dfrac{b}{2 \cdot a}\right)}$
3	Полосовые (периферийный прогрев)		$P = \dfrac{1{,}57 \cdot 10^{-3} \cdot U^2}{\rho_{\text{расч}} \cdot B \cdot b \left(\alpha \ln \dfrac{4 \cdot B}{\pi \cdot a} + \dfrac{\pi \cdot b}{2 \cdot B}\right)}$
4	Стержневые (в виде плоских групп)		$P = \dfrac{3{,}14 \cdot 10^{-3} \cdot U^2}{\rho_{\text{расч}} \cdot b \cdot h \left(\alpha \ln \dfrac{h}{\pi \cdot d} + \dfrac{\pi \cdot b}{h}\right)}$
5	Одиночные стержневые		$P = \dfrac{3{,}14 \cdot 10^{-3} \cdot U^2}{\rho_{\text{расч}} \cdot h \cdot B \left(\alpha \ln \dfrac{B}{\pi \cdot d} + \dfrac{\pi \cdot b}{B}\right)}$
6	Струнные		$P = \dfrac{6{,}28 \cdot 10^{-3} \cdot U^2}{\rho_{\text{расч}} \cdot B^2 \cdot \ln \dfrac{b}{a}}$

Примечание. $\rho_{\text{расч}}$ – расчетное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м; α – коэффициент при электропрогреве, равный 2/3 при трехфазном и 2 – при однофазном токе.

С целью экономии металла для сквозного прогрева бетона применяют полосовые электроды с двусторонним расположением вместо пластинчатых.

Выдерживание температуры бетона, в соответствии с заданным режимом электротермообработки, осуществляют следующими способами:

– изменением величины напряжения, подводимого к электродам;

– периодическим включением и отключением напряжения на электродах;

– отключением электродов от сети по окончании подъема температуры.

Выдерживание заданного режима может осуществляться автоматически и вручную. Во всех случаях температура бетона является основным параметром, по которому регулируются подача электроэнергии и заданный режим.

Электродный прогрев армированных конструкций производят при пониженных напряжениях тока – 50–127 В, что позволяет обеспечить более точное соблюдение заданного режима выдерживания бетона. Использование напряжения 220 В и максимально допустимого – 380 В разрешается для прогрева неармированного бетона конструкций при наличии надежного ограждения, установленного на расстоянии не менее 5 м от прогреваемой конструкции. В сырую погоду и во время оттаивания любые виды электропрогрева прекращают.

Область применения электродного прогрева ограничена трудностью обеспечения равномерного температурного поля в густоармированных конструкциях, конструкциях с большим количеством закладных деталей, стыков толщиной менее 50 мм и в случае применения металлической опалубки.

Для подведения электрической энергии к бетону используют различные электроды (пластинчатые, полосовые, стержневые и струнные). К конструкции электродов и схеме их установки предъявляются следующие требования:

– мощность электропрогрева должна соответствовать мощности, требуемой по тепловому расчету;

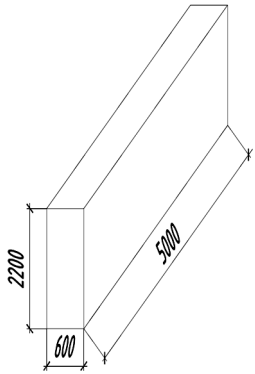
– электрические и температурные поля по сечению конструкции должны быть по возможности равномерными;

– электроды желательно располагать снаружи прогреваемой конструкции с целью обеспечения минимального расхода металла;

– установку электродов нужно производить до начала бетонирования (при использовании наружных электродов);

– расход стали на электроды должен быть минимальным.

5.1.2. Пример расчета электропрогрева (электродного прогрева) бетонной смеси



Исходные данные:

Город	г. Чара
Месяц	январь
Температура изотермическая	$t_{из} = +40$ °С
Время перевозки	$\tau_{тр} = 8$ мин
Высота подъема краном	$H_{под} = 12$ м
Марка автомобиля	МАЗ-503
Время укладки	$\tau_{у} = 10$ мин
Тип опалубки	V
Класс бетона	В15
Расход цемента	Ц = 350 кг/м^3
Марка цемента	М400
Расход арматуры	$Р_а = 70$ кг/м^3
Температура бетона конечная	$t_{б.к} = +5$ °С
Температура бетона начальная	$t_{б.н} = +5$ °С

Решение:

1. Определим объем бетона в конструкции:

$$V_б = 5 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}6 = 6{,}6 \text{ м}^3.$$

2. Рассчитаем поверхность охлаждения конструкции:

$$F_{\text{охл}} = 2 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}6 + 2 \cdot 5 \cdot 2{,}2 + 5 \cdot 0{,}6 = 27{,}64 \text{ м}^2.$$

3. Определим модуль поверхности конструкции:

$$\text{М}_{\text{п}} = \frac{F_{\text{охл}}}{V_{\text{б}}} = \frac{27{,}64}{6{,}6} = 4{,}19 \text{ м}^{-1}.$$

4. Определим суммарное относительное снижение температуры бетонной смеси при всех операциях: при транспортировании, перегрузке, укладке и уплотнении.

4.1. При транспортировании

$$\Delta t_{\text{тр}} = \Delta t'_{\text{тр}} \cdot \tau_{\text{тр}} = 0{,}0025 \cdot 8 = 0{,}02 \text{ °С/°С},$$

где $\Delta t'_{\text{тр}}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при транспортировке (табл. П.4.1).

4.2. При перемещении краном:

$$\Delta t_{\text{пер}} = 0{,}0022 \cdot H_{\text{под}} = 0{,}0022 \cdot 12 = 0{,}0264 \text{ °С/°С}.$$

4.3. При перегрузке и погрузке

$$\Delta t_{\text{п}} = 0{,}032 \text{ °С/°С}.$$

4.4. При укладке и уплотнении

$$\Delta t_{\text{у}} = \Delta t'_{\text{у}} \cdot \tau_{\text{у}} = 0{,}007 \cdot 10 = 0{,}07 \text{ °С/°С},$$

где $\Delta t'_{\text{у}}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при уплотнении и укладке (табл. П.4.2).

4.5. Определим суммарное относительное снижение температуры:

$$\sum \Delta t_{\text{тр}} = \Delta t_{\text{тр}} + \Delta t_{\text{пер}} + \Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{у}} =$$
$$0{,}02 + 0{,}0264 + 0{,}032 + 0{,}07 = 0{,}1484 \text{ °С/°С}.$$

5. Определим начальную среднюю температуру бетонной смеси после укладки в опалубку, уплотнения и укрытия:

$$t_{\text{см}} = \frac{\left(t_{\text{б.н}} - t_{\text{н.в}} \sum \Delta t_{\text{тр}}\right)}{1 - \sum \Delta t_{\text{тр}}},$$

где $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона начальная, °С; $t_{\text{см}}$ – бетонной смеси при выходе из транспортного средства, °С; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С (табл. П.4.3).

$$t_{\text{см}} = \frac{\left(5 - (-33,8)0,1484\right)}{1 - 0,1484} = 11,78 \text{ °С}; \quad t_{\text{см}} \approx 12 \text{ °С}.$$

6. Определим время подъема температуры:

$$\tau_{\text{р}} = \frac{t_{\max} - t_{\text{б.н}}}{V_{\text{р}}} = \frac{40 - 5}{8} = 4,38 \text{ ч},$$

где $V_{\text{р}}$ – скорость подъема температуры, °С/ч; $\tau_{\text{р}} = 0,18$ сут.

7. Определим среднюю температуру бетона за период подъема:

$$t_{\text{р}}^{\text{ср}} = \frac{t_{\text{из}} + t_{\text{б.н}}}{2} = \frac{40 + 5}{2} = 22,5 \text{ °С}.$$

8. За время подъема температуры 4,38 ч, при средней температуре подъема 22,5 °С, определяем, что бетон наберет 10 % от R_{28}.

9. Определим среднюю температуру остывания бетона:

$$t_{\text{б.ср}} = t_{\text{б.к}} + \frac{t_{\text{из}} - t_{\text{б.к}}}{1,03 + 0,181 \cdot \text{М}_{\text{п}} + 0,006\,(t_{\text{из}} - t_{\text{б.к}})} =$$

$$= 5 + \frac{40 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 4,19 + 0,006(40 - 5)} = 22,5 \text{ °С}.$$

10. Пренебрегая тепловыделением цемента (экзотермия), определим время остывания бетона по формуле Б.Г. Скрамтаева:

$$\tau_{ост} = \frac{C_б \cdot \gamma_б \left(t_{из} - t_{б.к}\right)}{3,6 \cdot K_т \cdot \text{М}_п \left(t_{б.ср} - t_{н.в}\right)} = \frac{1,05 \cdot 2400(40-5)}{3,6 \cdot 1,07 \cdot 4,19(22,5-(-33,8))} = 97 \text{ ч};$$

$$\tau_{ост} = 4,05 \text{ сут},$$

где $K_т$ – коэффициент теплопередачи опалубки зависит от конструкции опалубки и скорости ветра (табл. П.4.4).

11. Определим прочность, которую наберет бетон за время остывания, $\tau_{ост} = 97$ ч и средней температуры остывания бетона $t_{б.ср} = 22,5$ °С. По номограмме рис. П.4.1 для бетона марки М200 (В15) на портландцементе М400 бетон набирает 35 % от R_{28}.

12. По той же номограмме определим время изотермического прогрева $\tau_{из} = 0,67$ сут. = 16 ч, за которое бетон набирает 25 % от R_{28}, оставшиеся от 70 %.

13. Определим требуемую удельную мощность в период подъема температуры (табл. 44–46):

$$P_р^{уд} = 5,315 \text{ кВт/м}^3.$$

14. Определим требуемую удельную мощность в период изотермического прогрева бетона (табл. 47–49):

$$P_{из}^{уд} = 0,388 \text{ кВт/м}^3.$$

15. Определим мощность установки на период подъема температуры с учетом сменного потока бетона:

$$P_р = P_р^{уд} \cdot V_б = 5,315 \cdot 6,6 = 35,08 \text{ кВт},$$

где $V_б$ – объем бетона в конструкции, м^3.

Принимаем трансформатор мощностью 50 кВт типа ТМОА-50. Напряжение на выходе данного трансформатора 49, 60, 70, 85, 103, 121 В определяется по табл. П.4.6.

16. Расход электрической энергии

$$W = P_р^{уд} \cdot \tau_р + P_{из}^{уд} \cdot \tau_{из} = 5,315 \cdot 4,38 + 0,388 \cdot 16 = 29,49 \text{ кВт·ч/м}^3.$$

Таблица 44

Требуемая удельная тепловая мощность в период подъёма температуры бетона в деревянной опалубке толщиной 40 мм

Температура наружного воздуха, °С	Скорость подъёма температуры бетона, °С/ч	Мощность, кВт/м^3, при модуле поверхности														
		4			6			10			15			20		
		Температура изотермического прогрева, °С														
		40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0	5	3,33	3,61	3,9	3,61	4,05	1,48	4,19	4,91	5,69	4,86	5,99	7,07	6,63	7,07	8,51
	10	6,88	7,16	7,45	7,16	7,6	8,03	7,74	8,46	9,18	8,46	9,54	10,62	9,18	10,62	12,06
	15	10,43	10,71	11	10,71	11,15	11,58	11,29	12,01	12,71	12,01	13,09	14,17	12,73	14,17	15,61
	20	13,98	14,26	14,55	12,26	14,7	15,13	14,84	15,56	16,28	15,56	16,64	17,72	16,28	17,72	19,16
–10	5	3,47	3,76	4,05	3,83	4,26	4,69	4,55	5,27	5,99	5,45	6,53	7,61	6,35	7,79	9,23
	10	7,02	7,31	7,6	7,38	7,81	8,24	8,1	8,82	9,54	9	10,08	11,16	9,9	11,34	12,78
	15	10,57	10,86	10,15	10,93	11,36	11,79	11,35	12,37	13,09	12,55	13,63	14,71	13,45	14,89	16,53
	20	14,12	14,41	14,7	14,48	14,91	15,34	15,2	15,98	16,64	16,1	17,18	18,26	17	18,44	19,88

Окончание табл. 44

Температура наружного воздуха, °С	Скорость подъёма температуры бетона, °С/ч	Мощность, кВт/м^3, при модуле поверхности														
		4			6			10			15			20		
		Температура изотермического прогрева, °С														
		40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
–20	5	3,61	3,9	4,19	4,05	4,48	4,91	4,91	5,63	6,35	5,99	7,07	8,15	7,07	8,51	9,95
	10	7,16	7,45	7,74	7,6	9,03	8,46	8,46	9,18	9,9	9,54	10,62	11,7	10,62	12,06	13,5
	15	10,71	11	11,29	11,15	11,58	12,01	12,01	12,71	13,45	13,09	14,17	15,25	14,17	15,61	17,05
	20	14,26	14,55	14,84	14,7	15,13	15,56	15,56	16,28	17	16,4	17,72	18,8	17,72	19,16	20,6
–30	5	3,76	4,05	4,33	4,26	4,69	5,13	5,27	5,99	6,71	6,53	7,61	8,69	7,79	9,23	10,67
	10	7,34	7,6	7,88	7,81	8,24	8,68	8,82	9,54	10,26	10,08	11,16	12,24	11,34	12,78	14,22
	15	10,86	11,15	11,43	11,36	11,79	12,23	12,37	13,09	13,81	13,63	14,71	15,79	14,89	16,33	17,77
	20	14,44	14,7	14,98	14,91	15,34	15,78	15,92	16,64	17,36	17,18	18,26	19,34	18,44	19,88	21,32
–40	5	3,9	4,19	4,48	4,48	4,91	5,34	5,63	6,35	7,07	7,07	8,15	9,23	8,51	9,95	10,39
	10	7,45	7,74	8,03	8,03	8,46	8,89	9,18	9,9	10,62	10,62	11,7	12,78	12,06	13,5	14,94
	15	11	11,29	11,58	11,58	12,01	12,44	12,73	13,45	14,17	14,17	15,22	16,33	15,61	17,05	18,49
	20	14,45	14,84	15,13	15,13	15,56	15,99	16,28	17	17,72	17,72	18,8	20,28	19,16	20,6	21,04

Таблица 45

Требуемая удельная тепловая мощность в период подъёма температуры бетона в деревянной опалубке толщиной 25 мм

Температура наружного воздуха, °С	Скорость подъёма температуры бетона, °С/ч	Мощность, кВт/м^3, при модуле поверхности														
		4			6			10			15			20		
		Температура изотермического прогрева, °С														
		40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0	5	3,6	3,98	4,4	3,98	4,61	5,23	4,82	5,86	6,91	5,86	7,43	8,99	6,91	8,99	11,08
	10	7,1	7,52	7,94	7,52	8,16	8,77	8,36	9,4	10,45	9,4	10,97	12,53	10,45	12,53	14,62
	15	10,63	11,05	11,47	11,05	11,68	12,3	11,89	12,93	13,98	12,93	14,5	16,06	13,98	16,06	18,15
	20	14,17	14,59	15	14,59	15,22	15,83	15,43	16,47	17,52	16,47	18,04	19,6	17,52	19,6	21,69
–10	5	3,77	4,17	4,61	4,3	4,93	5,55	5,34	6,38	7,43	6,64	8,21	9,77	7,95	10,04	12,12
	10	7,32	7,74	8,16	7,85	8,48	9,1	8,89	9,93	10,98	10,19	11,76	13,32	11,5	13,59	15,67
	15	10,84	11,26	11,68	11,57	12	12,62	12,41	13,45	14,5	13,71	15,28	16,84	15,02	17,11	19,19
	20	14,38	14,8	15,22	14,91	15,54	16,16	15,95	16,99	17,74	17,25	18,82	20,38	18,58	20,65	22,73

Окончание табл. 45

Температура наружного воздуха, °С	Скорость подъёма температуры бетона, °С/ч	Мощность, кВт/м^3, при модуле поверхности														
		4			6			10			15			20		
		Температура изотермического прогрева, °С														
		40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
–20	5	3,98	4,4	4,82	4,61	5,23	5,84	5,84	6,91	7,95	7,43	8,99	10,56	8,99	11,08	13,17
	10	7,53	7,95	8,37	8,16	8,78	9,41	9,41	10,46	11,5	10,98	12,54	14,1	12,54	14,63	16,72
	15	11,05	11,47	11,89	11,68	12,3	12,93	12,93	13,98	15,02	15,5	16,06	17,63	16,06	18,15	20,24
	20	14,59	15	15,43	15,22	15,84	16,47	16,47	17,52	18,56	18,04	19,6	21,17	19,6	21,69	23,78
–30	5	4,19	4,61	5,03	4,93	5,55	6,17	6,38	7,43	8,47	7,21	9,77	11,34	10,04	12,12	14,21
	10	7,73	8,16	8,58	8,48	9,1	9,72	9,93	10,98	12,02	11,76	13,32	14,89	14,89	15,67	17,76
	15	11,26	11,68	12,1	12	12,62	13,24	13,45	14,5	15,54	15,28	16,84	18,41	17,11	19,19	20,28
	20	14,8	15,21	15,67	15,57	15,16	16,78	16,99	18,04	18,82	18,82	20,38	21,95	20,65	22,73	24,82
–40	5	4,4	4,81	5,23	5,23	5,68	6,49	6,91	7,95	8,99	8,99	10,56	12,13	11,08	13,17	15,26
	10	7,95	8,37	8,78	8,78	9,41	10,04	10,46	11,5	12,54	12,54	14,11	15,68	14,63	16,72	18,81
	15	11,47	11,89	12,3	12,3	12,93	13,56	13,98	15,02	16,06	16,06	17,63	19,2	18,15	20,24	22,33
	20	15	15,43	15,84	15,84	16,37	17,1	17,52	18,56	19,6	19,6	21,17	22,74	21,69	23,78	25,84

Таблица 46

Требуемая удельная тепловая мощность в период подъёма температуры бетона в металлической опалубке толщиной 3 мм с утеплением минеральной ватой толщиной 50 мм и защитным слоем толщиной 4 мм

Температура наружного воздуха, °С	Скорость подъёма температуры бетона, °С/ч	Мощность, кВт/м^3, при модуле поверхности														
		4			6			10			15			20		
		Температура изотермического прогрева, °С														
		40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0	5	2,93	3,03	3,13	3,03	3,18	3,33	3,23	3,49	3,74	3,49	3,87	4,26	3,74	4,25	4,77
	10	6,46	6,56	6,66	6,56	6,71	6,86	6,76	7,02	7,27	7,02	7,4	7,79	7,27	7,78	8,3
	15	9,98	10,08	10,18	10,08	10,23	10,38	10,28	10,54	10,79	10,54	10,92	11,31	10,79	11,3	11,82
	20	13,51	13,61	13,71	13,61	13,76	13,91	13,81	14,07	14,32	14,07	14,45	14,84	14,32	14,83	15,35
–10	5	2,98	3,08	3,18	3,1	3,26	3,41	3,36	3,62	3,97	3,68	4,06	4,45	4	4,51	5,02
	10	6,51	6,61	6,71	6,63	6,79	6,94	6,89	7,15	7,4	7,21	7,59	7,98	7,53	8,04	8,55
	15	10,03	10,13	10,23	10,15	10,31	10,46	10,41	10,67	10,92	10,73	11,11	11,5	11,05	11,56	12,07
	20	13,56	13,66	13,76	13,68	13,84	13,99	13,94	14,2	14,45	14,26	14,64	15,03	14,58	15,09	15,6

Окончание табл. 46

Температура наружного воздуха, °С	Скорость подъёма температуры бетона, °С/ч	Мощность, кВт/м^3, при модуле поверхности														
		4			6			10			15			20		
		Температура изотермического прогрева, °С														
		40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
–20	5	3,03	3,13	3,23	3,18	3,33	3,49	3,49	3,74	4	3,87	4,26	4,64	4,25	4,77	5,28
	10	6,56	6,66	6,76	6,71	6,86	7,02	7,02	7,27	7,53	7,4	7,79	8,17	7,78	8,3	8,81
	15	10,08	10,18	10,28	10,23	10,38	10,54	10,54	10,79	11,05	10,92	11,31	11,69	11,3	11,82	12,33
	20	13,61	13,71	13,81	13,76	13,91	14,07	14,32	14,58	14,45	14,84	15,22	14,83	15,35	15,86	15,92
–30	5	3,08	3,18	3,28	3,26	3,41	3,56	3,62	3,87	4,13	4,06	4,45	4,83	4,51	5,02	5,54
	10	6,61	6,71	6,81	6,79	6,94	7,09	7,15	7,4	7,66	7,59	7,98	8,36	9,04	8,55	9,07
	15	10,13	10,23	10,33	10,31	10,46	10,61	10,67	10,92	11,18	11,11	11,5	11,88	11,56	12,07	12,59
	20	13,66	13,76	13,86	13,74	13,99	14,14	14,2	14,45	14,71	14,64	15,09	15,41	15,09	15,5	16,12
–40	5	3,13	3,23	3,33	3,33	3,49	3,64	3,74	4	4,26	4,26	4,64	5,02	4,79	5,26	5,79
	10	6,66	6,76	6,86	6,86	7,02	7,17	7,27	7,53	7,79	7,79	8,17	8,55	8,3	8,81	9,32
	15	10,18	10,28	10,38	10,38	10,54	10,69	10,79	11,05	11,31	11,31	11,69	12,07	11,82	12,33	12,84
	20	13,71	13,81	13,91	13,91	14,07	14,22	14,32	14,58	14,84	14,84	15,22	15,6	15,35	15,86	16,37

Таблица 47

Удельная тепловая мощность в период изотермического прогрева бетона в деревянной опалубке толщиной 40 мм

Температура наружного воздуха, °С	Мощность, кВт/м^3, при модуле поверхности														
	4			6			10			15			20		
	Температура изотермического прогрева, °С														
	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0	0,58	1,86	1,15	0,86	1,3	1,73	1,44	2,16	2,88	2,16	3,24	4,32	2,88	4,32	5,76
–10	0,72	1,01	1,3	1,08	1,51	1,94	1,8	2,52	3,24	2,7	3,78	4,86	3,6	5,04	6,48
–20	0,86	1,15	1,44	1,3	1,73	2,16	2,16	2,88	3,6	3,24	4,32	5,4	4,32	5,76	7,2
–30	1,01	1,3	1,58	1,51	1,94	2,38	2,52	3,24	3,96	3,78	4,86	5,94	5,04	6,48	7,92
–40	1,15	1,44	1,73	1,73	2,16	2,59	2,88	3,6	4,32	4,32	5,4	6,48	5,76	7,2	8,64

Таблица 48

Удельная тепловая мощность в период изотермического прогрева бетона в деревянной опалубке толщиной 25 мм

Температура наружного воздуха, °С	Мощность, кВт/м^3, при модуле поверхности														
	4			6			10			15			20		
	Температура изотермического прогрева, °С														
	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0	0,83	1,25	1,67	1,25	1,88	2,5	2,09	3,13	4,18	3,13	4,7	6,26	4,18	6,26	8,35
–10	1,04	1,46	1,88	1,57	2,2	2,82	2,61	3,65	4,7	3,91	5,48	7,04	5,28	7,31	9,39
–20	1,25	1,67	2,09	1,88	2,5	3,13	3,13	4,18	5,22	4,7	6,26	7,83	6,26	8,35	10,44
–30	1,46	1,88	2,3	2,2	2,82	3,44	3,65	4,7	5,74	5,48	7,04	8,61	7,31	9,39	11,48
–40	1,67	2,09	2,5	2,5	3,13	3,76	4,18	5,22	6,26	6,26	7,83	9,4	8,35	10,44	12,53

Таблица 49

Удельная тепловая мощность в период изотермического прогрева бетона в металлической опалубке толщиной 3 мм с утеплением минеральной ватой толщиной 50 мм и защитным слоем толщиной 4 мм

Температура наружного воздуха, °С	Мощность, кВт/м^3, при модуле поверхности														
	4			6			10			15			20		
	Температура изотермического прогрева, °С														
	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
0	0,21	0,31	0,41	0,31	0,46	0,61	0,51	0,77	1,02	0,77	1,15	1,54	1,02	1,53	2,05
–10	0,26	0,36	0,46	0,38	0,54	0,69	0,64	0,9	1,15	0,96	1,34	1,73	1,28	1,79	2,3
–20	0,31	0,41	0,51	0,46	0,61	0,77	0,77	1,02	1,28	1,15	1,54	1,92	1,53	2,05	2,56
–30	0,36	0,46	0,56	0,54	0,69	0,84	0,9	1,15	1,41	1,34	1,73	2,11	1,79	2,3	2,82
–40	0,41	0,51	0,61	0,61	0,77	0,92	1,02	1,28	1,54	1,51	1,92	2,3	2,05	2,56	3,07

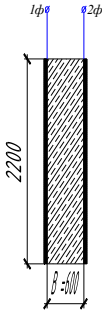
17. Рассмотрим несколько схем включения бетона в электрическую цепь.

17.1. Первая схема – пластинчатые электроды (сквозной прогрев).

Область применения: ростверки, ленточные фундаменты.

При данной схеме включения мощность для подъема температуры от 5 до 40 °С будет равна:

$$P^{\text{уд}} = \frac{10^{-3} \cdot U^2}{\rho_{\text{расч}} \cdot B^2} \geq P_{\text{р}}^{\text{уд}},$$



где U – напряжение, В; B – расстояние между электродами, м; $\rho_{\text{расч}}$ – расчетное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м:

$$\rho_{\text{расч}} = \frac{\rho_{\text{нач}} + \rho_{\text{мин}}}{2} = \frac{10,6 + 6,9}{2} = 8,75 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где $\rho_{\text{н}}$ – начальное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м (табл. П.4.7); $\rho_{\text{мин}}$ – минимальное удельное электрическое сопротивление бетонной смеси в процессе разогрева, Ом·м (табл. П.4.7). Принимаем Сухоложский цемент.

Из данного выражения необходимо выразить напряжение:

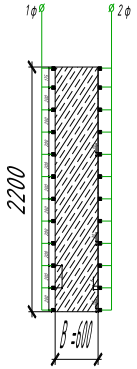
$$U = \sqrt{\frac{P_{\text{р}}^{\text{уд}} \cdot B^2 \cdot \rho_{\text{расч}}}{10^{-3}}} = \sqrt{\frac{5,315(0,6)^2 8,75}{10^{-3}}} = 129,4 \text{ В}.$$

Данное напряжение больше, чем максимальное напряжение трансформатора $U_{\max}$ = 121 В, следовательно данная схема включения не подходит.

17.2. Вторая схема – полосовые электроды (сквозной прогрев).

Область применения: ростверки, ленточные фундаменты.

При данной схеме включения мощность для подъема температуры от 5 до 40 °С будет равна:



$$P^{\text{уд}} = \frac{10^{-3} \cdot U^2}{B^2 \cdot \rho_{\text{расч}} \left(1 + \frac{\alpha \cdot b}{\pi \cdot B} \ln \frac{b}{2 \cdot a}\right)} \geq P_{\text{р}}^{\text{уд}},$$

где U – напряжение, В; B – расстояние между электродами, м; $\rho_{\text{расч}}$ – расчетное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м:

$$\rho_{\text{расч}} = \frac{\rho_{\text{нач}} + \rho_{\text{мин}}}{2} = \frac{10,6 + 6,9}{2} = 8,75 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где $\rho_{\text{нач}}$ – начальное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м (табл. П.4.7); $\rho_{\min}$ – минимальное удельное электрическое сопротивление бетонной смеси в процессе разогрева, Ом·м (табл. П.4.7); принимаем Сухоложский цемент; α – коэффициент, зависящий от схемы включения бетона в цепь: при трехфазном токе $\alpha = 3/2$, а при однофазном токе $\alpha = 2$; b – расстояние между осями электродов, м (0,1–0,8); a – ширина полосы электрода, м (20–50 мм).

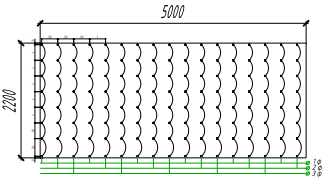
Из данного выражения необходимо выразить напряжение:

$$U = \sqrt{\frac{P_{\text{р}}^{\text{уд}} \cdot B^2 \cdot \rho_{\text{расч}} \left(1 + \frac{\alpha \cdot b}{\pi \cdot B} \ln \frac{b}{2 \cdot a}\right)}{10^{-3}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{5,315(0,6)^2 8,75 \left(1 + \frac{1,5 \cdot 0,2}{3,14 \cdot 0,6} \ln \frac{0,2}{2 \cdot 0,03}\right)}{10^{-3}}} = 198 \text{ В}.$$

Данное напряжение больше, чем максимальное напряжение трансформатора $U_{\max} = 121$ В, следовательно данная схема включения не подходит.

17.3. Третья схема – стержневые электроды, в виде плоских групп.



Область применения: все виды конструкций.

При данной схеме включения мощность для подъема температуры от 5 до 40 °С будет равна:

$$P^{\text{уд}} = \frac{3{,}14 \cdot 10^{-3} \cdot U^2}{\rho_{\text{расч}} \cdot b \cdot h \left(\alpha \ln \frac{h}{\pi \cdot d} + \frac{\pi \cdot b}{h} \right)} \geq P_{\text{р}}^{\text{уд}},$$

где U – напряжение, В; $\rho_{\text{расч}}$ – расчетное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м; $\rho_{\text{нач}}$ – начальное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м (табл. П.4.7); $\rho_{\min}$ – минимальное удельное электрическое сопротивление бетонной смеси в процессе разогрева, Ом·м (табл. П.4.7); α – коэффициент, зависящий от схемы включения бетона в цепь: при трехфазном токе $\alpha = 3/2$, а при однофазном токе $\alpha = 2$; b – расстояние между соседними группами электродов, м (20–40 см); h – расстояние между одноименными электродами в группе, м (20–40 см); d – диаметр электрода, м (6–12 мм).

Из данного выражения необходимо выразить напряжения:

$$U = \sqrt{\frac{P_{\text{р}}^{\text{уд}} \cdot b \cdot h \cdot \rho_{\text{расч}} \left(\alpha \ln \frac{h}{\pi \cdot d} + \frac{\pi \cdot b}{h} \right)}{3{,}14 \cdot 10^{-3}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{5{,}315 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}3 \cdot 8{,}75 \left(1{,}5 \ln \frac{0{,}3}{3{,}14 \cdot 0{,}01} + \frac{3{,}14 \cdot 0{,}3}{0{,}3} \right)}{3{,}14 \cdot 10^{-3}}} = 93{,}29 \text{ В}.$$

Принимаем напряжение в большую сторону в соответствии со списком напряжений принятого трансформатора: U = 103 В. Проверяем неравенство:

$$P^{\text{уд}} = \frac{3{,}14 \cdot 10^{-3} (103)^2}{8{,}75 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}3 \left(1{,}5 \ln \frac{0{,}3}{3{,}14 \cdot 0{,}01} + \frac{3{,}14 \cdot 0{,}3}{0{,}3} \right)} = 6{,}48 \geq 5{,}315 \text{ кВт},$$

что удовлетворяет условию, соответственно принимаем схему включения № 3.

5.2. Тепловая обработка бетона греющим проводом

Область применения

Обогрев бетона греющими проводами используют при возведении (устройстве) разнообразных бетонных и железобетонных строительных конструкций с модулем поверхности ($М_п \geq 5$). Способ наиболее эффективен при высокой степени (коэффициенте) армирования, сложной конфигурации и высоком модуле поверхности ($М_п \geq 20$) конструкций и обогреве бетона стыков сборных элементов.

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 применение электродного прогрева затруднено или невозможно.

Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов производится при температуре окружающего воздуха, как правило, до –20 °С.

Сущность метода

Сущность обогрева бетона токоизолированными греющими (нагревательными) проводами заключается в том, что при

прохождении по ним электрического тока провода разогреваются, и от них благодаря теплопроводности разогревается бетон.

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

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

Обогрев бетона осуществляют в диапазоне напряжения тока $U \approx$ 24–121 В. При заземлении арматуры железобетонных конструкций допускается использовать ток $U \approx$ 220 В, а при обогреве бетонных $U \approx$ 220–380 В.

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

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

5.2.1. Методика расчета тепловой обработки бетона греющим проводом

Электрический расчет греющих проводов и кабелей

Электрический расчет сводится к определению рабочего напряжения при минимально допустимой длине проволочного нагревателя и максимально допускаемой на него мощности.

Выбор длины проволочного нагревателя является не только технической, но и экономической задачей, т. к. завышение длины сверх оптимальной приводит к перерасходу провода, более плотной навивке в монолитной конструкции, к увеличению трудоемкости работ, а в ряде случаев затрудняет укладку бетонной смеси. Уменьшение длины провода приводит к его перегреву, возникновению опасных деструктивных явлений из-за больших температурных перепадов, местному пересушиванию бетона, и в конечном итоге – к снижению его качественных характеристик.

Основным расчетным параметром при определении длины проволочного нагревателя является линейная (погонная) электрическая нагрузка, приходящаяся на единицу его длины. Для условий теплоотдачи в твердеющем бетоне оптимальная погонная нагрузка (p) на проволочные нагреватели определена экспериментально и составляет: для армированных монолитных конструкций – 30–35 Вт/м, для неармированных конструкций – 35–40 Вт/м.

Максимальная погонная нагрузка на провод не должна превышать 45–50 Вт/м, т. к. при большей величине нагрузки температура его превышает 100 °С. Это может привести к структурным нарушениям и снижению качественных характеристик бетона. Такую нагрузку в течение всей продолжительности электротермообработки монолитного бетона выдерживают нагревательные провода с поливинилхлоридной и другими видами теплостойкой изоляции в отличие от проводов с полиэтиленовой изоляцией, у которых ее повреждение из-за перегрева приводит к короткому

электрозамыканию токонесущей жилы на стальную арматуру и закладные детали.

Длина проволочных электронагревателей будет равна:

$$l = \sqrt{\frac{U^2 \cdot S}{p \cdot \rho_t}},$$

где U – рабочее напряжение питания, В; S – площадь сечения токонесущей жилы, мм^2; ρ_t – удельное сопротивление жилы при рабочей температуре, Ом·мм^2/м; p – оптимальная погонная нагрузка на провод, Вт/м; $\frac{\rho_t}{S} = R_t$ – сопротивление жилы, приведенное на погонный метр нагревателя, Ом/м.

Учитывая, что удельное сопротивление нагревательных проводов различных марок может значительно меняться в зависимости от химического состава и качества токопроводящих жил. Длину нагревателя рекомендуется рассчитывать в каждом отдельном случае, уточнив предварительно величину удельного сопротивления.

Сопротивление токонесущей жилы провода при нагреве увеличивается. Погонное сопротивление нагретой жилы (R_t), в зависимости от рабочей температуры (t), с учетом температурного коэффициента (табл. 52) определяют по формуле

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t),$$

где R_0 – сопротивление жилы при нормальной (20 °С) температуре, Ом; α – температурный коэффициент сопротивления, равный для стальной жилы 0,0046 °С$^{-1}$ (табл. 50).

Сопротивление стальных токонесущих жил постоянному току при нормальной температуре (R_0) нагревательных проводов марки ПОСХВ, ПОСХП и трансляционных проводов марок ПВЖ, ППЖ и др. может быть определено по табл. 51.

Таблица 50

Технические характеристики основных проводниковых материалов

Наименование металла или сплава (химический состав)	Плотность, 10^3 кг/м^3	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм^2/м	Температурный коэффициент сопротивления, 10^{-4}·°C^{-1}	Максимальная рабочая температура, °C
Алюминий (проволока техническая)	2,70	0,028	43,0	400
Бронза фосфористая техническая	8,90	0,080	40,0	500
Железо (проволока)	7,88	0,152	46,0	500
Латунь	8,65	0,067	30,0	500
Медь красная (проволока электролитическая)	8,93	0,018	40,0	500
Никель	8,90	0,100	50,0	800
Сталь нержавеющая	7,89	0,103	58,0	800
Цинк	7,15	0,059	35,0	350
Сплавы с высоким омическим сопротивлением				
Константин (58,8 % Cu; 40 % Ni; 1,2 % Mn)*	8,88	0,44–0,52	±0,1	500
Манганин (85 % Cu; 12 % Mn; 3 % Ni)	8,50	0,42–0,48	±0,3	100
Нейзильбер (65 % Cu; 20 % Zn; 15 % Ni)	8,70	0,28–0,35	±0,4	150–200
Никелин (54 % Cu; 20 % Zn; 26 % Ni)	8,77	0,39–0,45	1,6	150–200
Нихром (67,5 % Ni; 15 % Cr; 16 % Fe; 1,5 % Mn)	8,20	1,00–1,10	2,0	1000
Реотан (84 % Cu; 12 % Mn; 4 % Zn)		0,45–0,52	4,0	150–200
Фехраль (80 % Fe; 14 % Cr; 6 % Al)		1,10–1,30	1,0	900

Окончание табл. 50

Наименование металла или сплава (химический состав)	Плотность, 10^3 кг/м^3	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм^2/м	Температурный коэффициент сопротивления, 10^{-4}·°C^{-1}	Максимальная рабочая температура, °C
Хромель (89 % Ni + 9,8 % Cr + + 1 % Fe + 0,2 % Mn)	8,72	0,68±0,05	6,0	900
Копель (55 % Cu + 45 % Ni)	8,90	0,33±0,05	2,0	600
Алюмель (94 % Ni + 2 % Al + + 2,5 Mn + 1 % Si + 0,5 % Fe)	8,40	0,47±0,05	4,0	1000
Неметаллические смеси				
Селит – смесь углерода и кремния	9,8	9,8	±2,5	1400
Криптол – смесь угля, графита и карбидов кремния		14,0	±3,0	1400

* Значения температурного коэффициента сопротивления для константана изменяются от –0,00004 до 0,00001 °C^{-1} в зависимости от химического состава сплава. Минус при температурном коэффициенте указывает, что с увеличением температуры сопротивление уменьшается.

Таблица 51

Сопротивление стальных токонесущих жил

Стальная оцинкованная жила		Электрическое сопротивление при 20 °C, Ом/м
диаметром, мм	сечением, мм^2	
0,6	0,283	0,550
1,1	0,950	0,145
1,2	1,131	0,140
1,4	1,540	0,100
1,8	2,542	0,070
2,0	3,140	0,048
3,0	7,060	0,021
4,0	12,560	0,012

Таблица 52

Коэффициент температуры нагрева жилы

Рабочая температура, °С	Переводной коэффициент
50	1,01
60	1,02
70	1,04
80	1,06
90	1,10
100	1,20

Максимальная установившаяся температура (t) нагрева в бетоне нагревательного провода, в зависимости от погонной нагрузки (p), приближенно может быть определена по табл. 53 (экспериментальные данные).

Таблица 53

Максимальная установившаяся температура нагрева провода в бетоне

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

Сопротивление стальной токонесущей жилы различного сечения при рабочей температуре (R_t) для проводов марок ПОСХВ, ПОСХП, ПВЖ и др., в зависимости от погонной нагрузки, можно определить по табл. 54 (экспериментальные данные).

Таблица 54

Расчетное электрическое сопротивление токонесущей жилы

Диаметр токонесущей стальной жилы, мм	Электрическое сопротивление токонесущей жилы (Ом/м) при погонной нагрузке на провод, Вт/м							
	10	15	20	25	30	35	40	50
0,6	0,682	0,734	0,776	0,827	0,870	0,940	0,977	1,017
1,1	0,180	0,192	0,206	0,210	0,229	0,248	0,257	0,268
1,2	0,170	0,181	0,194	0,210	0,222	0,235	0,240	0,259
1,4	0,124	0,134	0,141	0,146	0,158	0,166	0,177	0,185
1,8	0,088	0,094	0,099	0,108	0,111	0,120	0,124	0,130
2,0	0,059	0,064	0,068	0,072	0,076	0,082	0,085	0,089
3,0	0,032	0,034	0,035	0,036	0,037	0,0375	0,038	0,039
4,0	0,015	0,016	0,017	0,013	0,019	0,020	0,021	0,022

Длина нагревателей из проводов марок ПОСХВ, ПОСХП, ПВЖ, ППЖ и других, имеющих стальную оцинкованную жилу с сопротивлением, соответствующим значениям, приводимым в табл. 51–54, может быть определена по номограмме (рис. 22). При использовании греющего провода с полимерной жилой электрические параметры можно определить по номограмме (рис. 23).

Методика выбора и расчета технологических параметров электрообогрева бетона

Нагревательные провода размещают, имитируя условия внешнего обогрева, в монолитных конструкциях – в периферийных слоях, в железобетонных – в уровне арматурных сеток и каркасов. Температура во внутренних зонах конструкций поднимается за счет экзотермии цемента и передачи теплоты от более разогретых периферийных слоев.

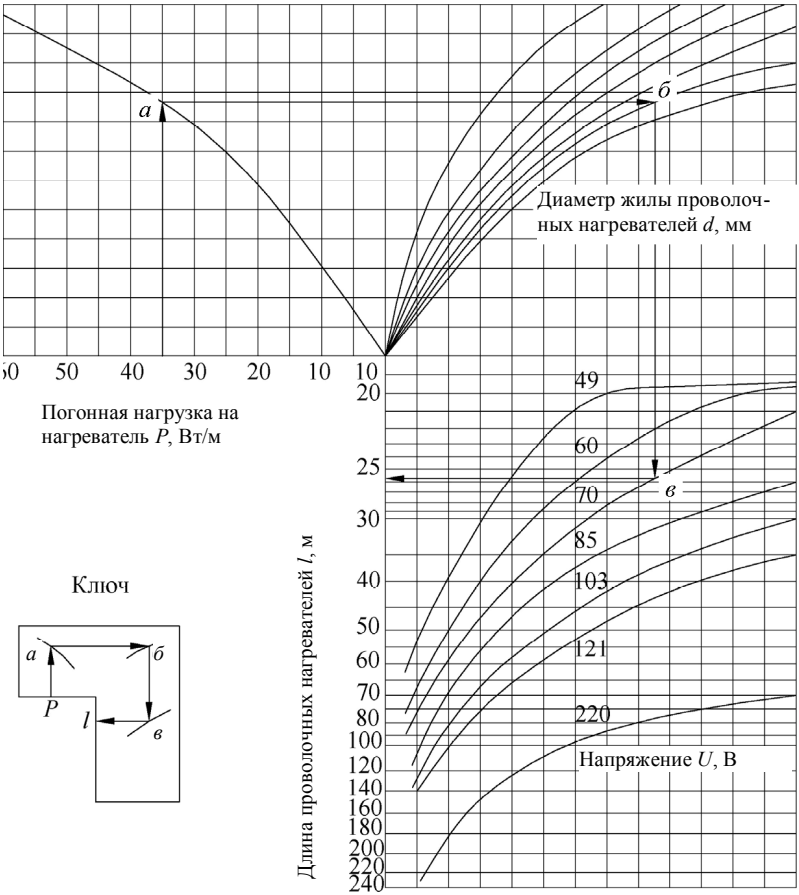


Рис. 22. Номограмма для определения длины проволочных электронагревателей со стальной токонесущей жилой

Основным технологическим параметром является удельная электрическая (тепловая) мощность ($P_{уд}$), приходящаяся на единицу площади обогреваемых конструкций.

$$P_{уд} = \frac{P}{F},$$

где P – суммарная электрическая мощность нагревателей, Вт; F – площадь обогрева, м^2.

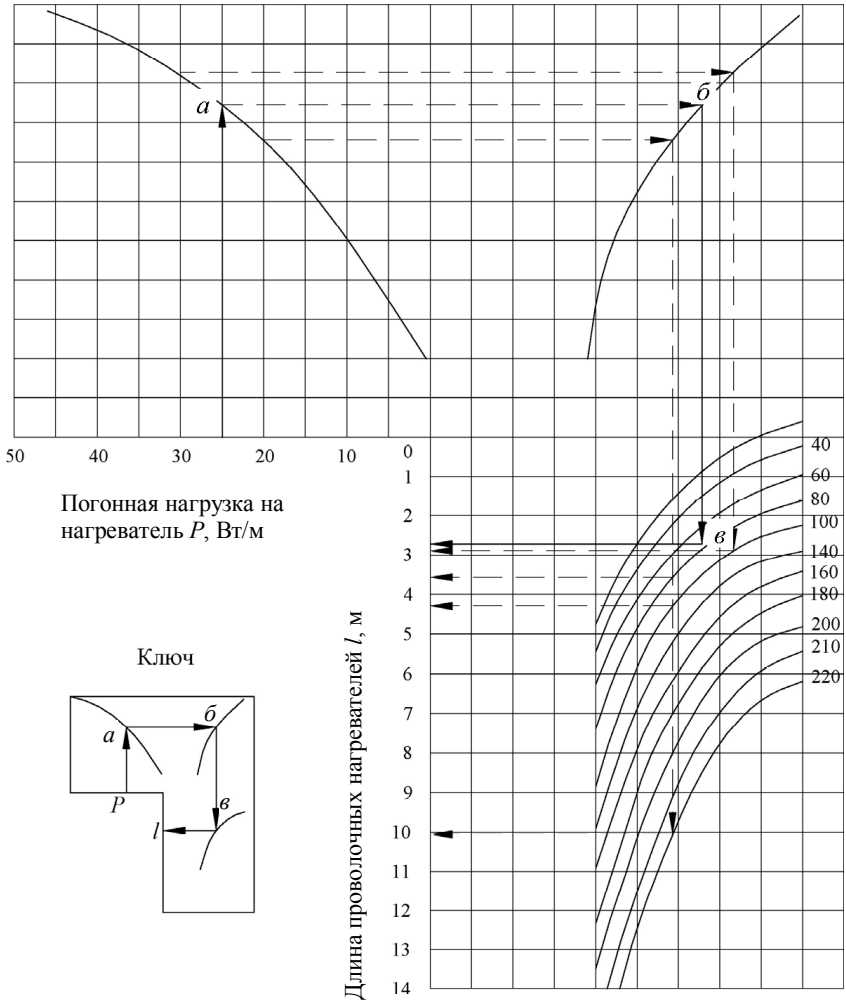


Рис. 23. Номограмма для определения параметров работы греющих проводов с полимерной токопроводящей жилой

При расчете определяют необходимую электрическую тепловую мощность, обеспечивающую нагрев бетона до требуемой температуры. При этом удельная мощность может быть выбрана для трех характерных случаев:

1) нагрева бетона с максимально допустимой скоростью, регламентируемой действующими нормами; температуру изотермического выдерживания следует регулировать во избежание местных перегревов;

2) нагрева бетона до вполне определенной температуры, обеспечиваемой подбором необходимой мощности для конкретных внешних условий теплообмена по так называемому саморегулирующемуся режиму, при котором отпадает надобность в устройствах для регулирования температуры бетона;

3) компенсации тепловых потерь, предварительно разогретой бетонной смеси, уложенной в опалубку по методу «управляемого термоса».

Потребная удельная электрическая мощность проволочных нагревателей зависит от массивности обогреваемых монолитных конструкций, расчетной температуры наружного воздуха и скорости ветра, коэффициента теплопередачи утеплителя. Удельная мощность для всех трех случаев может быть определена графическим путем (рис. 24–26). Однако в первом случае для обеспечения нагрева бетона с максимально допустимой скоростью требуется большое количество провода и электроэнергии. В связи с этим обогрев по этому способу в практике применяется редко.

Другим важным технологическим параметром является равномерность температурного поля на обогреваемой поверхности конструкции, обеспечиваемая необходимой плотностью укладки нагревательного провода или расстоянием (шагом) между смежными витками провода (b).

Шаг (b) проволочных нагревателей и количество рядов нагревателей в монолитной конструкции обусловлены требуемой удельной мощностью по расчету.

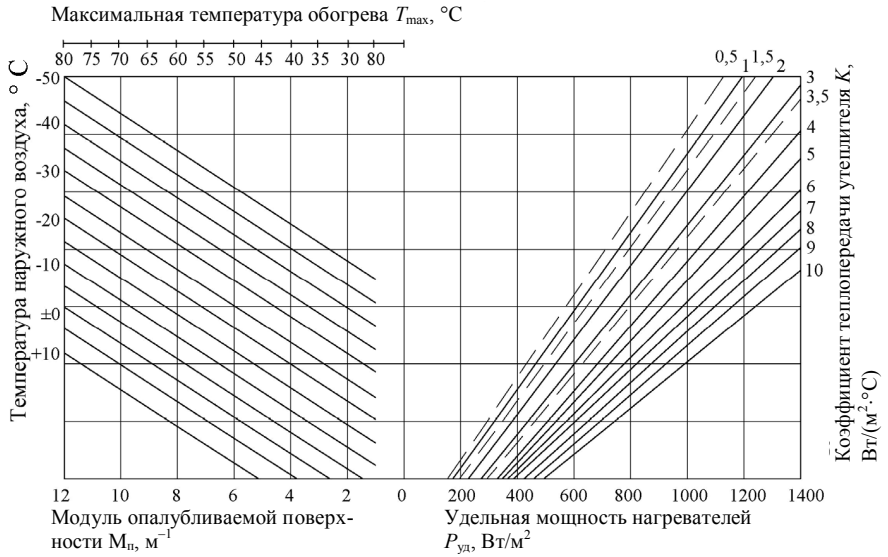


Рис. 24. Номограмма для определения удельной мощности нагревателей, обеспечивающей максимально допустимую скорость подъема температуры бетона

Шаг проволочных нагревателей можно определить по формуле

$$b = \frac{1}{\frac{P_{уд}}{p} + 1},$$

где $P_{уд}$ – удельная мощность, Вт/м^2; p – погонная нагрузка на провод, Вт/м.

В монолитных конструкциях для конструкций, контактирующих с грунтом (подготовки под полы, каменные и искусственные основания и т. п.), шаг нагревателей должен находиться в пределах 50–150 мм. Шаг может приниматься 150–200 мм.

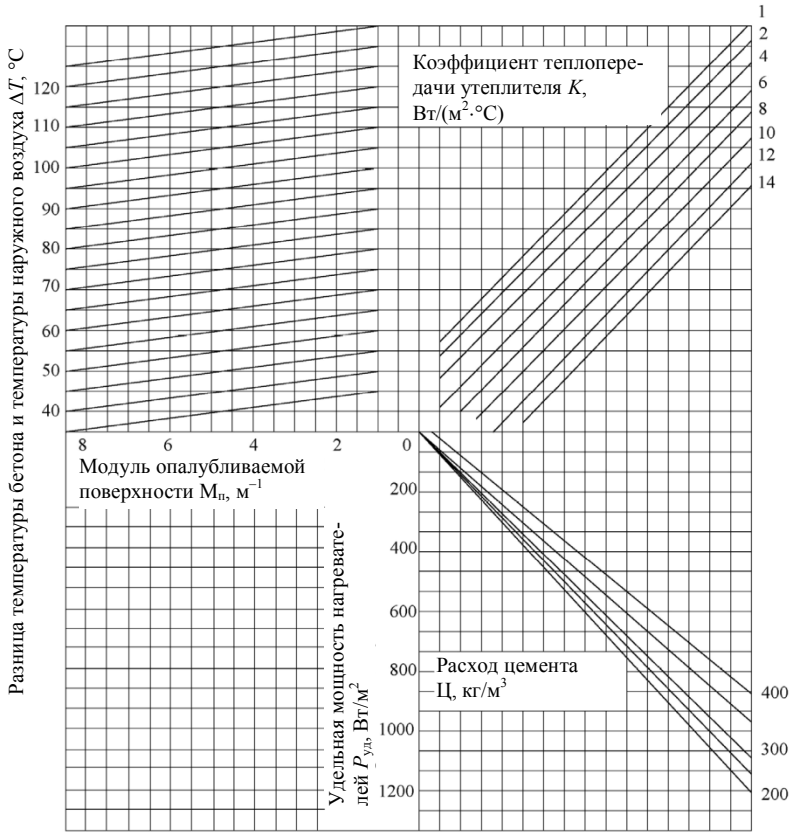


Рис. 25. Номограмма для определения удельной мощности нагревателей при саморегулирующемся режиме

В стыках сборных железобетонных элементов, цементно-песчаных подливках под колонны и оборудование, местных заделках шаг нагревателей обычно принимают 25–70 мм.

В ответственных монолитных элементах и несущих конструкциях при шаге нагревателей менее 30 мм и их многорядном размещении возможность закладки провода в бетон должна быть согласована с проектной организацией.

Рис. 26. График для определения удельной мощности нагревателей при использовании предварительно разогретой бетонной смеси и применении метода «управляемого термоса»

Эффективность обогрева зависит от качества и толщины утеплителя. При возведении монолитных конструкций толщину и вид утеплителя (или теплозащитные свойства разных видов утеплителя) в опалубке и уложенного в открытые бетонные поверхности рекомендуется принимать одинаковой.

Коэффициенты теплопередачи основных теплоизоляционных материалов различной толщины, характеристики которых приведены в табл. 55, приближенно определяют по формуле

$$K_{\text{пр}} = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}} + \sum \dfrac{\delta_i}{\lambda_i}},$$

где δ_i – толщина слоя теплоизоляционного материала, м; λ_i – коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(м·°С); $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент передачи теплоты от утеплителя и опалубки излучением;

$$\alpha_{\text{л}} = (4,6 + 0,045 \cdot t_{\text{н.в}})\varepsilon,$$

$\alpha_к$ – коэффициент передачи теплоты конвекцией, Вт/(м^2·°С), принимаемый равным:

а) для тел прямоугольного и квадратного сечений

$$\alpha_k = \frac{4,32\left[\left(1,293 - 0,058 \cdot t_{н.в}\right)v\right]^{0,8}}{a^{0,2}};$$

б) для цилиндра

$$\alpha_k = \frac{4,32\left[\left(1,293 - 0,058 \cdot t_{н.в}\right)v\right]^{0,8}}{R^{0,2}},$$

где ε – степень черноты полного нормального излучения материала опалубки (при расчетах можно принимать ε = 0,65); v – скорость ветра, м/с; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха, °С; a – толщина (для плит, стен) или размер стороны (для колонн, балок), м; R – радиус, м.

Таблица 55

Теплофизические характеристики основных теплоизоляционных материалов

Материал	Объемная масса, 10^3 кг/м^3	Расчетный коэффициент теплопроводности в зависимости от средней температуры слоя $t_{ср}$, Вт/(м·°С)	Максимальная рабочая температура применения, °С
Бумага битуминированная	0,87	0,14	90
Вата минеральная	0,15	$0,053 + 0,00019t_{ср}$	600
Материалы теплоизоляционные из минеральной ваты (на синтетическом связующем):			
плиты мягкие и маты (ПМ)	0,10	$0,049 + 0,0002t_{ср}$	350
плиты полужесткие (ПП) и жесткие (ПЖ)	0,15–0,175	$0,051 + 0,0002t_{ср}$	350

Окончание табл. 55

Материал	Объемная масса, 10^3 кг/м^3	Расчетный коэффициент теплопроводности в зависимости от средней температуры слоя $t_{ср}$, Вт/(м·°С)	Максимальная рабочая температура применения, °С
Плиты теплоизоляционные жесткие из минеральной ваты на битумном связующем	0,275	$0,074 + 0,00025t_{ср}$	70
Холстопрошивной материал из стеклянного волокна (ХПС)	0,05	$0,042 + 0,00035t_{ср}$	200
Стеклоткань (ТР)	0,2	$0,039 + 0,00025t_{ср}$	450
Ткань асбестовая	0,6	$0,122 + 0,000159t_{ср}$	450
Перлит вспученный	0,18	$0,06 + 0,0001t_{ср}$	800
Плиты совелитовые	0,35	$0,075 + 0,00019t_{ср}$	500
Камышит (плиты)	0,3	0,105	100
Пенобетон	0,3–1,2	$0,07–0,32 + 0,0003t_{ср}$	400
Пенопласт (ПХВ)	0,1–0,20	0,043–0,058	70
Торфоплиты	0,15–0,25	0,047–0,07	100
Шлак котельный	0,9–1,3	0,233–0,372	600
Плиты ДСП	1,0	0,29	120
Оргалит	0,2–0,3	0,14–0,16	110
Фанера клееная	0,6	0,17	120
Опилки	0,25	0,24	110
Снег свежевыпавший	0,08–0,19	0,105	–
Снег уплотненный	0,2–0,4	0,35	–
Снег, начавший таять	0,5–0,7	0,64	–

Средние значения коэффициентов теплопередачи утеплителя различных видов, используемого для утепления открытых горизонтальных бетонных поверхностей, приведены в табл. 56.

Таблица 56

Коэффициенты теплопередачи утеплителя различных видов

Вид утеплителя нормальной влажности с пленочным укрытием	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·°С), при скорости ветра, м/с		
	0	5	15
Сосновые опилки при толщине слоя 100 мм	0,74	0,89	0,90
Минераловатные маты на синтетическом связующем толщиной 50 мм	1,01	1,31	1,37
Шлак при толщине слоя 150 мм	1,27	1,77	1,87

5.2.2. Расчет параметров термообработки бетона греющим проводом в типовых конструкциях зданий

Ниже, на примере определения параметров термообработки бетона в типовых конструкциях зданий (колонн, стен и перекрытий), излагается методика, которая может быть рекомендована для расчета режима термообработки бетона в конструкциях любой формы и размеров.

Расчетные параметры термообработки бетона, приведенные в таблицах, следует использовать как предварительные и приближенные. Для ответственных конструкций расчетные параметры подлежат уточнению по результатам лабораторных испытаний образцов зимнего бетонирования.

Пример расчета тепловой обработки бетона колонны нагревательным проводом

Бетонирование (бетон класса В15, расход цемента 350 кг/м^3) колонны с размерами А×В×С (500×500×7500 мм) производится в опалубке из досок толщиной 40 мм с примене-

нием нагревательного провода ПНСВ-1; с диаметром жилы 1,2 и трансформаторной подстанции КТП 63-ОБ.

Условия бетонирования следующие:

– температура бетонной смеси, уложенной в опалубку, +15 °С;

– средняя температура наружного воздуха в течение суток –20 °С;

– скорость ветра 5 м/с;

– температура изотермического выдерживания бетона +40 °С.

Определение параметров режима термообработки бетона производится в следующей последовательности.

Принимается, что потери теплоты через торцы колонны незначительны (верхний открытый торец утеплен минеральной ватой), и поэтому они не учитываются.

Модуль поверхности охлаждения колонны $М_п$ равен:

$$М_п = \frac{F_{охл}}{V_б} = \frac{27,64}{6,6} = 4,19 \text{ м}^{-1}.$$

Коэффициент теплопередачи доски $K_т$ при скорости ветра 5 м/с определяем по табл. П.4.4 и принимаем $K_т = 3,6$ Вт/(м^2·°С).

Находим разницу температуры нагретого бетона и температуры наружного воздуха ΔT, которая составляет:

$$\Delta T = 40 - (-20) = 60 \text{ °С}.$$

Необходимую удельную мощность нагрева провода $P_{уд}$ определяем по номограмме (рис. П.4.2).

Между прямыми *2* и *4* коэффициента теплопередачи $K_т$, Вт/(м^2·°С), проводим визуально прямую, равную 3,6 Вт/(м^2·°С).

Находим точку пересечения прямой ΔT = 60 °С с ординатой $М_п$ = 8,0 м$^{-1}$ модуля поверхности колонны. Из этой точки

проводим горизонталь до пересечения с упомянутой прямой, равной $K_т$ = 3,6 Вт/(м^2·°С).

Опускаем перпендикуляр из этой точки на прямую расхода цемента Ц = 350 кг/м^3.

Проекция полученной точки на ординату удельной мощности нагрева провода указывает, что $P_{уд}$ = 320 Вт/м.

Шаг нагревательных проводов b определяем по формуле

$$b = 1/(P_{уд}/p + 1) = 1/(320/33 + 1) = 0,09 = 0,1 \text{ м},$$

где p = 33 Вт/м – удельная нагрузка на провод из рекомендуемого интервала 30–35 Вт/м для армированных конструкций.

Длина провода L, необходимого для навивки по схеме на рис. П.4.4 на арматурный каркас с шагом 10 см, составляет:

$$L = 2(А + Б)С/b = 2(0,5 + 0,5)7,5/0,1 = 150 \text{ м}.$$

Далее, по номограмме (рис. П.4.3), подбираем длину нагревателя, близкую к кратной 150 м, и рабочее напряжение.

Между кривыми, с диаметром провода d 1,4 и 1,1 мм, проводим визуально кривую, равную d = 1,2 мм.

Из точки на абсциссе удельной нагрузки p = 33 Вт/м проводим ординату до точки пересечения с кривой, затем из этой точки по горизонтали находим точку пересечения с кривой d = 1,2 мм. Опускаем перпендикуляр из этой точки на кривые рабочего напряжения U, В. Проекции точек пересечения на ординату длины нагревателя позволяют подобрать длину нагревателя l, м. Наиболее близким значением является длина нагревателя 25 м при рабочем напряжении U = 55 В. Таким образом, на поверхностях охлаждения колонны укладывается 6 нагревателей по 25 м каждый.

Удельный расход провода (на 1 м бетона) составит 150,0/1,87 ~ 80,0 м.

Режим термообработки бетона определим с учетом и при условии, что прочность бетона составит не менее 70 % от R_{28}.

Продолжительность нагрева при скорости нагрева 4,0 °С/ч составляет не менее 6 ч, изотермическая выдержка при +40 °С по графику (рис. П.4.5) – 60 ч, а остывания до нуля при скорости остывания 2,0 °С/ч – не менее 20 ч.

Аналогичные расчеты были выполнены при температуре воздуха –10 и –15 °С. Основные параметры термообработки бетона в колонне сведены в табл. 57.

Таблица 57

Температура воздуха, °С	Удельная мощность нагрева $P_{уд}$, Вт/м^2	Шаг нагревателя b, мм	Диаметр провода d, мм	Длина нагревателя, м	Напряжение тока U, В
–10	230	140	1,1	20	48
			1,2	25	55
			1,4	30	60
–15	280	120	1,1	20	48
			1,2	25	55
			1,4	30	60

Пример расчета тепловой обработки бетона стены нагревательным проводом

Бетонирование (бетон класса В15, расход цемента 350 кг/м^3) стены с размерами А×В×С (3000×500×6000 мм) производится в инвентарной стальной опалубке с размерами щита 2000×1000 мм, утепленной минераловатными плитами толщиной 60 мм. Для термообработки бетона предусмотрены нагревательный провод ПНСВ-1 диаметром 1,4 мм и трансформаторная подстанция типа КТПТО-80-86 VI.

Условия бетонирования следующие:

– температура бетонной смеси, уложенной в опалубку, +5 °С;

– средняя температура наружного воздуха в течение суток –15 °С;

– скорость ветра 3 м/с;

– температура изотермического выдерживания бетона +45 °С.

Определение параметров режима термообработки бетона производится в следующей последовательности.

Принимается, что потери теплоты через верхнюю и нижнюю поверхности стены незначительны (верхняя открытая поверхность надежно укрыта теплоизоляционным материалом) и поэтому не учитываются.

Модуль поверхности охлаждения стены $M_п$ равен:

$$M_п = \frac{F_{охл}}{V_б} = \frac{39,0}{9,0} = 4,3 \text{ м}^{-1}.$$

Коэффициент теплопередачи опалубки $K_т$ определим по формуле

$$K_т = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_л} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_к}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{2,8} + \frac{0,06}{0,6} + \frac{1}{25}\right)} = 2,0 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°С)},$$

где $\alpha_л$ – 2,8 Вт/(м^2·°С) – коэффициент передачи теплоты от опалубки излучением; δ_i = 0,06 м – толщина слоя теплоизоляционного материала; λ_i = 0,6 Вт/(м·°С) – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала; $\alpha_к$ = 25,0 Вт/(м^2·°С) – коэффициент передачи теплоты конвекцией при скорости ветра 3 м/с.

Находим разницу температуры нагретого бетона и температуры наружного воздуха ΔT, которая составит:

$$\Delta T = 45 - (-15) = 60 \text{ °С}.$$

Необходимую удельную мощность нагрева бетона $P_{уд}$ определим по номограмме (рис. П.4.2).

Находим точку пересечения прямой ΔT = 60 °С с ординатой $M_п$ = 4,3 м$^{-1}$ модуля поверхности стены. Из этой точки проводим горизонталь до пересечения с прямой коэффициента теплопередачи, равной $K_т$ = 2,0 Вт/(м^2·°С).

Опускаем перпендикуляр из этой точки на прямую расхода цемента Ц = 350 кг/м^3.

Проекция полученной точки на ординату удельной мощности нагрева указывает, что $P_{уд}$ = 250 Вт/м^2.

Шаг нагревательных проводов b определяем по формуле

$$b = 1/(P_{уд}/p + 1) = 1/(250/34 + 1) = 0{,}12 \text{ м},$$

где p = 34 Вт/м – удельная нагрузка на провод d = 1,1–1,4 из рекомендуемого интервала; p = 30–35 Вт/м – для армированных конструкций.

Длина провода L, необходимая для навивки по схеме на рис. П.4.4 на арматурный каркас с шагом 12 см, составляет:

$$L = 2A(C + B)/b = 2 \cdot 3(6 + 0{,}5)/0{,}12 \sim 324 \text{ м}.$$

Далее, по номограмме (рис. П.4.3), подбираем длину нагревателя, близкую к кратной 324 м, и рабочее напряжение.

Из точки на абсциссе удельной нагрузки p = 34 Вт/м проводим ординату до точки пересечения с кривой, затем из этой точки по горизонтали находим точку пересечения с кривой d = 1,4 мм. Опускаем перпендикуляр из этой точки на кривые рабочего напряжения U, В. Проекции точек пересечения на ординату длины нагревателя позволяют подобрать длину нагревателя. Наиболее близким значением является длина нагревателя 27 м при рабочем напряжении U = 58 В. Таким образом, на поверхностях охлаждения стены укладывается 12 нагревателей по 27 м каждый. Удельный расход провода (на 1 м бетона) составит 324,0/9,0 = 36,0 м.

Режим термообработки бетона определим при условии, что прочность бетона составит не менее 70 % от R_{28}. Продолжительность нагрева при скорости нагрева 4,0 °С/ч составляет не менее 10 ч, изотермическая выдержка при +45 °С по графику (рис. П.4.5) – 48 ч и остывания до нуля при скорости остывания 2,0 °С/ч – не менее 22 ч.

Аналогичные расчеты были выполнены при температуре воздуха –10 и –20 °С. Основные параметры термообработки бетона в стене сведены в табл. 58.

Таблица 58

Температура воздуха, °С	Удельная мощность нагрева $P_{уд}$, Вт/м^2	Шаг нагревателя b, мм	Диаметр провода d, мм	Длина нагревателя, м	Напряжение тока U, В
–10	230	140	1,1	20	48
			1,2	25	55
			1,4	27	58
–15	250	120	1,1	20	48
			1,2	25	55
			1,4	27	58

Пример расчета тепловой обработки бетона перекрытия нагревательным проводом

Бетонирование (бетон класса В25, расход цемента 400 кг/м) перекрытия с размерами А×В×С (6000×6000×200 мм) производится в опалубке из ламинированной фанеры толщиной 21 мм. Открытая поверхность перекрытия утепляется минераловатными плитами толщиной 80 мм, термоактивными гибкими покрытиями (ТАГП) или греющими плоскими элементами (ГЭП).

Для термообработки бетона предусмотрены нагревательный провод ПНСВ-1 диаметром 1,2 мм и трансформаторная подстанция типа КТПТО-80-86.

Условия бетонирования следующие:

– температура бетонной смеси, уложенной в опалубку, +10 °С;

– температура изотермического выдерживания бетона +45 °С;

– температура наружного воздуха: днем –16 °С, ночью –20 °С;

– скорость ветра 1,5 м/с.

Определение параметров режима термообработки бетона производится в следующей последовательности.

Принимается, что потери теплоты через открытую верхнюю поверхность перекрытия незначительны (надежно укрыта теплоизоляционным материалом) и поэтому не учитываются.

Модуль поверхности охлаждения перекрытия $М_п$ при этом равен:

$$М_п = \frac{F_{охл}}{V_б} = \frac{40,8}{7,2} = 6,0 \text{ м}^{-1}.$$

Коэффициент теплопередачи опалубки $K_т$ определим по формуле:

$$K_т = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_л} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_к}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{2,8} + \frac{0,021}{0,4} + \frac{1}{20}\right)} = 2,2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°С)},$$

где $\alpha_л$ – 2,8 Вт/(м^2·°С) – коэффициент передачи теплоты от опалубки излучением; δ_i = 0,021 м – толщина ламинированной фанеры; λ_i = 0,4 Вт/(м·°С) – коэффициент теплопроводности ламинированной фанеры; $\alpha_к$ = 20,0 Вт/(м^2·°С) – коэффициент передачи теплоты конвекцией при скорости ветра 3 м/с.

Находим разницу температуры ΔT нагретого бетона и средней температуры наружного воздуха в течение суток, равной –18 °С:

$$\Delta T = 45 – (–18) = 63 \text{ °С}.$$

Необходимую удельную мощность нагрева бетона $P_{уд}$ определяем по номограмме (рис. П.4.2).

Находим точку пересечения прямой ΔT = 63 °С с ординатой $М_п$ = 6,0 м$^{-1}$ модуля поверхности перекрытия. Из этой точки проводим горизонталь до пересечения с прямой коэффициента теплопередачи, равной $K_т$ = 2,2 Вт/ (м^2·°С).

Опускаем перпендикуляр из этой точки на прямую расхода цемента Ц = 400 кг/м^3.

Проекция полученной точки на ординату удельной мощности нагрева указывает, что $P_{уд}$ = 300 Вт/м^2.

Шаг нагревательных проводов b определяем по формуле

$$B = 1/(P_{уд}/p + 1 = 1/(300/34 + 1) = 0{,}10 \text{ м},$$

где p = 34 Вт/м – удельная нагрузка на провод d = 1,1–1,4 из рекомендуемого интервала; p = 30–35 Вт/м – для армированных конструкций.

Длина провода, необходимого для укладки в нижнем уровне арматуры по схеме (рис. П.4.4) с шагом 10 см, составляет:

$$L = \text{В}\,(\text{А}/b + 1) + \text{А} = 6(6/0{,}1 + 1) + 6 = 372 \text{ м}.$$

Далее, по номограмме (рис. П.4.3), подбираем длину нагревателя, близкую к кратной длине провода, и рабочее напряжение.

Между кривыми 1,4 и 1,1 мм диаметра провода d проводим визуально кривую, равную d = 1,2 мм.

Из точки на абсциссе удельной нагрузки p = 34 Вт/м проводим ординату до точки пересечения с кривой, затем из этой точки по горизонтали находим точку пересечения с кривой d = 1,2 мм. Опускаем перпендикуляр из этой точки на кривые рабочего напряжения U, В. Проекции точек пересечения на ординату длины нагревателя позволяют подобрать длину нагревателя. Наиболее близким значением является длина нагревателя 25 м при рабочем напряжении U = 55 В. Таким образом, в перекрытие укладывается 15 нагревателей по 25 м каждый.

Удельный расход провода (на 1 м^3 бетона) составит: 372,0/7,2 ~ 52,0 м.

Режим термообработки бетона определим с учетом рекомендаций разд. 5.2 и при условии, что прочность бетона составит не менее 70 % от R_{28}. Продолжительность нагрева при скорости нагрева 4,0 °С/ч составляет не менее 9 ч, изотермическая

выдержка при +45 °С по графику (прил. 12) – 48 ч и остывания до нуля при скорости остывания 2,0 °С/ч – не менее 22 ч.

Аналогичные расчеты были выполнены при температуре воздуха –10 °С.

Основные параметры термообработки бетона в перекрытии сведены в табл. 59.

Таблица 59

Температура воздуха, °С	Удельная мощность нагрева $P_{уд}$, Вт/м^2	Шаг нагревателя b, мм	Диаметр провода d, мм	Длина нагревателя, м	Напряжение тока U, В
–10	230	140	1,1	20	48
			1,2	25	55
			1,4	27	58
–18	300	100	1,1	20	48
			1,2	25	55
			1,4	27	58

5.3. Прогрев бетона в греющих опалубках

Область применения

Областью применения электрообогрева монолитных конструкций греющей опалубкой с трубчатыми электронагревателями являются фундаменты под конструкции зданий и оборудование, массивные стены и др. с модулем поверхности $М_п$ = 3–6 м$^{-1}$; колонны, балки, прогоны, элементы рамных конструкций, свайные ростверки, стены, перекрытия с модулем поверхности $М_п$ = 6–10 м$^{-1}$; полы, перегородки, плиты перекрытий, тонкостенные конструкции с модулем поверхности $М_п$ = 10–20 м$^{-1}$, бетонирование которых производится при минимальной температуре воздуха до –40 °С.

Наиболее рациональная область применения связана с разновидностями опалубки (объемно-переставная, крупно-щитовая, подъемно-переставная и скользящая опалубка), и применением их в строительстве.

Сущность метода

Прогрев бетона в греющих или термоактивных опалубках осуществляют за счет подвода тепла контактным способом от нагретой поверхности палубы опалубки к бетону. Дальнейшее распространение тепла осуществляется благодаря теплопроводности прогреваемого бетона. По существу процесса прогрева он аналогичен тепловой обработке сборных бетонных и железобетонных изделий в термоформах. Конструктивно греющие опалубки представляют собой устройства, на внутренней стороне палубы (сталь или фанера) которых располагаются греющие элементы в виде трубчатых электронагревателей (ТЭНов), греющие провода и кабели, гибкие тканевые нагреватели в виде лент или полос. Возможно применение в качестве нагревателей нестандартных элементов в виде навитой проволоки, сетчатых, стержневых, уголковых, изготовленных из материалов с высоким омическим сопротивлением (стали, нихрома и др.). Нагревательные элементы теплоизолированы с внешней стороны (обычно – минеральной ватой) и защищены жестким защитным экраном (сталь или фанера).

Температура нагрева опалубки и прогрева бетона зависит от используемых в ней нагревателей. В частности, для опалубок с греющими проводами и токопроводящими тканями режим прогрева бетона должен рассчитываться исходя из наибольшей температуры (60 °С). Остальные нагреватели обеспечивают прогрев при 80–90 °С.

Кратковременное включение электропитания греющих опалубок (перед подачей в нее бетона) позволяет осуществить

отогрев арматуры и удаления с нее наледи, обеспечивает благоприятный температурный режим при укладке бетона. Термоактивные щиты могут использоваться для отогрева бетонных и грунтовых оснований. В целом использование греющих опалубок создает наиболее благоприятные условия для обеспечения качественных характеристик бетона в сравнении с другими вариантами его твердения в зимний период. Поэтому при наличии требований к бетону по морозо-, коррозионной стойкости и водонепроницаемости рекомендуется использовать греющие опалубки.

Греющие опалубки характеризуются удельной мощностью нагревателей, приходящейся на единицу площади термоактивных щитов и соответствующей $P_{уд}$ = 0,2–1,4 кВт/м^2 для серийно изготавливаемых стандартизированных опалубок.

Стандартизированные греющие опалубки с известной характеристикой по величине $P_{уд}$ применяют (выбирают) на основании расчета, последовательность которого изложена ниже.

Нестандартизированные греющие опалубки изготавливают на основании данных расчета величины $P_{уд}$, с учетом необходимого запаса удельной мощности термоактивных щитов.

5.3.1. Методика расчета прогрева бетона в греющих опалубках

Определяют распалубочную прочность бетона, которая должна быть не ниже критической прочности бетона по табл. 60 и не ниже ее значения, требуемого по проектно-технической документации производства работ.

Дальнейший расчет режима прогрева бетона. Определяют температуру прогрева бетона $t_п$ с учетом следующих основных факторов: вида применяемого цемента, модуля поверхности, наличия и доли неопалубленной поверхности, эксплуатационных требований к бетону, значения прочности бетона к окончанию прогрева и времени выдержки конструкции в опалубке.

Таблица 60

Требования к производству работ при отрицательных температурах воздуха

1. Прочность бетона монолитных и сборномонолитных конструкций к моменту замерзания:	
1.1. Для бетона без противоморозных добавок:	
1.1.1. Конструкций, эксплуатирующихся внутри зданий, фундаментов под оборудование, не подвергающихся динамическим воздействиям, подземных конструкций	Не менее 5 МПа
1.1.2. Конструкций, подвергающихся атмосферным воздействиям в процессе эксплуатации, для класса:	Не менее % от проектной прочности:
B7,5–B10	50
B12,5–B25	40
B30 и выше	30
1.1.3. Конструкций, подвергающихся по окончании выдерживания переменному замораживанию и оттаиванию в водонасыщенном состоянии или расположенных в зоне сезонного оттаивания вечномерзлых грунтов при условии введения в бетон воздухововлекающих или газообразующих ПАВ	70
1.1.4. В преднапряженных конструкциях	80
1.2. Для бетона с противоморозными добавками	К моменту охлаждения бетона до температуры, на которую рассчитано количество добавок, не менее 20 % от проектной прочности
2. Загружение конструкций расчетной нагрузкой допускается после достижения бетоном прочности	Не менее 100 % от проектной прочности
3. Температура воды и бетонной смеси на выходе из смесителя, приготовленной:	
3.1. На портландцементе, шлакопортландцементе, пуццолановом портландцементе марок ниже М600	Воды не более 70 °С, смеси не более 35 °С

Продолжение табл. 60

3.2. На быстротвердеющем портландцементе и портландцементе марки М600 и выше	Воды не более 60 °С, смеси не более 30 °С
3.3. На глиноземистом портландцементе	Воды не более 40 °С, смеси не более 25 °С
4. Температура бетонной смеси, уложенной в опалубку, к началу выдерживания или термообработки:	
при методе термоса	По расчету, но не ниже 5 °С
с противоморозными добавками	Не менее чем на 5 °С выше температуры замерзания раствора затворения
при тепловой обработке	Не ниже 0 °С
5. Температура в процессе выдерживания и тепловой обработки для бетона на:	По расчету, но не выше:
портландцементе	80 °С
шлакопортландцементе	90 °С
6. Скорость подъема температуры при тепловой обработке бетона:	Не более:
для конструкций с модулем поверхности:	
до 4	5 °С/ч
от 5 до 10	10 °С/ч
свыше 10	15 °С/ч
для стыков	20 °С/ч
7. Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки для конструкций с модулем поверхности:	
до 4	По расчету
от 5 до 10	Не более 5 °С
свыше 10	Не более 10 °С

Окончание табл. 60

8. Разность температур наружных слоев бетона и воздуха при распалубке с коэффициентом армирования до 1 %, 3 % и более 3 % должны быть, соответственно, для конструкций с модулем поверхности:	
от 2 до 5	Не более 20, 30, 40 °С
свыше 5	Не более 30, 40, 50 °С

Для греющих опалубок, при обязательной гидро-, теплоизоляции распалубленных поверхностей, рекомендуемые значения температуры прогрева бетона $t_{\text{п}}$ соответствуют: до 90 °С – для бетона на шлакопортландцементе; до 80, 70, 60 °С – на портландцементе, соответственно, третьей, второй и первой групп эффективности и также до 60 °С при наличии повышенных требований к бетону по эксплуатационным характеристикам (водонепроницаемости, морозостойкости, истираемости и др.), для бетона конструкций транспортных коммуникаций, а также предназначенных для эксплуатации в агрессивных средах.

Рассчитывают время подъема температуры ($\tau_{\text{под}}$, ч), приняв скорость подъема температуры бетона ($V_{\text{р}}$, °С/ч), в соответствии с требованиями табл. 60, по зависимости

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

где $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона к началу прогрева, °С, которая должна быть не ниже 0 °С. В случае электропрогрева бетона без предварительного разогрева смеси на объекте принимают $t_{\text{б.н}}$ = 2–5 °С, и учитывают это значение при расчете температуры бетонной смеси на выходе из смесителя предприятия-изготовителя.

Для бетона конструкций транспортных коммуникаций, конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, и при наличии повышенных требований к бетону по эксплуатационным

характеристикам скорость подъема температуры должна быть не более 5 °С/ч.

Определяют время изотермического прогрева бетона ($\tau_{из}$ до приобретения им требуемой для распалубки прочности $R_{б.расп}$ при расчетной температуре прогрева $t_п$, по данным табл. 61 или фактическим данным строительной (профильной научно-исследовательской) лаборатории. В табл. 61 приведены среднестатистические данные о росте прочности бетона, в процентах от проектной, в зависимости от марки цемента и температуры изотермического прогрева.

Таблица 61

Прочность бетона, в % от проектной, для различных классов в зависимости от температуры и времени прогрева

Бетон	Время прогрева, ч	Прочность бетона, в % от проектной, при температуре изотермического прогрева, °С				
		40	50	60	70	80
Класс В15–В25 на ПЦ М400	8	18	30	38	50	60
	16	33	44	55	66	75
	24	45	55	65	74	80
	48	68	75	80	–	–
	72	77	85	89	–	–
Класс В30–В45 на ПЦ М500; М600	8	25	35	45	60	70
	16	48	55	60	70	80
	24	55	65	70	80	–
	48	75	85	90	–	–
	72	85	92	98	–	–
Класс В15–В25 на ШПЦ М400	8	16	20	30	40	50
	16	30	35	50	60	70
	24	40	50	65	74	83
	48	60	75	90	100	–
	72	70	90	–	–	–

Примечание. Промежуточные значения определяют интерполяцией. В случае применения в бетоне добавок-ускорителей твердения нарастание прочности бетона по табл. 61 принимают с поправочным коэффициентом, приведенным в табл. 62.

Таблица 62

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

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

Определяют время остывания бетона $\tau_{ост}$ до температуры $t_{б.к}$, обеспечивающей допускаемую по табл. 63 разницу температур его наружных слоев и воздуха.

При определении $\tau_{ост}$ возможны два варианта: 1) требуется ускоренный оборот опалубки; 2) по условиям ведения работ допускается продолжительное остывание бетона вместе с опалубкой.

По первому варианту принимают (табл. 63; п. 7) скорость остывания бетона $V_{ост}$ (°С/ч) и определяют время остывания по зависимости

$$\tau_{ост} = \frac{t_{п} - t_{расп}}{V_{ост}},$$

где $t_{п}$ – температура прогрева бетона, °С; $t_{расп}$ – температура бетона к началу распалубки, °С, с учетом допускаемой разницы температур между бетоном и воздухом (по табл. 63).

Значение $t_{расп}$ определяют по зависимости

$$t_{расп} = t_{н.в} + \Delta t,$$

где $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха (< 0 °С); Δt – допускаемая разница температур между бетоном и воздухом, принятая по табл. 63, п. 8.

Таблица 63

Параметр	Величина параметра	Контроль (метод, объем, вид регистрации)
1. Прочность бетона монолитных и сборно-монолитных конструкций к моменту замерзания (критическая прочность):		
1.1. Для бетонов без противоморозных добавок:		
конструкций, эксплуатирующихся внутри зданий, фундаментов под оборудование, не подвергающихся динамическим воздействиям, подземных конструкций	Не менее 5 МПа	
конструкций, подвергающихся атмосферным воздействиям в процессе эксплуатации, для класса:	% от проектной прочности, не менее:	
B10	50	
B15–B25	40	
B30 и выше	30	
конструкций, подвергающихся по окончании выдерживания переменному замораживанию и оттаиванию в водонасыщенном состоянии или к бетону которых предъявляют требования по водонепроницаемости более *W*4	70	Измерительный по ГОСТ 18105, журнал работ
в преднапряженных конструкциях	80	
1.2. Для бетона с противоморозными добавками	К моменту охлаждения бетона до температуры, на которую рассчитано количество добавок, не менее 20 % от проектной прочности	

Продолжение табл. 63

Параметр	Величина параметра	Контроль (метод, объем, вид регистрации)
2. Загружение конструкций расчетной нагрузкой допускается после достижения бетоном прочности	Не менее 100 % от проектной	
3. Температура воды и бетонной смеси на выходе из смесителя, приготовленной: на портландцементе, шлакопортландцементе, пуццолановом портландцементе марок ниже М600 на быстротвердеющем портландцементе и портландцементе марки М600 и выше на глиноземистом портландцементе	Воды не более 70 °С, смеси не более 35 °С Воды не более 60 °С, смеси не более 30 °С Воды не более 40 °С, смеси не более 25 °С	Измерительный, 2 раза в смену, журнал работ
4. Температура бетонной смеси, уложенной в опалубку, к началу выдерживания или термообработки: при методе термоса с противоморозными добавками при тепловой обработке	Устанавливается расчетом, но не ниже 5 °С Не менее чем на 5 °С выше температуры замерзания раствора затворения Не ниже 0 °С	Измерительный, в местах, определенных ППР, журнал работ

Продолжение табл. 63

Параметр	Величина параметра	Контроль (метод, объем, вид регистрации)
5. Температура в процессе выдерживания и тепловой обработки для бетона на:	Определяется расчетом, но не выше, °С	При термообработке – через каждые 2 ч в период подъема температуры или в первые сутки. В последующие трое суток и без термообработки – не реже 2 раз в смену. В остальное время выдерживания – один раз в сутки
портландцементе	80	
шлакопортландцементе	90	
6. Скорость подъема температуры при тепловой обработке бетона:		Измерительный, через каждые 2 ч, журнал работ
для конструкций с модулем поверхности:	Не более, °С/ч	
до 4	5	
от 5 до 10	10	
св. 10 и скользящих опалубок	15	
для стыков	20	
7. Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки для конструкций с модулем поверхности:		Измерительный, журнал работ
до 4	Определяется расчетом	
от 5 до 10	Не более 5 °С/ч	
св. 10	Не более 10 °С/ч	

Окончание табл. 63

Параметр	Величина параметра	Контроль (метод, объем, вид регистрации)
8. Разность температур наружных слоев бетона и воздуха при распалубке с коэффициентом армирования до 1 %, до 3 % и более 3 % должны быть, соответственно, для конструкций с модулем поверхности:		То же
от 2 до 5	Не более 20, 30, 40 °С	
св. 5	Не более 30, 40, 50 °С	

Требования к производству работ при отрицательных температурах воздуха установлены в табл. 63.

Для второго варианта рассчитывают время остывания бетона в опалубке по формуле до температуры $t_{б.к}$.

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

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

Определяют общую продолжительность выдерживания бетона в опалубке, ч, по формуле

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

В случае, если принят режим медленного остывания бетона в опалубке после изотермического прогрева и второе слагае-

мое формулы приобретает отрицательный знак или превращается в нуль, то есть выполняется условие:

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

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

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

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

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

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

Определяют требуемую мощность на подъеме температуры, кВт/м^2, по формуле

$$P_{уд} = P_{под}/F_{т.щ},$$

где $F_{т.щ}$ – площадь термоактивных щитов опалубки, м^2, которая при температуре наружного воздуха ниже –10 °С должна соответствовать площади опалубливаемых поверхностей конструкции (за исключением боковых граней проемов, ограничителей шириной не более 300 мм); при $t_{нв}$ ~ 0…–10 °С допускается применять греющие опалубки с установкой термоактивных щитов по схеме «через один рядовой (теплоизолированный) щит», за исключением угловых частей конструкций, зон проемообра-

зователей и др. ее частей, интенсивно отдающих тепло в окружающую среду. Рядовые щиты, вкладыши и ограничители должны выполняться с коэффициентом теплопередачи не ниже его значения для термоактивных щитов (рис. 27). В противном случае они должны утепляться для получения соответствующего коэффициента теплопередачи.

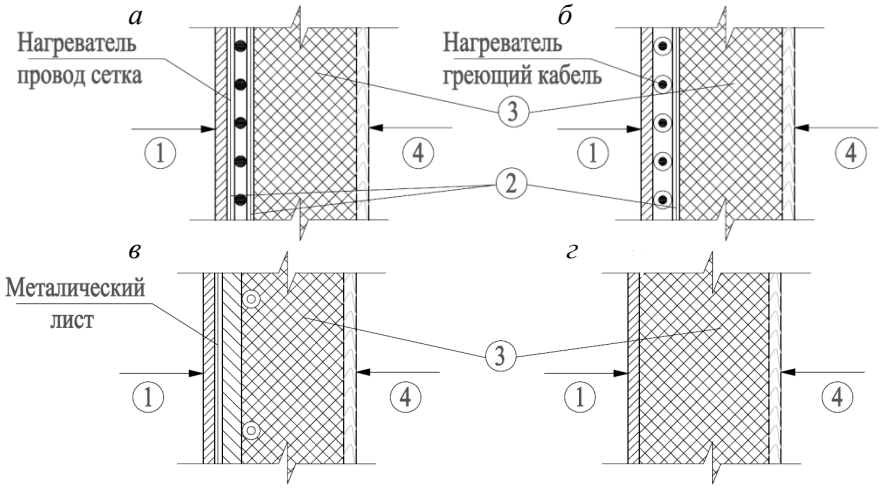


Рис. 27. Принципиальные схемы-разрезы термоактивных (*а*, *б*, *в*) и рядовых теплоизоляционных (*г*) щитов греющих опалубок:
1 – палуба; *2* – листовой асбест; *3* – минераловатный утеплитель; *4* – защитный экран

Мощность, требуемая (максимальная) на подъеме температуры $P_{\text{под}}$, кВт/м^3, определяется по формуле

$$P_{\text{под}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot V_{\text{р}}}{3600} + \sum_{i=1}^{n} \frac{C_{\text{оп}i} \cdot \gamma_{\text{оп}i} \cdot \delta_{\text{оп}i} \cdot \text{М}_{\text{п}}}{3600} \frac{V_{\text{р}}}{2} + \\ + \frac{K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_{\text{н.в}})}{1000} - 0,8,$$

где $C_б$, $C_{оп i}$ – удельная теплоемкость бетона, принимают равной $C_б$ = 1,05 кДж/(кг·°С) и опалубки (i – относится к каждому слою многослойной опалубки), кДж/(кг·°С); $\gamma_б$, $\gamma_{оп i}$ – средняя плотность бетона и материалов опалубки, кг/м^3; $\delta_{оп i}$ – толщина i-го слоя опалубки, м; $V_р$ – скорость подъема температуры, °С/ч; $K_т$ – коэффициент теплопередачи опалубки, Вт/(м^2·°С); $t_п$ – температура прогрева бетона, °С; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха, °С; –0,8 – снижение требуемой мощности за счет учета теплоты экзотермии цемента, кВт/м^3.

Выбирают греющую опалубку по номинальному значению удельной мощности термоактивных щитов $P_{уд.ном}$, кВт/м^2, исходя из условия: $P_{уд.ном} > P_{уд}$, из ряда $P_{уд.ном} \sim 0{,}2–1{,}4$ кВт/м^2.

При наличии греющей опалубки оценивают возможность ее использования по этому же критериальному условию.

Определяют требуемую мощность для поддержания температуры при изотермическом прогреве бетона, кВт/м^3,по формуле

$$P_{из} = \frac{K_т \cdot \mathrm{M}_п (t_п - t_{н.в})}{1000},$$

а затем по формуле

$$W = P_{под} \cdot \tau_{под} + P_{из} \cdot V_б \left(\tau_{выд} - \frac{\tau_{под}}{4} - \frac{\tau_{ост}}{2} \right),$$

рассчитывают затраты электрической энергии, кВт·ч, на прогрев бетона на захватке объемом $V_б$, м^3, по установленному режиму (времени) подъема температуры и изотермической выдержки.

5.3.2. Пример расчета прогрева бетона в греющих опалубках

Задание:

Рассчитать параметры режима твердения бетона монолитной железобетонной несущей внутренней стены здания в греющей опалубке по следующим исходным данным:

– конструкция стены (захватка): длина L = 60 м; высота H = 3,2; толщина δ = 0,25 м; объем бетона V = 4,8 м^3; модуль поверхности $М_п$ = 9 м$^{-1}$; степень (коэффициент) армирования $P_а$ < 1 %;

– опалубка (тип VI, по табл. П.4.4) термоактивная (требуется рассчитать необходимую удельную мощность термоактивных щитов) с палубой из стали толщиной δ = 3 мм, минераловатным утеплителем δ = 50 мм, защитным экраном из фанеры δ = 4 мм; коэффициент теплопередачи $K_т$ = 1,27 Вт/(м^2·°С) при ω = 5 м/с;

– бетон тяжелый В20 на портландцементе марки М400 (C_3A < 7 %) 2-й группы эффективности при пропаривании;

– температура бетона к началу прогрева $t_{б.н}$ = +3 °С;

– температура наружного воздуха $t_{н.в}$ = –10 °С;

– требуемая по проектной документации распалубочная прочность бетона – не менее 70 % от проектной ($R_{б.расп}$ ≥ 70 % от R_{28});

– планируемый период твердения бетона в опалубке – 2 сут.

1. Определим распалубочную прочность бетона, которая по проектной документации должна быть:

$$R_{б.расч} \geq 70\ \%\ \text{от}\ R_{28} \geq 18\ \text{МПа}.$$

2. Определим температуру прогрева бетона, которая для настоящего примера может быть равной $t_п$ = 80 °С (табл. 63).

3. Рассчитаем время подъема температуры $\tau_{под}$ до 80 °С, приняв скорость ее подъема с учетом данных табл. 63:

$$\tau_{под} = \frac{t_п - t_{б.н}}{V_р} = \frac{80-3}{10} = 7,7\ \text{ч}.$$

4. Определим время изотермического прогрева $\tau_{из}$ бетона (класс В20, вяжущее – портландцемент М400), интерполируя данные табл. 61, с учетом $t_{пт}$ = 80 °С и $R_{б.расч}$ ~ 70 % от R_{28}, которое составит:

$$\tau_{из} = 8 + \frac{(70-60)8}{75-60} = \frac{80-3}{10} = 13,33 \text{ ч.}$$

5. Определим температуру бетона при распалубке $t_{расп}$, при которой обеспечивается безопасный перепад температуры Δt между ним и наружным воздухом при $t_{н.в} = -10$ °С.

Принимаем для рассматриваемого случая $\Delta t = 30$ °С по данным табл. 63, тогда

$$t_{расп} = t_{н.в} + \Delta t;$$

$$t_{расп} = -10 + 30 = 20 \text{ °С}.$$

6. Определим время остывания бетона в режиме охлаждения конструкции, приняв по табл. 63 скорость остывания (для $М_п = 9$ м$^{-1}$), равную $V_{ост} = 5$ °С/ч, ч, по формуле:

$$\tau_{ост} = \frac{t_п - t_{расп}}{V}.$$

7. Определим общую продолжительность твердения бетона в опалубке, ч, по формуле:

$$\tau_{выд}^{общ} = \tau_{под} + \left(\tau_{из} - \frac{\tau_{под}}{4} - \frac{\tau_{ост}}{2}\right) + \tau_{ост} =$$

$$= 7,7 + \left(13,3 - \frac{7,7}{4} - \frac{12}{2}\right) + 12 = 25,1.$$

Принимаем режим твердения (прогрева) бетона, включающий подъем температуры, изотермическую выдержку и остывание конструкции в соотношении: 7,7 + 5,4 + 12, при общей продолжительности ~ 25 ч.

8. Определим соответствие расчетного времени остывания конструкции и времени естественного остывания бетона с опалубкой по формуле.

Для этого определим значение ожидаемой средней температуры бетона по формуле:

$$t_{\text{б.ср}} = t_{\text{б.к}} + \frac{t_{\text{раз}} - t_{\text{б.к}}}{1,03 + 0,181 \cdot \text{М}_{\text{п}} + 0,006\left(t_{\text{раз}} - t_{\text{б.к}}\right)} =$$

$$= 20 + \frac{80 - 20}{1,03 + 0,181 \cdot 9 + 0,006\left(80 - 20\right)} = 40 \text{ °C}.$$

Тогда при $K_{\text{т}}$ = 1,27 Вт/(м^2·°С) уточняют время остывания бетона в опалубке $\tau_{\text{ост}}$ по формуле Б.Г. Скрамтаева – С.А. Миронова, в которой экзотермию (тепловыделение) цемента учитывают в варианте холодного термоса, т. е. без предварительного разогрева бетонной смеси или прогрева бетона:

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}}\left(t_{\text{раз}} - t_{\text{б.к}}\right) + \text{Ц} \cdot \text{Э}}{3,6 \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}}\left(t_{\text{ср}} - t_{\text{н.в}}\right)} = \frac{1,05 \cdot 2400\left(80 - 20\right)}{3,6 \cdot 1,27 \cdot 9\left(40 + 10\right)} = 73,5 \text{ ч}.$$

Учитывая, что время естественного остывания бетона существенно превышает требуемое по условиям ведения работ, следует после отключения подачи электроэнергии, примерно за 12 ч до распалубки, перевести конструкцию в режим охлаждения, при выполнении следующих условий, не превышая расчетную скорость охлаждения бетона в 5 °С/ч.

Температурный режим твердения бетона, а также температуру бетона конечную (к началу снятия опалубки) контролируют (определяют) по контрольной точке, расположенной на глубине 50 мм от середины поверхности бетона в расчетном сечении.

Под расчетным сечением понимается среднее сечение по отношению к наибольшему размеру бетонируемой конструкции.

В случаях, если разница температур между бетоном и окружающей средой к окончанию расчетного периода твердения превышает ограничения п. 8, табл. 63 или требуемая прочность

бетона достигнута за меньший отрезок времени, допускается переводить твердение бетона из режима естественного остывания вместе с опалубкой в режим охлаждения. С этой целью опалубку отсоединяют от поверхности бетона конструкции и, либо не снимая ее, либо заменив ее на паронепроницаемое укрытие с равнозначным коэффициентом теплопередачи, постепенно охлаждают бетон в соответствии с требованиями п. 7, табл. 63.

9. Определим требуемую мощность на подъеме температуры бетона (железобетона) при теплоемкости стальной палубы опалубки C = 0,48 кДж/(кг·°С); толщине δ = 0,003 м; плотности γ = 7800 кг/м^3; минеральной ваты: δ = 0,05 м; C = 0,76 кДж/(кг·°С); γ = 100 кг/м^3; фанеры: δ = 0,004 м; C = 2,52 кДж/(кг·°С); γ = = 600 кг/м^3:

$$P_{\text{под}} = \frac{1,05 \cdot 2500 \cdot 10}{3600} +$$

$$+ \frac{\left(0,48 \cdot 7800 \cdot 0,003 + 0,76 \cdot 100 \cdot 0,05 + 2,52 \cdot 600 \cdot 0,004\right)}{3600} \frac{10}{2} +$$

$$+ \frac{1,27 \cdot 9\left(80 + 10\right)}{1000} - 0,8 = 7,7 \text{ кВт/м}^3,$$

при этом наибольшая требуемая мощность на подъеме температуры при $V_{\text{б}}$ = 4,8 м^3 будет равна:

$$P_{\text{под. max}} = 4,8 \cdot 7,7 \sim 37 \text{ кВт}.$$

10. Определим требуемую удельную мощность $P_{\text{уд}}$ термоактивных щитов греющей опалубки.

10.1. При греющей опалубке на 100 % от опалубливаемой поверхности, равной:

$$F_{\text{т.щ}} \sim 2\ (L \cdot h) \sim 2(6,0 \cdot 3,2) \sim 38,4 \text{ м}^2.$$

Удельную мощность определяем по формуле:

$$P_{\text{уд}} = P_{\text{под}}/F_{\text{т.щ}} \text{ кВт/м}^2;$$

$$P_{уд} = 37/38{,}4 \geq 0{,}96 \text{ кВт/м}^2.$$

10.2. При греющей опалубке, установленной по принципу «через термоактивный щит» (принимаем площадь термоактивных щитов 60 % от $F_{т.щ} \sim 2 \cdot (6{,}0 \cdot 3{,}2) \cdot 0{,}6 \sim 23$ м^2), удельная мощность греющих щитов должна быть не менее:

$$P_{уд} = 31/23 \geq 1{,}6 \text{ кВт/м}^2.$$

10.3. По полученным значениям $P_{уд}$ выбирают необходимую для ведения работ опалубку или оценивают возможность использования имеющейся по величине паспортной удельной мощности нагревателей. При необходимости формулируют задание на изготовление нестандартизированной греющей опалубки.

11. Определим требуемую мощность $P_п$ на поддержание температуры изотермического прогрева бетона по формуле

$$P_п = \frac{1{,}27 \cdot 9(80+10)}{1000} = 1{,}03 \text{ кВт/м}^3.$$

12. Рассчитаем затраты электрической энергии на прогрев по расчетному режиму бетона на захватке объемом $V_б = 4{,}8$ м^3 по формуле:

$$P = P_{под} \cdot \tau_{под} + P_п \cdot V_б \left(\tau_{выд} - \frac{\tau_{под}}{4} - \frac{\tau_{ост}}{2} \right) =$$

$$= 7{,}7 \cdot 4{,}8 \cdot 8 + 1{,}03 \cdot 4{,}8 \cdot 5{,}4 = 322 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

5.4. Инфракрасный обогрев бетона

Область применения

Область применения инфракрасного обогрева монолитных конструкций при производстве бетонных (железобетонных) работ при отрицательных температурах воздуха включает:

– отогрев промороженных бетонных и грунтовых оснований, арматуры, закладных металлических деталей и опалубки, удаление снега и наледи;

– интенсификацию твердения бетона конструкций и сооружений с модулем поверхности $М_п$ от 1 до 14, возводимых в скользящей либо объемно-переставной опалубках, плит перекрытий и покрытий, вертикальных и наклонных конструкций, бетонируемых в металлической или конструктивной опалубках;

– предварительный отогрев зоны стыков сборных железобетонных конструкций и ускорение твердения бетона или раствора при заделке стыков;

– ускорение твердения бетона или раствора при укрупнительной сборке большеразмерных железобетонных конструкций;

– создание тепловой защиты поверхностей, недоступных для утепления.

Сущность метода

Сущность инфракрасного способа термообработки бетона заключается в использовании тепловой энергии, выделяемой инфракрасными излучателями, и направленной на открытые или опалубленные поверхности обогреваемых конструкций.

Поскольку глубина проникновения инфракрасных лучей в бетон не превышает 2 мм, то лучистая энергия превращается в тепловую в тонких поверхностных слоях бетона, остальная же масса конструкций нагревается за счет теплопередачи от этих слоев и экзотермии цемента.

В качестве источников (генераторов) инфракрасного излучения в технологии зимнего бетонирования рекомендуется применять:

– металлические (стальные, латунные, медные) трубчатые электрические нагреватели (ТЭНы) типов НВС (нагреватель воздушный сушильный) и НВСЖ (нагреватель воздушный су-

шильный жаростойкий) диаметром от 9 до 18 мм, длиной от 0,3 до 6 м, мощностью от 0,6 до 1,2 кВт/м с рабочим напряжением 127, 220 и 380 В, с температурой излучающей поверхности от 300 до 600°;

– керамические стержневые излучатели диметром от 6 до 50 мм, длиной от 0,3 до 1 м, мощностью от 1 до 10 кВт/м, с рабочим напряжением 127, 220 и 380 В, с температурой излучающей поверхности от 1300 до 1500 °С;

– кварцевые трубчатые излучатели типа НИК-220-1000-Тр (нагреватель инфракрасный кварцевый напряжением 220 В, мощностью 1000 Вт, трубчатый) диаметром 10 мм, длиной 370 мм, с температурой спирали до 2300 °С. Кварцевые излучатели должны работать обязательно в горизонтальном положении и быть надежно защищены от ударных воздействий.

Для создания направленного лучистого потока излучатели должны помещаться в параболические, сферические или трапецеидальные отражатели. При этом излучатели помещаются в фокус параболы или центр сферы. Расположение излучателей при применении трапецеидальных отражателей определяется расчетом.

Инфракрасные излучатели в комплекте с отражателями и поддерживающими устройствами составляют инфракрасную установку.

В зависимости от назначения, конфигурации и модуля поверхности обогреваемых конструкций рекомендуется применять инфракрасные установки:

а) короба для обогрева плитных конструкций, дорожных оснований, стен, отогрева промороженного бетона, грунта и т. п.;

б) прожектора для отогрева полости опалубки, арматуры, закладных деталей и тепловой защиты поверхностей, недоступных для утепления;

в) сферические и плоские нащельники для предварительного отогрева зоны стыка сборных железобетонных конструкций и термообработки бетона заделки;

г) двухстенную плоскую опалубку для термообработки плоских вертикальных и линейных конструкций и элементов.

5.4.1. Методика расчета инфракрасного обогрева бетона

Инфракрасные лучи являются составной частью спектра электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве с определенной частотой и длиной от 676 до 1000 мкм. Скорость их распределения в вакууме равна универсальной константе c = 2,988 10^8 м/с. Инфракрасные лучи имеют способность поглощаться телами и трансформироваться в тепловую энергию. Тепло от источника инфракрасных лучей к нагреваемому телу передается мгновенно без участия какого-либо переносчика. От нагретых поверхностных слоев тело прогревается за счет собственной теплопроводности (табл. 64).

Таблица 64

Основные термины, определения, буквенные обозначения и единицы измерения величины инфракрасного излучения

Энергетическая величина (термин)	Определение	Буквенное обозначение	Формула	Единицы измерения
Лучистая энергия (энергия излучения)	Энергия, переносимая электромагнитным излучением и определяемая как произведение лучистого потока на время действия излучения	W	$W = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \Phi \cdot dr$	Вт·с
Лучистый поток (поток энергии излучения)	Мощность оптического излучения (средняя мощность электромагнитного излучения за время, значительно большее периода колебаний)	$\Phi_э$	$\Phi_э = \frac{dW}{dt}$	Вт·с

Окончание табл. 64

Энергетическая величина (термин)	Определение	Буквенное обозначение	Формула	Единицы измерения
Плотность излучения (энергетическая светимость)	Поверхностная плотность лучистого потока излучения, испускаемого поверхностью, равная отношению лучистого потока к площади излучающей поверхности	$R_э$	$R_э = \frac{d\Phi_э}{dF \cdot u}$	Вт/м^2
Облученность (энергетическая освещенность)	Поверхностная плотность лучистого потока излучения, падающего на поверхность, равная отношению лучистого потока к площади облучаемой поверхности, по которой она равномерно распределяется	$E_э$	$E_э = \frac{d\Phi_э}{dF_0}$	Вт/м^2

При тепловой обработке бетонных изделий и конструкций инфракрасными нагревателями наблюдается следующая картина: часть энергии излучения поглощается и переходит в тепловую энергию, часть отражается и уходит в окружающую среду, а остальная энергия проходит через тело бетона. Баланс лучистой энергии складывается из вышеперечисленных величин:

$$E_A + E_R + E_D = E_э \text{ или } A + R + D = 1,$$

где $E_э$ – общее количество энергии; E_A, E_R и E_D – соответственно, количество поглощенной, отраженной энергии и энергии, про-

шедшей через коэффициенты, характеризующие поглощательную и отражательную способности и проходимость тела (рис. 28).

$$A = \frac{E_A}{E_э}; \quad R = \frac{E_R}{E_э}; \quad D = \frac{E_D}{E_э}.$$

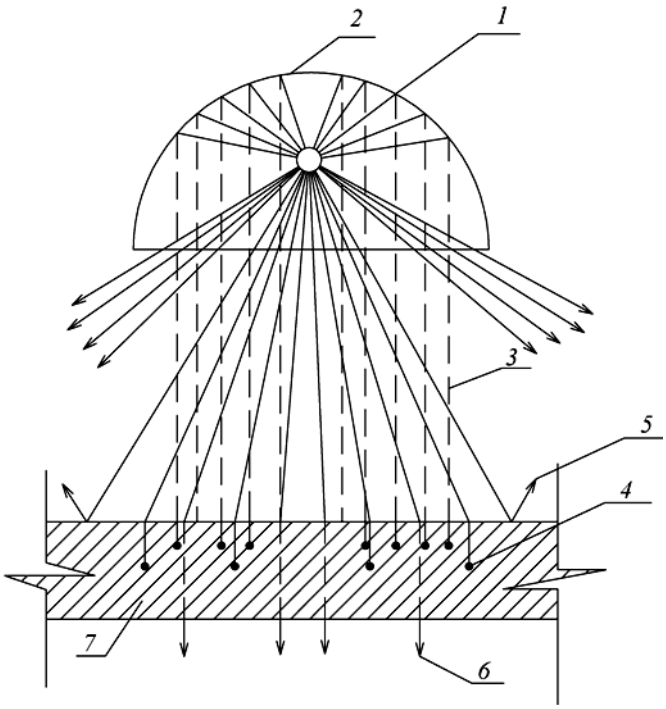


Рис. 28. Схема нагрева тела инфракрасными лучами:
1 – инфракрасный излучатель; *2* – рефлектор; *3* – направленный поток лучей; *4* – часть лучистой энергии, поглощенная телом (*A*); *5* – часть лучистой энергии, отраженная телом (*K*); *6* – часть лучистой энергии, прошедшая сквозь тело (*B*); *7* – облучаемое тело

Бетон обладает терморадиационными свойствами, т. е. способностью поглощать, отражать и пропускать лучистую энергию. Поэтому тело, полностью поглощающее все падающие

на него лучи, в физике принято называть *абсолютно черным телом*. В природе абсолютно черных тел не существует. Однако есть тела с повышенным коэффициентом поглощения лучей, их принято называть *серыми телами*. Все тела характеризуются относительной излучательной способностью или степенью черноты, которая показывает, во сколько раз интегральная плотность излучения данного тела меньше интегральной плотности излучения абсолютно черного тела при той же температуре:

$$\varepsilon = \frac{R_э}{R_{э.черн}}.$$

Степень черноты тела и его поглощательная способность численно равны между собой, т. е. $\varepsilon = E \cdot A$. Таким образом, тела с большей излучательной способностью обладают большей поглощательной способностью, и наоборот (табл. 65).

Таблица 65

Степень черноты материалов

Материал	Температура, °С	Степень черноты
Бетон	22–100	0,65–0,85
Вода	0–100	0,95–0,98
Древесина	20	0,7–0,8
Железо:		
полированное	400–1000	0,14–0,38
окисленное	100	0,74
оцинкованное	20	0,28
Жесть белая	20	0,28
Керамзитобетон	20–150	0,7–0,9
Краски:		
алюминиевые	100	0,3–0,35
масляные	100	0,92–0,96

Окончание табл. 65

Материал	Температура, °С	Степень черноты
Лак черный матовый	40–100	0,96–0,98
Нихромовая проволока окисленная	50–500	0,95–0,98
Сталь:		
листовая шлифованная	95–1100	0,55–0,61
с шероховатой поверхностью	50	0,95–0,98
сильно окисленная	50–500	0,88–0,98

Плотность излучения (энергетическая светимость), в зависимости от температуры, определяется выражением

$$R_э = \varepsilon \cdot \sigma_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где σ_0 – постоянная излучения, равная 4,96 ккал/(м^2·ч·К), или 5,75 кВт/(м^2·°С); T – абсолютная температура тела.

Инфракрасное излучение при производстве бетонных работ в зимнее время рекомендуется применять для отогрева бетонных поверхностей и оснований, тепловой защиты укладываемого бетона, интенсификации твердения бетона, предварительного разогрева арматуры и закладных деталей в узлах и т. д. (рис. 29).

Применение инфракрасного излучения дает возможность производить практически все технологические операции, направленные на качественное выполнение бетонных работ в зимних условиях.

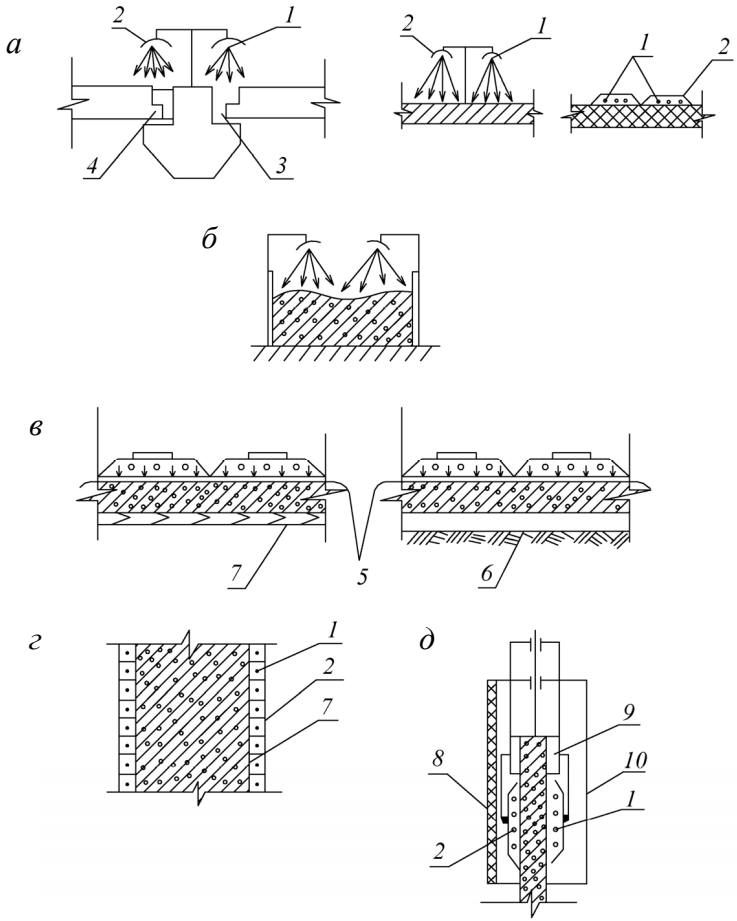


Рис. 29. Инфракрасный нагрев в технологии бетонных работ:
а – отогрев промороженного бетона и оснований; *б* – тепловая защита укладываемого бетона; *в* – теплообработка бетона в покрытиях и перекрытиях; *г* – интенсификация твердения бетона при возведении конструкций в металлической опалубке; *д* – термообработка бетона в скользящей опалубке; *1* – инфракрасный излучатель; *2* – отражатель; *3* – зона отогрева бетона; *4* – вновь укладываемый бетон; 5 – полиамидная пленка; *6* – подготовка под бетон; *7* – металлическая опалубка; *8* – укрытие наружных лесов; *9* – металлическая опалубка; *10* – подвесные леса

Режимы термообработки

Прежде чем перейти к рассмотрению режимов электротермообработки бетона, необходимо отметить, что требования к материалам бетона, подвергаемого инфракрасному нагреву, те же, что и к любому бетону.

Режим термообработки бетона инфракрасными излучателями подразделяется на три этапа: 1) подъем температуры в теле бетона до расчетной; 2) изотермический прогрев при данной температуре; 3) остывание до температуры окружающей среды. Остывание бетона может быть регулируемым и свободным.

На становление физико-механических свойств бетона, обработанного инфракрасным излучением, влияют следующие факторы:

– продолжительность предварительного выдерживания;

– выдерживание скорости подъема;

– обеспечение свободной или исключенной массоотдачи;

– температура и время изотермического прогрева;

– время остывания;

– характеристики бетона (состав бетона, вид применяемого цемента, наличие добавок);

– условия последующего выдерживания (нормальное или воздушно-сухое);

– модульные характеристики прогреваемого элемента (модуль поверхности и модуль массоотдачи).

Сочетание вышеперечисленных факторов предопределяет выбор режимов электротермообработки бетона. На рис. 30 предложены возможные схемы тепловой обработки изделий и конструкций инфракрасными нагревателями.

Режим, изображенный на рис. 30, *а*, не учитывающий нарастание прочности бетона при его остывании, состоит из двух этапов (подъем температуры и изотермический прогрев) и применяется при электротермообработке тонкостенных конструк-

ций, выполняемых в металлической опалубке, с $М_п > 15$ и модулем массоотдачи 0,04–1,0 $м^{-1}$.

Режим, изображенный на рис. 30, *б*, учитывает нарастание прочности бетона при остывании конструкций. Он состоит из трех этапов (подъем температуры, изотерма, остывание) и обеспечивает проектную прочность к концу остывания. Применяется режим для электротермообработки пространственных конструкций с $М_п = 6–15$ и модулем массоотдачи 1,5–10 $м^{-1}$.

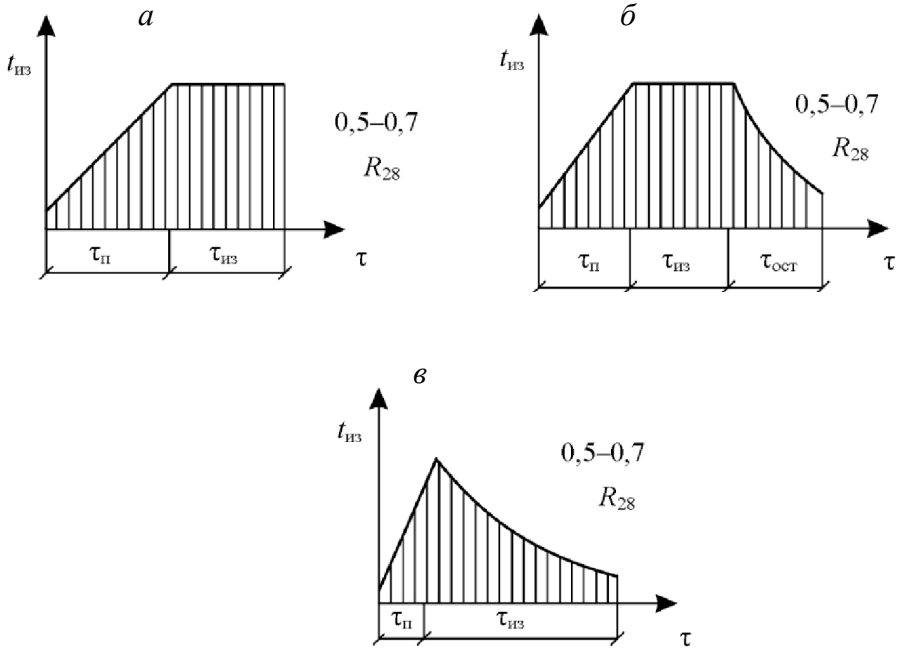


Рис. 30. Режимы термообработки бетона с получением прочности 50–70 % от R_{28}:

а – режим, не учитывающий нарастание прочности; *б* – режим, учитывающий нарастание прочности; *в* – термос; $\tau_п$ – подъем температуры; $\tau_{из}$ – изотермический прогрев; $\tau_{ост}$ – продолжительность остывания изделия

Режим, изображенный на рис. 30, *в*, учитывает нарастание прочности при подъеме и свободном остывании изделий и конструкций (термос), рекомендуется для массивных элементов с $М_п$ до 6 и модулем массоотдачи 1,5–10 $м^{-1}$.

Одним из главных недостатков метода электротермообработки бетона инфракрасными лучами является интенсивная массоотдача (сушка бетона) в окружающую среду. На величину массоотдачи влияют многие факторы: температура поверхности бетона, ее площадь, время электротермообработки, состав бетона, эффективность укрытия и т. д.

Потеря влаги в конструкциях с модулем массоотдачи $М_п$, $м^{-1}$, при условии получения прочности 70 % от R_{28} составляет 35–42 % от количества воды затворения. Высушивание бетона в дальнейшем приводит к недобору прочности, по сравнению с R_{28} до 25 %. При прогреве изделий, покрытых полиамидной пленкой (условие частично исключенной массоотдачи), по тем же режимам потери влаги составляют 25–30 % от воды затворения. Прочность этих бетонов в 28-суточном возрасте не уступает прочности образцов нормального хранения.

Итак, влагопотери бетонов на портландцементах до 30 % и на шлакопортландцементах до 35 % от воды затворения при инфракрасном нагреве мало отражаются на конечной прочности.

В МИСИ, под руководством профессора Н.Н. Данилова, проделана большая работа по разработке режимов инфракрасного нагрева, изучению физико-механических свойств бетонов, прогнозированию их прочности и т. д.

На рис. 31, 32 приведены графики прочности бетона сразу после прогрева в зависимости от времени и температуры изотермического прогрева пространственных плит и тонкостенных конструкций, возводимых в скользящей опалубке. Этими графиками можно пользоваться в качестве приближенных данных.

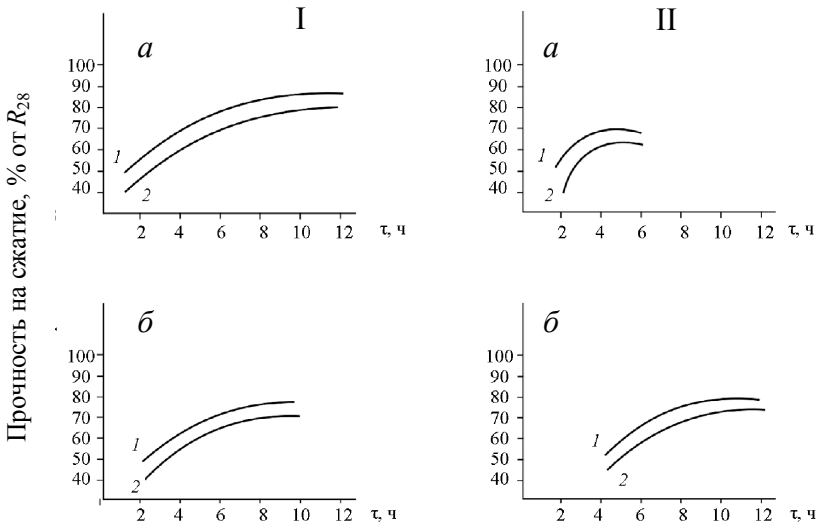


Рис. 31. График прочности бетона на портландцементе М400 сразу после прогрева:

I – в плитных элементах; II – в формуемых вертикально тонкостенных элементах; *а* – температура изотермического прогрева 98 °С; *б* – то же 80 °С; *1* – бетонная смесь с В/Ц = 0,4; *2* – бетонная смесь с В/Ц = 0,55

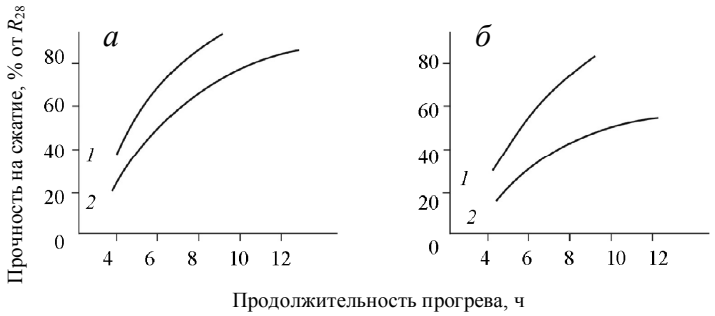


Рис. 32. График набора прочности бетона на портландцементе М400 в стенках сооружений, возводимых в скользящей опалубке с односторонней подачей лучистой энергии:

а – бетон с предварительной выдержкой; *б* – сразу после прогрева; *1* – температура изотермического прогрева 80 °С; *2* – то же 60 °С

5.4.2. Расчет электротермообработки бетона инфракрасными излучателями для сооружений, возводимых в скользящей опалубке

Общие положения

Электротермообработка бетона, возводимого в скользящей опалубке, инфракрасными лучами осуществляется локально (по мере подъема опалубки) и практически подразделяется на 4 этапа.

Инфракрасные установки монтируются по периметру скользящих форм, нагревают опалубку, затем первые слои бетона. При этом опалубка и нагреватели остаются неподвижными, т. е. $V_{оп} = V_у = 0$ (здесь $V_{оп}$ – скорость подъема опалубки, $V_у$ – скорость перемещения инфракрасных установок, м/ч).

Скользящая опалубка поднимается на высоту, равную высоте подвесных лесов, а инфракрасные установки остаются в первоначальном положении и прогревают слой бетона, равный высоте самих установок. При этом $V_{оп} > 0$; $V_у = 0$.

По мере укладки бетона опалубка скользит и поднимается по отношению к уровню уложенного бетона, увлекая за собой инфракрасные установки (синхронно). В этом случае $V_{оп} = V_у > 0$.

Дойдя до проектной отметки, опалубка останавливается, а инфракрасная установка поднимается вверх, т. е. $V_{оп} = 0$; $V_у > 0$. Скорость подъема установки на четвертом этапе не должна превышать средней скорости подъема опалубки.

Время термообработки бетона зависит от скорости перемещения инфракрасных установок и их высоты, а требуемая установочная мощность обратно пропорциональна времени термообработки:

$$\tau = \frac{h_у}{V_у},$$

где τ – время термообработки бетона; $h_у$ – высота инфракрасной установки; $V_у$ – скорость перемещения инфракрасной установки относительно бетона.

При бетонировании изделий и конструкций в скользящей опалубке каждый слой уложенного бетона будет проходить предварительную выдержку, длительность которой определяется выражением

$$\tau_{п.в} = \frac{h_л - h_у}{V_{оп}},$$

где $\tau_{п.в}$ – время предварительного выдерживания, ч; $h_л$ – высота подвижных лесов, м; время разогрева определяется по формуле

$$\tau = \frac{h_р}{h_{оп}},$$

где τ – время разогрева, ч; $h_р$ – высота зоны разогрева, м; время изотермического прогрева определяется как

$$\tau_{из} = \frac{h_{из}}{V_{оп}},$$

где $\tau_{из}$ – длительность изотермического прогрева, ч; $h_{из}$ – высота зоны изотермического прогрева, м; $\tau_{ост}$ – длительность остывания зависит от конструкции тепляка, скорости подъема форм, температуры окружающей среды, скорости ветра, местоположения нагревателей (снаружи или внутри сооружения).

При электротермообработке бетона в скользящей опалубке инфракрасными нагревателями режим прогрева бетона проходит по двум стадиям – прогрев и изотермический прогрев (см. рис. 30).

Расчет инфракрасного обогрева бетона монолитного силоса

Рассмотрим пример электротермообработки бетона инфракрасными нагревателями при возведении монолитного силоса с толщиной стенки δ = 20 см.

Исходные данные: 1) схема подачи лучистой энергии односторонняя (со стороны наружных лесов); 2) массоотдача свободная; 3) скорость подъема опалубки – 2,8 м/сут (0,12 м/ч); 4) бетон В30 на портландцементе М500 с расходом цемента 380 кг/м^3 и В/Ц = 0,5; объемный вес бетона 2400 кг/м^3; удельная теплоемкость C = 1,05 кДж/(кг·°С); 5) температура изотермического прогрева на поверхности облучения $t_{из}$ = + 80 °С; 6) на необлучаемой поверхности $t_{из}$ = +60 °С; 7) температура воздуха на наружных подвесных лесах $t_{в.н}$ = +20 °С; 8) температура воздуха на внутренних подвесных лесах $t_{в.в}$ = +7 °С; 9) прочность бетона после термообработки должна быть не менее 50 % от R_{28}. Расчет производится на 1 п. м периметра сооружения.

Согласно графику (см. рис. 32, *б*) для обеспечения набора прочности 50 % от R_{28} принимаем время изотермического прогрева 8 ч при температуре +80 °С и $t_{б.н}$ = +10 °С. Время подъема до изотермической температуры принимается 3 ч. Коэффициент теплоотдачи за счет конвекции и лучеиспускания со стороны инфракрасной установки α_1 = 11,6 Вт/(м·°С), а с противоположной стороны α_2 = 17,4 Вт/(м^2·°С) или 15 ккал/(м^2·ч·град).

Итак, для принятой скорости подъема высота зоны разогрева будет равна $h_р$ = 0,12 м/ч · 3 ч = 0,36 м, а зоны изотермического прогрева $h_{из}$ = 0,12 · 8 = 0,96 м. Объем бетона зоны разогрева $V_б^р$ = 0,36 м · 1 м · 0,2 м = 0,072 м^3, а зоны изотермического прогрева $V_б^{из}$ = 0,96 м · 1 м · 0,2 м = 0,192 м^3.

Интенсивность интегрального экзотермического выделения за период разогрева бетона и изотермического прогрева (табл. 66), соответственно, будет равна ~17 и 25 кДж/(кг·ч).

При модуле массоотдачи элемента ~10 и ожидаемой потребной энергетической оснащенности порядка 2000 ккал/(м^2·ч) по табл. 67 принимаем коэффициент массоотдачи равным 0,15.

Тогда интенсивность теплоотдачи испарением составит:

$$q_{\text{исп}} = \frac{0{,}15 \cdot 190 \cdot 536}{100} = 153 \text{ ккал/(м}^2\cdot\text{ч)},$$

$$\frac{1 \text{ ккал}}{\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C}} = 1{,}16 \text{ кВт/(м}^2\cdot{}^\circ\text{C)},$$

где $q_{\text{исп}}$ определяется как произведение количества испарившейся воды с 1 м^2 поверхности элемента в килограммах на теплоту парообразования.

Таблица 66

Тепловыделение цемента различных видов и марок в зависимости от температуры и времени твердения

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение, Дж/кг							
		Время твердения, сут							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портландцемент М300	10	8,4	25,9	41,9	83,9	125,7	188,6	230,6	272,4
	20	25,2	41,9	75,4	125,7	167,6	230,5	251,4	283,3
	40	50,3	83,8	146,7	188,6	230,5	251,4	293,3	–
	60	83,8	146,7	188,6	230,5	272,4	298,3	–	–
Портландцемент М400	5	–	–	29,3	62,9	108,9	188,4	209,5	251,4
	10	12,6	25,2	50,3	104,8	146,7	209,5	251,4	293,3
	20	41,9	66,9	104,8	167,6	209,5	272,4	314,3	335,2
	40	83,7	133,9	188,6	230,5	272,4	314,3	335,2	–
	60	129,8	188,4	230,5	272,4	314,3	335,2	–	–
Портландцемент М500	5	12,6	25,2	41,9	88,8	125,7	188,6	230,5	272,4
	10	25,2	41,9	62,9	104,8	167,6	251,4	393,3	314,3
	20	41,9	83,8	125,7	188,6	251,4	293,3	335,2	377,1
	40	104,8	167,6	209,5	272,4	293,3	356,2	377,1	–
	60	188,6	230,5	272,4	314,3	356,2	377	–	–
БТЦ М600	10	33,5	50,3	75,4	125,7	167,6	372,4	335,2	377,1
	20	62,9	104,8	146,7	209,5	293,3	335,2	377,1	419
	40	117,3	188,6	230,5	293,3	335,2	377,1	419	–
	60	209,5	251,4	293,3	335,2	377,1	419	–	–

Окончание табл. 66

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение, Дж/кг							
		Время твердения, сут							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
ШПЦ М300	10	–	25,2	33,5	62,9	104,8	167,6	209,5	230,5
	20	–	33,5	62,9	125,7	146,7	209,5	251,4	272,4
	40	41,9	75,4	117,3	167,6	209,5	251,4	272,4	–
	60	62,9	104,8	146,7	209,5	230,5	272,4	–	–

Таблица 67

Условный коэффициент массоотдачи

Модуль испарения		Условная массоотдача									
		свободная				частично исключенная					
		Энергетическая оснащенность, ккал/(м^2·ч) (Вт/м·ч)									
		1720		4300		1720			4300		
Бетон не имеет структурной прочности											
10,00		1,01		1,9		0,15			0,52		
5,00		0,72		1,33		0,13			0,44		
3,3		0,63		1,10		0,12			0,40		
2,5		0,58		1,01		0,10			0,36		
Бетон имеет начальную структурную прочность											
31	0,28	0,14	0,09	0,52	0,36	0,17	0,15	0,09	0,05	0,38	0,23
13,3	0,19	0,13	0,08	0,80	0,21	0,12	0,08	0,04	0,03	0,19	0,10

Составим уравнение теплового баланса с учетом допущения о равномерности прогрева всего элемента (ограниченной толщины). Тогда уравнения теплового баланса могут быть представлены следующими формулами (случай твердеющего бетона):

а) стадия подъема температуры

$$\varepsilon \cdot E_{э_1} \cdot F_п \cdot \tau + Q_{экз_1} \cdot \tau_1 = Q_{эп} + \left[\left(\alpha \cdot F_{от} + k \cdot F_п \right) \left(t_{ср_1} - t_в \right) + q_{исп} \cdot F_{от} \right] \tau_1;$$

б) стадия изотермического выдерживания

$$\varepsilon \cdot E_{э_2} \cdot F_{п} + Q_{экз_2} = \left(\alpha \cdot F_{от} + k \cdot F_{п}\right)\left(t_{из} - t_{в}\right) + q_{исп} \cdot F_{от},$$

где ε – степень черноты поверхностей (см. табл. 65); $E_{э_1}$ – энергетическая оснащенность на поверхности нагрева элемента, ккал/м^2·ч·град (Вт/(м^2·°С)); $F_{по}$ – площадь поверхности облучения, м^2; $F_{от}$ – площадь незаопалубленных поверхностей, м^2; $F_{п}$ – площадь заопалубленных поверхностей, м^2; τ_1 – время подъема температуры, ч; $Q_{экз_1}$ – экзотермия тепловыделения в теле бетона при $t_{ср}$, Вт/ч; $Q_{экз_2}$ – экзотермия тепловыделения при изотермической температуре, Вт/ч; $Q_{эл}$ – тепло, необходимое для разогрева бетонного элемента, Вт; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м^2·К; k – коэффициент теплопередачи, Вт/м^2·К; $t_{ср_1}$ – средняя температура на стадии подъема температуры от начальной до изотермической, °С; $t_{из}$ – температура (изотермическая) поверхности нагрева элемента, °С; $t_{в}$ – температура окружающего воздуха, °С; $q_{исп}$ – интенсивность теплоотдачи испарением с 1 м^2 открытых бетонных поверхностей, Вт/(м·ч).

Из уравнения теплового баланса определяем потребную энергетическую оснащенность на поверхности опалубки для зоны разогрева:

$$E_{э_1} = \frac{0,75}{0,8 \cdot 0,36 \cdot 3} \times$$

$$\times \left\{ \begin{array}{l} 0,25 \cdot 2400 \cdot 0,072 \cdot 70 + \\ + \left[\begin{array}{l} 10 \dfrac{0,72}{2} \left(\dfrac{80+10}{2} - 20 \right) - 15 \dfrac{0,72}{2} \left(\dfrac{80+10}{2} - 7 \right) + 153 \cdot 0,72 - \\ - 4 \cdot 380 \cdot 0,072 \end{array} \right] \end{array} \right\} =$$

$$= 3382 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)},$$

т. е. 3923 Вт/(м^2·°С) (1 ккал = 1,16 кВт);

$$E_{э_2} = \frac{1,25}{0,8 \cdot 0,96} \times$$

$$\times \left[10 \frac{1,92}{2} (80 - 20) + 15 \frac{1,92}{2} (60 - 7) + 170 \cdot 1,92 + 170 \cdot 1,92 - \right.$$

$$\left. - 6 \cdot 980 \cdot 0,192 \right] =$$

$$= 1150 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)},$$

т. е. 1334 Вт/(м^2·°С) (1 ккал = 1,16 кВт).

В качестве нагревателей принимаем металлические трубчатые типа НВСЖ (нагреватель воздушный сушильный жаростойкий) диаметром 18 мм в количестве 4 шт. на 1 пог. м. Рефлектор выполнен из алюминия (окисленный $\varepsilon = 0,2$).

Задаемся параметрами инфракрасного излучателя: среднее расстояние между излучателями 30–35 см, между излучателем и отражающей поверхностью 5 см и между отражающей поверхностью 25 см.

Стенки резервуара имеют плоскопараллельные поверхности поглощения и отражения расположенных между ними трубчатых излучателей (рис. 33).

Средний коэффициент облученности определяется выражением

$$\varphi_{1-2-3} = \varphi_{1-2} + \left[(1 - \varepsilon_3) \varphi_{1-3} \cdot \varphi_{3-2} - \varphi_{3-1} \right],$$

где φ_{1-2}; φ_{1-3}; φ_{3-1}; φ_{3-2} принимаются согласно формулам (см. табл. 65); ε_3 – степень черноты поверхности отражения (принимается согласно данным табл. 65).

Вычисляем средний коэффициент облученности системы:

– для зоны разогрева бетона

$$\varphi_{1-2-3}^{раз} = 0,65;$$

– для зоны изотермического прогрева

$$\varphi_{1-2-3}^{из} = 0,32.$$

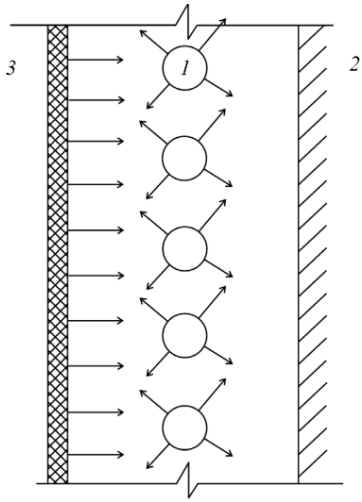


Рис. 33. К определению коэффициента облученности в системе:
1 – трубчатые излучатели; *2* – поверхность нагрева; *3* – поверхность отражения

Тогда минимальная мощность определяется:

$$N_{\text{у}} = 1{,}16\frac{E_{\text{э.пов}}}{k \cdot \varphi} F,$$

где $N_{\text{у}}$ – необходимая электрическая мощность инфракрасной установки, Вт; 1,16 – коэффициент перевода ккал/(м$^2 \cdot$ ч) в Вт/м^2; k – коэффициент, учитывающий количество лучистой энергии, генерируемой инфракрасными излучателями, от общей энергии, подводимой к ним; φ – коэффициент облученности, показывающий, какая доля общей лучистой энергии, генерируемой инфракрасными излучателями, падает на поверхность нагрева; F – поверхность нагрева, м^2;

$$N_{\text{у}}^{\text{раз}} = 1{,}16\frac{3382}{0{,}8 \cdot 0{,}65} 0{,}36 = 2716 \text{ Вт};$$

$$N_{\text{у}}^{\text{из}} = 1,16\frac{1150}{0,8\cdot 0,32}0,96 = 5002,5 \text{ Вт.}$$

Итак, общая мощность инфракрасной установки (на погонный метр периметра сооружения) составит:

$$N_{\text{у}} = 2,72 + 5,0 = 7,72 \text{ кВт.}$$

На рис. 34 дана схема инфракрасной установки, которая состоит из двух зон (обеспечивающей разогрев и обеспечивающей изотермический прогрев).

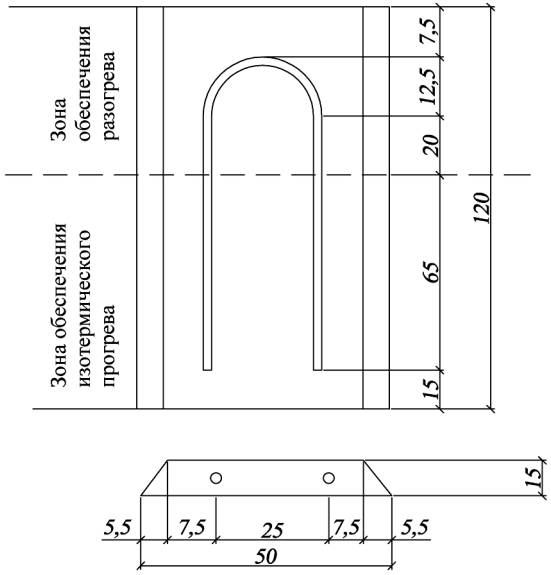
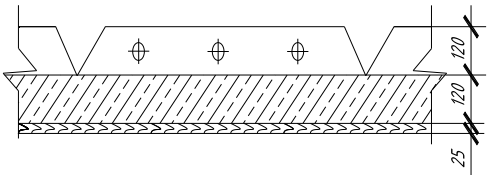


Рис. 34. Конструктивная схема инфракрасной установки

Зная потребную мощность, геометрические размеры конструкции, запроектируем инфракрасную установку: на 1 п. м периметра сооружения принимаем две инфракрасные установки размером 50×120 см, оснащенные U-образным излучателем с развернутой длиной 294 см и погонной мощностью N = 1,3 кВт.

Расчет параметров инфракрасной установки для обогрева железобетонной плиты перекрытия

Исходные данные:



Толщина перекрытия	0,12 м
Температура наружного воздуха	$t_{н.в} = –20$ °С
Температура бетона на стадии изотермического прогрева на облучаемой поверхности	$t_{из} = 80$ °С
Температура бетона на стадии изотермического прогрева на опалубленной поверхности	$t'_{из} = 70$ °С
Начальная температура бетона	$t_{б.н} = +10$ °С
Плита обогревается с неопалубленной стороны с помощью инфракрасных установок типа «короб», отражатель выполнен из полированного алюминия:	
– размеры в плане $a_1 \times a_2$	0,9×1,12 м
– высотой	$h = 0,12$ м
Опалубка деревянная:	
– толщина	0,0025 м
– объемная масса	$\gamma_{оп} = 700$ кг/м^3
– удельная теплоемкость	$C_{оп} = 2,72$кДж/(кг·°С)
– коэффициент теплопередачи	$K_{оп} = 5,2$ Вт/(м^2·°С)
Бетон объемной массы	$\gamma_б = 2400$ кг/м^3
Удельная теплоемкость бетона	$C_б = 1,047$кДж/(кг·°С)
Удельная теплоемкость арматуры	$C_а = 0,48$ кДж/(кг·°С)
Расход арматуры	$P_а = 150$ кг/м^3

Решение:

1. Определим среднюю температуру бетона за период разогрева:

$$t_{\text{б.ср}}^{\text{п}} = \frac{t_{\text{из}} + t_{\text{б.н}}}{2} = \frac{80+10}{2} = 45 \ ^\circ\text{C}.$$

2. Определим среднюю температуру бетона за период изотермического прогрева:

$$t_{\text{б.ср}}^{\text{из}} = \frac{t'_{\text{из}} + t_{\text{из}}}{2} = \frac{70+80}{2} = 75 \ ^\circ\text{C}.$$

3. Температура инфракрасной установки составит в период разогрева:

$$t_{\text{у}}^{\text{п}} = \frac{t_{\text{б.ср}}^{\text{п}} + t_{\text{н.в}}}{2} = \frac{45-20}{2} = 12,5 \ ^\circ\text{C}.$$

4. Температура инфракрасной установки составит в период изотермического прогрева:

$$t_{\text{у}}^{\text{из}} = \frac{t_{\text{б.ср}}^{\text{из}} + t_{\text{н.в}}}{2} = \frac{75-20}{2} = 27,5 \ ^\circ\text{C}.$$

5. Коэффициент теплоотдачи облучаемой поверхности в период разогрева составит:

$$\alpha_0^{\text{п}} = \frac{4,62}{t_{\text{б.ср}}^{\text{п}} + t_{\text{н.в}}} \left[\left(\frac{273 + t_{\text{б.ср}}^{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{н.в}}}{100} \right)^4 \right] + 2,91 \cdot 10^{-4} \frac{1}{h^2} \times$$

$$\times \frac{546 + t_{\text{б.ср}}^{\text{п}} + t_{\text{у}}^{\text{п}}}{t_{\text{б.ср}}^{\text{п}} - t_{\text{у}}^{\text{п}}} = \frac{4,62}{45+20} \left[\left(\frac{273+45}{100} \right)^4 - \left(\frac{273-20}{100} \right)^4 \right] + 2,91 \cdot 10^{-4} \times$$

$$\times \frac{1}{0,12^2} \frac{546+45+12,5}{45-12,5} = 4,73 \ \text{Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

6. Коэффициент теплоотдачи облучаемой поверхности в период изотермического прогрева равен:

$$\alpha_0^{\text{из}} = \frac{4,62}{t_{\text{б.ср}}^{\text{из}} + t_{\text{н.в}}}\left[\left(\frac{273 + t_{\text{б.ср}}^{\text{из}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{н.в}}}{100}\right)^4\right] + 2,91 \cdot 10^{-4} \frac{1}{h^2} \times$$

$$\times \frac{546 + t_{\text{б.ср}}^{\text{из}} + t_{\text{у}}^{\text{из}}}{t_{\text{б.ср}}^{\text{из}} - t_{\text{у}}^{\text{из}}} = \frac{4,62}{75 + 20}\left[\left(\frac{273 + 75}{100}\right)^4 - \left(\frac{273 - 20}{100}\right)^4\right] + 2,91 \cdot 10^{-4} \times$$

$$\times \frac{1}{0,12^2} \frac{546 + 75 + 27,5}{75 - 27,5} = 5,41 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

7. Объем бетона, прогреваемого одним коробом:

$$V_{\text{б}} = 0,9 \cdot 1,12 \cdot 0,12 = 0,121 \text{ м}^3.$$

8. Площадь конструкции, обогреваемая одним коробом:

$$F_0 = F_{\text{оп}} = 0,9 \cdot 1,12 = 1,008 \text{ м}^2.$$

9. Масса арматурной стали в прогреваемом бетоне:

$$m_a = P_a \cdot V_{\text{б}} = 150 \cdot 0,121 = 18,15 \text{ кг}.$$

10. Мощность, требуемая на период разогрева бетона одним коробом:

$$P_n = 2,78 \cdot 10^{-4}\left(C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot V_{\text{б}} + C_{\text{а}} \cdot \gamma_{\text{а}} \cdot m_{\text{а}} + C_{\text{оп}} \cdot \gamma_{\text{оп}} \cdot \delta_{\text{оп}} \cdot F_{\text{оп}}\right)\frac{t_{\text{б.ср}}^{\text{п}} - t_{\text{б.н}}}{\tau_{\text{п}}} +$$

$$+\left(\alpha_0^{\text{п}} \cdot F_0 + K \cdot F_{\text{оп}}\right)\left(t_{\text{б.ср}}^{\text{п}} - t_{\text{н.в}}\right) - 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Ц} \cdot V_{\text{б}} \frac{\text{Э}_{\text{п}}}{\tau_{\text{п}}} =$$

$$= 2,78 \cdot 10^{-4}\left(\begin{array}{l} 1,047 \cdot 10^3 \cdot 2400 \cdot 0,121 + 0,48 \cdot 10^3 \cdot 18,15 + \\ + \ 2,72 \cdot 10^3 \cdot 700 \cdot 0,025 \cdot 1,008 \end{array}\right) \times$$

$$\times \frac{45 - 10}{4} + \left(4,73 \cdot 1,008 + 5,2 \cdot 1,008\right)\left(45 - 20\right) + 0 = 1530 \text{ Вт}.$$

11. Мощность, требуемая на период изотермического прогрева бетона одним коробом:

$$P_{\text{п}} = \alpha_0^{\text{п}} \cdot F_0 \left(t_{\text{из}} - t_{\text{н.в}}\right) + K \cdot F_{\text{оп}} \left(t'_{\text{из}} - t_{\text{н.в}}\right) - 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 4,73 \cdot 1,008 \times$$
$$\times \left(80 + 20\right) + 5,25 + 1,008\left(70 + 20\right) = 848 \text{ В}.$$

12. По табл. 65 находим степень черноты:

$$\varepsilon = 0,65–0,85 \text{ принимаем } \varepsilon = 0,7.$$

13. Энергетическая освещенность, требуемая на стадии разогрева:

$$E_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}}}{F_0 \cdot \varepsilon} = \frac{1530}{1,008 \cdot 0,7} = 2168 \text{ Вт/м}^2.$$

14. Энергетическая освещенность, требуемая на стадии разогрева:

$$E_{\text{из}} = \frac{P_{\text{из}}}{F_0 \cdot \varepsilon} = \frac{848}{1,008 \cdot 0,7} = 1200 \text{ Вт/м}^2.$$

Принимаем для дальнейших расчетов $E_{\text{из}} = 2,17$ кВт/м^2.

15. Задаемся следующими параметрами инфракрасной установки. Разместим под коробом три ТЭНа, диаметром 18 мм, с расстоянием между ними $S = 300$ мм. Тогда

$$\frac{S}{d} = \frac{300}{18} = 16,7; \quad \frac{a_1}{h} = \frac{900}{120} = 7,5; \quad \frac{a_2}{h} = \frac{1120}{120} = 9,3.$$

Используя правило интерполяции, по табл. П.4.8, найдем $\varphi_{\text{и-п}}$ и $\varphi_{\text{и-о}}$ – долю лучистого потока, передаваемую от излучателей, соответственно, на облучаемую и отражающую поверхность:

$$\varphi_{\text{и-п}} = \varphi_{\text{и-о}} = 0,481; \quad \varphi_{\text{о-и}} = 0,101.$$

Используя правило интерполяции, по табл. П.4.9, найдем $\varphi_{о\text{-}п}$ – долю лучистого потока, передаваемую от отражателя на облучаемую поверхность.

$$\varphi_{о\text{-}п} = 0{,}77.$$

16. По табл. 65 для полированного алюминия находим:

$$\varepsilon_о = 0{,}04–0{,}06, \text{ принимаем } \varepsilon_о = 0{,}05.$$

17. Определим коэффициент облученности, показывающий, какая доля лучистого потока, создаваемого излучателями, воспринимается облучаемой поверхностью:

$$\varphi = \varphi_{и\text{-}п} + \left[\left(1-\varepsilon_0\right)\varphi_{и\text{-}о}\cdot\varphi_{о\text{-}п} - \varphi_{о\text{-}и}\right] =$$

$$= 0{,}481 + \left[\left(1-0{,}05\right)0{,}481\cdot 0{,}77 - 0{,}101\right] = 0{,}731.$$

18. Находим мощность инфракрасной установки, необходимую для создания требуемой освещенности на облучаемой поверхности конструкции:

$$P_{уст} = \frac{E_п}{\varphi}F_0 = \frac{2{,}17}{0{,}731}1{,}008 = 2{,}97 \text{ кВт}.$$

19. Принимаем ТЭНы с погонной мощностью

$$N = \frac{P_{уст}}{3\cdot a_1} = \frac{2{,}97}{3\cdot 1{,}12} = 0{,}9 \text{ кВт/м}.$$

5.5. Индукционный нагрев бетона

Область применения

Областью применения индукционного прогрева монолитных конструкций являются колонны, балки, прогоны, свайные ростверки, стены, перекрытия с модулем поверхности $М_п$ = 6–10, бетони-

рование которых производится при минимальной температуре воздуха до –15 °С.

Индукционный нагрев рационален для термообработки бетона монолитных железобетонных каркасных конструкций, протяженных по одной из осей: колонн, ригелей, балок и пр., замоноличивания стыков каркасных конструкций, а также и сооружения, возводящихся в скользящих, подъемно-переставных и катучих опалубках: стволов труб, силосов, ядер жесткости и др.

Сущность метода

Индукционный способ термообработки бетона основан на использовании магнитной составляющей переменного электромагнитного поля для нагрева стали вследствие теплового действия электрического тока, наводимого электромагнитной индукцией.

При индукционном нагреве энергия переменного электромагнитного поля преобразуется в арматуре или стальной опалубке в тепловую и передается за счет теплопроводности бетону.

В зависимости от вида и конструктивных особенностей железобетонных конструкций, термообработка их индукционным способом может осуществляться по одной из двух принципиальных схем: 1) по схеме индуктивной катушки с железом; 2) по схеме трансформатора с сердечником.

Схема индуктивной катушки с железом имеет место в том случае, когда элемент железобетонной конструкции в процессе термообработки находится в полости индукционной обмотки, выполненной в виде цилиндрического, прямоугольного, трапециевидного и тому подобного соленоида. При термообработке по этой схеме тепло в основном выделяется в ферромагнитных элементах (арматура, жесткий каркас, стальная опалубка, форма), направление которых совпадает с направлением оси соленоида. Незначительная часть тепла выделяется в металлических замкнутых элементах (хомуты, арматура, опалубка), плоскость которых перпендикулярна оси соленоида.

Схема трансформатора с сердечником имеет место в том случае, когда в полости железобетонного изделия или сооружения расположен магнитопровод (или группа магнитопроводов) с индукционной обмоткой. Здесь тепло в основном выделяется в электрически замкнутых металлических элементах (замкнутая металлическая форма, опалубка, арматурные хомуты, кольцевая арматура и т. д.), плоскость которых перпендикулярна оси магнитопровода.

5.5.1. Методика расчета параметров режима индукционного нагрева бетона

Интенсивность тепловыделения источников тепла при индукционном нагреве не зависит от свойств бетона, а определяется электрическими и магнитными свойствами источника (арматурой, опалубкой, формой, стенкой камеры) и напряженностью магнитного поля.

Электромагнитные поля с большими периметрами могут быть получены с помощью многовитковых катушек-индукторов из хорошо проводящего материала. Вихревые токи, возникающие в опалубке и арматуре, циркулируют не по всей ее толще. По мере проникновения вглубь электромагнитная волна затухает, поэтому плотность тока и напряженность полей имеют наибольшие значения у поверхности металла.

Электромагнитная волна с частотой f, падающая на поверхность металла, имеющего удельное электросопротивление ρ_s и магнитную проницаемость μ_1, затухает в поверхностном слое толщиной ΔS, см (ΔS – глубина проникновения тока в металл):

$$\Delta S = 5030\sqrt{\frac{\rho_s}{\mu_1 \cdot f}}.$$

С единицы поверхности металла, удельное сопротивление которой ρ, а относительная магнитная проницаемость μ, нахо-

дящейся в переменном магнитном поле с частотой f, напряженностью H, выделяется активная мощность ($\Delta P_а$), Вт/см^2,

$$\Delta P_а = \rho_н \cdot H^2,$$

где $\rho_н$ имеет физический смысл удельного поверхностного электрического сопротивления материала загрузки:

$$\rho_н = \frac{\rho}{\Delta S} = 2 \cdot 10^{-4} \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} \ \text{Ом}.$$

Зная ρ, μ и f, можно определить напряженность поля H, которую необходимо создать, чтобы выделить в металле требуемую мощность $\Delta P_а$. Однако μ является функцией напряженности поля. Для вычисления $\Delta P_а$ необходимо заранее знать зависимость μ от H.

Зависимость между удельным электросопротивлением материала (Ом·см), выделяемой активной мощностью (Вт/см^2) и магнитным полем напряженности (Ом/см^2) представлена на рис. 35.

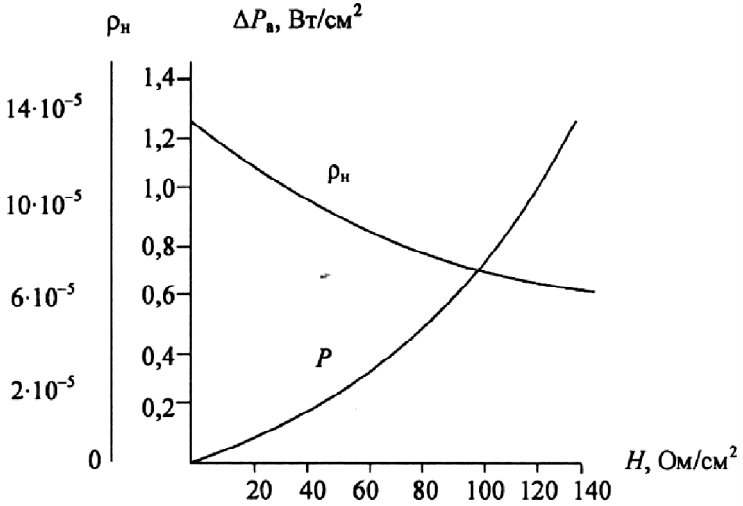


Рис. 35. Зависимость удельной мощности P и удельного поверхностного сопротивления $\rho_н$ металла от напряженности магнитного поля

Количество витков N, необходимое для создания требуемой напряженности поля, определяется по формуле

$$N = \frac{V}{Z \cdot H},$$

где Z – полное сопротивление системы индуктор-металл на единицу длины индуктора при $N = 1$, Ом; V – напряжение, подаваемое на индуктор; H – напряженность поля.

Расчет параметров индукционного прогрева

Расчет индукционного прогрева изделий и конструкций заключается в определении количества витков индуктора (N), требуемого для создания такой напряженности магнитного поля (при заданном напряжении V), при которой обеспечивалось бы снятие с единицы поверхности мощности ΔP_3, необходимой для прогрева бетона конструкций по заданному режиму.

Прежде чем запроектировать режим индукционного прогрева каркасных конструкций, необходимо знать ряд исходных данных: 1) геометрические размеры прогреваемой конструкции, м; 2) вид, марку и расход цемента (Ц), кг/м^3; 3) требуемую конечную прочность; 4) удельную теплоемкость бетона ($C_б$), Дж/(кг·°С); 5) объемный вес бетона ($\gamma_б$) кг/м^3; 6) удельную теплоемкость материала опалубки ($C_{оп}$), ее объемный вес ($\gamma_{оп}$) и толщину ($\delta_{оп}$); 7) коэффициент теплопередачи через опалубку ($K_т$), Вт/(м^2 · °С); 8) температуру наружного воздуха, ($t_{н.в}$), °С; 9) начальную температуру ($t_{б.н}$), °С; 10) скорость ветра ($V_в$), м/с; 11) схему и спецификацию арматуры.

Первый этап расчета – проектирование теплового режима. Методика проектирования режима индукционного прогрева аналогична методике проектирования режима электропрогрева конструкций средней массивности. В табл. 68 приводятся максимально допустимые скорости разогрева конструкций V_{max} индукционным методом (°С/ч).

Задаемся скоростью разогрева в зависимости от вида арматуры и опалубки, а затем рассчитываем необходимую электрическую мощность, требуемую на период разогрева ($P_р$) и изотермического прогрева ($P_{из}$).

Таблица 68

Максимально допустимые скорости разогрева конструкций V_{max} индукционным методом, град/ч

Вид армирования	Модуль поверхности конструкции		
	6	6–10	10
Прутковая арматура	$\frac{5}{5}$	$\frac{8}{8}$	$\frac{10}{10}$
Жесткий каркас	$\frac{5}{5}$	$\frac{8}{10}$	$\frac{10}{15}$
Прутковая арматура и жесткий каркас	$\frac{8}{8}$	$\frac{10}{10}$	$\frac{15}{15}$

Зная тип арматуры, установленной по проекту в конструкцию, определяем ее площадь. Здесь уместно подчеркнуть, что арматура в конструкциях применяется прутковая, в виде каркасов и металлического проката (швеллер, уголок, двутавр). Изделия и конструкции могут изготавливаться в деревянной и металлической опалубках.

Впредь мы будем рассматривать несколько схем армирования изделий и конструкций: прутковую в неметаллической опалубке; то же в металлической опалубке, прутковую арматуру и жесткий каркас в неметаллической опалубке, то же в металлической.

Распределение вихревых токов в каждом элементе арматуры не зависит от общего количества элементов, а определяется отношением $\frac{r}{\Delta S}$ или $\frac{h}{2\Delta S}$, где r – радиус цилиндрического элемента; h – толщина плоской арматуры или стенок металлической опалубки; ΔS – глубина проникновения тока. Установлено,

что H (напряженность магнитного поля), от которого зависит $\Delta P_{\text{а}}$ (активная мощность), мало изменяется по сечению конструкции. Можно отметить, что все элементы загрузки равнозначны по количеству тепла, выделенного с единицы поверхности. Арматурные каркасы и прутковая сталь (загрузка), расположенные только параллельно оси индуктора, попадают в расчет, поэтому принцип расчета индукционного нагрева конструкции не зависит от характера армирования.

Приступим к расчету площади арматуры каркасов F_s, см^2. Для прутковой арматуры конструкции в неметаллической опалубке

$$F_s = \pi \cdot d \cdot h \cdot n,$$

где d – диаметр арматурных прутков, см; h – длина арматуры в зоне индуктора, см; n – количество арматурных прутков в сечении конструкции.

Для жесткого каркаса и прутковой арматуры конструкции в неметаллической опалубке

$$F_s = \pi \cdot d \cdot h \cdot n + F_{\text{к}}^{\text{н}},$$

где $F_{\text{к}}^{\text{н}}$ – площадь наружной поверхности каркаса, см^2.

Для прутковой арматуры конструкции в металлической опалубке

$$F_s = \pi \cdot d \cdot h \cdot n + F_{\text{оп}}^{\text{н}} + F_{\text{оп}}^{\text{в}},$$

где $F_{\text{оп}}^{\text{н}}$ и $F_{\text{оп}}^{\text{в}}$ – соответственно, площади наружной и внутренней поверхностей опалубки, см^2.

Для прутковой арматуры и жесткого каркаса конструкции в металлической опалубке

$$F_s = \pi \cdot d \cdot h \cdot n + F_{\text{оп}}^{\text{н}} + F_{\text{оп}}^{\text{в}} + F_{\text{к}}^{\text{н}}.$$

При индукционном прогреве изделий и конструкций в металлической опалубке тепловыделяющими считают наружную и внутреннюю поверхности опалубки.

В металлической опалубке, выполненной из полого цельного цилиндра при толщине стенок больше глубины проникновения тока в металл (в нашем случае ΔS в зависимости от H изменяется в пределах от 0,3 до 0,55 см), магнитное поле отсутствует, т. к. электромагнитная волна затухает в толще металла. В этом случае в последних двух формулах учитывают лишь наружную поверхность опалубки.

Зная мощность разогрева конструкции, изотермического прогрева, а также площадь поверхности арматуры, определяют удельную тепловую мощность, необходимую для прогрева по заданному режиму, Вт/см^2:

$$\Delta P_{\text{р}} = \frac{P_{\text{р}}}{F_s}, \quad \Delta P_{\text{из}} = \frac{P_{\text{из}}}{F_{\text{из}}}.$$

Зная ΔP и $\Delta P_{\text{из}}$, по рис. 35 определяют требуемую напряженность магнитного поля $H_{\text{р}}$, $H_{\text{из}}$ и удельное поверхностное электросопротивление загрузки $\rho_{\text{н}}^{\text{р}}$ и $\rho_{\text{н}}^{\text{из}}$.

Как уже было отмечено, напряженность поля обусловлена электрическими параметрами и общим сопротивлением системы индуктор – загрузка. Далее определяют составляющие общего сопротивления, приводя его к единице длины индуктора.

Общее сопротивление системы индуктор – загрузка, Ом, составит:

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\omega \cdot L\right)^2},$$

где r и $\omega \cdot L$ – соответственно, активное и индуктивное сопротивления системы индуктор – загрузка. В свою очередь,

$$r = r_i + r_s;$$

$$\omega \cdot L = \omega \cdot L_1 + \omega \cdot L_s,$$

где r_i и $\omega \cdot L_1$ – соответственно, активное и индуктивное сопротивления индуктора; r_s и $\omega \cdot L_s$ – активное и индуктивное сопротивления загрузки.

Активное сопротивление цилиндрического индуктора, Ом, определяется по формуле:

$$r_i = A \cdot R_i,$$

а индуктора прямоугольного сечения:

$$r_i = \frac{A}{\pi}\left(a_i + b_i\right),$$

где $A = 1{,}26 \cdot 10^{-5}$ Ом/см – для медного провода индуктора; $A = 1{,}66 \cdot 10^{-5}$ Ом/см – для алюминиевого провода индуктора; R_i – радиус цилиндрического индуктора, равный $R_i = (R_к + \delta_{оп})$; $R_к$ – радиус конструкции, см; a_i, b_i – длины сторон сечения прямоугольного индуктора, см:

$$a_i = \left(a_к + \delta_{оп}\right);$$

$$b_i = \left(b_к + \delta_{оп}\right),$$

где $a_К$ и $b_К$ – длины сторон сечения конструкции, см.

Индуктивное сопротивление цилиндрического индуктора, Ом, равно:

$$\omega \cdot L_i = B \cdot R_i \cdot \beta,$$

а индуктора прямоугольного сечения:

$$\omega \cdot L_i = \frac{B}{\pi} a_i \cdot b_i \cdot \beta;$$

$$b_i = 1{,}24 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/см}^2,$$

где β – безразмерный коэффициент формы индуктора, который определяется по рис. 36 в зависимости от отношения длины (высоты) индуктора к его радиусу:

$$\frac{h}{R}, \text{ т. е. } \frac{h \cdot \pi}{a_i \cdot b_i}.$$

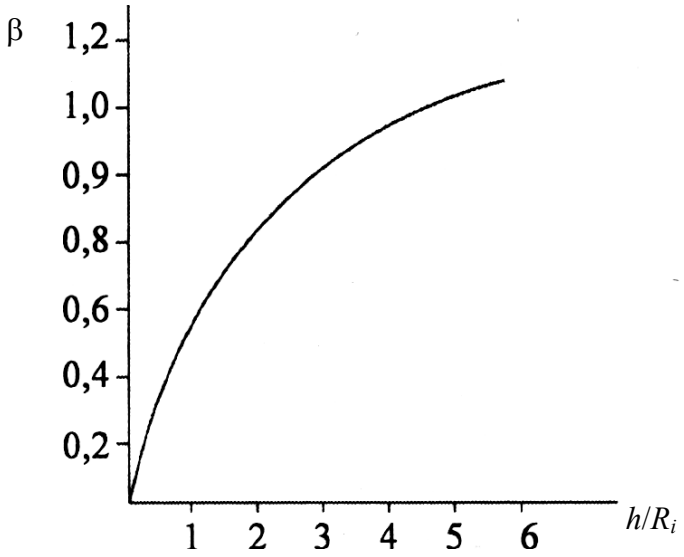


Рис. 36. Зависимость коэффициента формы β от отношения h/R_i

Активное сопротивление загрузки, Ом, определяется из формулы

$$r_s = \Pi_s \cdot \rho_{\text{н}},$$

где Π_s – сумма параметров загрузки, см.

Для прутковой арматуры конструкции в неметаллической опалубке

$$\Pi_s = \pi \cdot d_{\text{п}}.$$

Для жесткого каркаса и прутковой арматуры конструкции в неметаллической опалубке

$$\Pi_s = \pi \cdot d_{\text{п}} + \frac{F_{\text{к}}^{\text{н}}}{h}.$$

Для прутковой арматуры конструкции в металлической опалубке

$$\Pi_s = \pi \cdot d_{\text{п}} + \frac{F_{\text{оп}}^{\text{н}}}{h} + \frac{F_{\text{оп}}^{\text{в}}}{h},$$

а для прутковой арматуры и жесткого каркаса конструкции в металлической опалубке

$$\Pi_s = \pi \cdot d_{\text{п}} + \frac{F_{\text{оп}}^{\text{н}}}{h} + \frac{F_{\text{оп}}^{\text{в}}}{h} + \frac{F_{\text{к}}^{\text{в}}}{h}.$$

Учитывая, что $\rho_{\text{н}} = f(H)$, а H для разогрева и изотермического прогрева будут различными, то r_s и $\omega \cdot L_s$ тоже различны для разогрева и изотермического прогрева. Примем в дальнейшем следующие обозначения активного и индуктивного сопротивлений системы индуктор – загрузка: $r_s^{\text{р}}$, $\omega \cdot L_s^{\text{р}}$, $r_s^{\text{из}}$, $\omega \cdot L_s^{\text{из}}$. Поэтому и общее сопротивление этой системы в период разогрева $Z_{\text{р}}$ станет иным, чем в период изотермического прогрева $Z_{\text{из}}$. Вычислим $Z_{\text{р}}$ и, задаваясь произвольным напряжением $V_{\text{р}}$, определим количество витков индуктора, обеспечивающее разогрев конструкции по заданному режиму:

$$N = \frac{V_{\text{р}}}{Z_{\text{р}} \cdot H_{\text{р}}}.$$

Далее определяется сила тока ($I_{\text{р}}$), А, в индукторе при разогреве:

$$I_{\text{р}} = \frac{H_{\text{р}} \cdot h}{N}.$$

По этой величине подбирается сечение провода индуктора.

В том случае, если параметры силы тока для прогрева не устраивают строителей, то производится перерасчет. Они за-

даются допустимой силой тока $I_{доп}$, сохраняют неизменной величину $H_р$, находят число витков

$$N = \frac{H_р \cdot h}{I_{доп}}$$

и определяют необходимое напряжение, В:

$$V_р = N \cdot Z_р \cdot H_р; \quad V_р = \frac{H_р^2 \cdot Z_р \cdot h}{I_{доп}}.$$

Требуемое напряжение на период изотермического прогрева должно обеспечить напряженность поля $H_{из}$ и выделение с арматуры мощности $\Delta P_{из}$, В:

$$V_{из} = N \cdot Z_{из} \cdot H_{из}.$$

Как видно из выражения $\Delta P_а = \rho_н \cdot H^2$, тепловая мощность, выделяемая арматурой, Вт/см^2, прямо пропорциональна напряженности магнитного поля (см. рис. 36).

На основании анализа данных по производству бетонных работ с последующей индукционной обработкой было установлено, что напряженность магнитного поля по сечению индуктора изменяется незначительно. По высоте же индуктора напряженность изменяется весьма существенно, что приводит к значительной неравномерности температурного поля по высоте конструкции. Так, экспериментом было установлено, что напряженность в центре конструкции почти в два раза больше, чем по краям.

Для обеспечения равномерного напряжения по длине конструкции рекомендуется витки провода укладывать с различным шагом. Так, в центральной части конструкции, равной $^3/_5$ ее высоты (длины), витки располагают с равным шагом, а по краям расстояние между ними постепенно уменьшается (рис. 37).

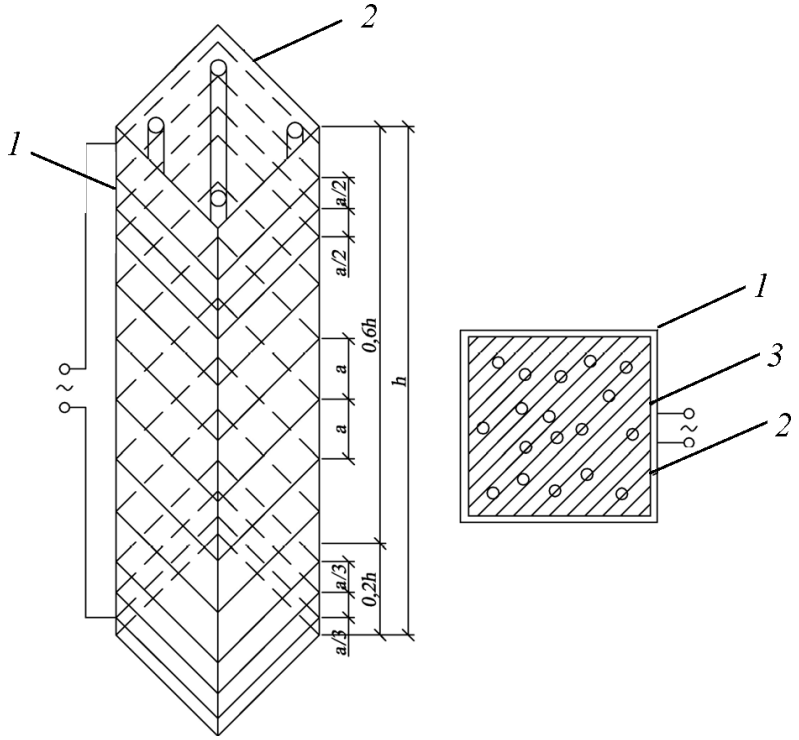


Рис. 37. Схема индукционного прогрева:
a – шаг между витками; *h* – высота индуктора; *1* – индуктор; *2* – стержневая арматура; *3* – металлическая опалубка

Далее приведены примеры расчета индукционного прогрева бетона монолитного ригеля и колонны.

5.5.2. Примеры расчета индукционного прогрева бетона

Индукционный прогрев бетона монолитного ригеля

Рассчитать параметры индукционного прогрева монолитного ригеля сечением 30×40 см, длиной 3,2 м, армированного 8 стержнями ∅ 22 мм, возводимого в деревянной опалубке тол-

щиной 40 мм при начальной температуре бетона +10 °С, температуре наружного воздуха –20 °С, скорости ветра 5 м/с. Бетон класса В22,5 приготовлен на портландцементе М500 (расход 360 кг/м^3). Требуемая относительная прочность к концу прогрева – 50 % от R_{28}. Кроме того, дано:

$C_б$ = 0,25 ккал/(кг·°С), т. е. 1,05 кДж/(кг·°С);

$C_{оп}$ = 0,65 ккал/(кг·°С), т. е. 2,73 кДж/(кг·°С);

$\gamma_б$ = 2400 кг/м^3; $\gamma_{оп}$ = 700 кг/м^3.

На основе заданных параметров устанавливаем, что средняя температура бетона в период разогрева составит:

$$t_{ср}^{р} = \frac{t_{б.н} + t_{max}}{2} = \frac{10 + 70}{2} = 40 \ °С,$$

в период изотермического прогрева $t_{ср}^{из} = t_{max}$ = +70 °С, а в период остывания по формуле для $М_п$ = 8–12 м$^{-1}$, $t_{ср}^{ост} = \frac{t_{б.н}^{к}}{3}$,

$$t_{ср}^{ост} = \frac{t_{max}}{3} = \frac{70}{3} = 23,3 \ °С,$$

тогда средневзвешенная температура всего процесса термообработки будет равна:

$$t_{ср.взв} = \frac{t_{ср}^{р} \cdot \tau_р + t_{ср}^{из} \cdot \tau_{из} + t_{ср}^{ост} \cdot \tau_{ост}}{\tau_р + \tau_{из} + \tau_{ост}} = \frac{40 \cdot 4 + 70 \cdot 4 + 23,3 \cdot 30}{4 + 4 + 30} = 30 \ °С.$$

По табл. 66 находим, что для портландцемента М500 при t = 30 °С максимальное тепловыделение цемента Q_{max} составит 92,5 ккал/кг, а коэффициент темпа выделения (B) – 0,07, значит

$$P_р = \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{C_б \gamma_б \delta_{оп}}{864} + \dfrac{C_{оп} \cdot \gamma_{оп} \cdot \delta_{оп} \cdot М_п}{864 \cdot \tau_р} \left(\dfrac{t_{max}}{2} - t_{н.в} \right) + \dfrac{\alpha \cdot K \cdot М_п}{864} \times \\ \times \left(\dfrac{t_{max} + t_б}{2} - t_{н.в} \right) - \dfrac{Q_{max} \cdot Ц}{864 (t_{max} - t_{б.н})} \left[1 - \left(B \cdot \tau_р + 1 \right) \exp^{-\beta \cdot \tau_р} \right] \end{array} \right\} V \text{ кВт.}$$

(Q_{max} и B берем из прил. 15, а α и K – из прил. 16 и 17).

$$P_{\text{р}} = \frac{0,25 \cdot 2400 \cdot 0,4}{864} + \frac{0,65 \cdot 700 \cdot 0,04 \cdot 12}{864 \cdot 4}\left(\frac{70}{2} - (-20)\right) +$$

$$+ \frac{1,3 \cdot 3,8 \cdot 12}{864}\left(\frac{70+10}{2} - (-20)\right) - \frac{92 \cdot 360}{86470 - (-10)} \times$$

$$\times\left[1 - (0,07 \cdot 4 + 1)2,718\right]0,4 = 7240 \text{ Вт}.$$

Определяем мощность, потребную для изотермии:

$$P_{\text{из}} = \left\{ \frac{\alpha \cdot K \cdot \text{М}_{\text{п}}\left(t_{\text{из}} - t_{\text{н.в}}\right)}{864} - \frac{\text{Ц}}{864 \cdot \tau_{\text{из}}}\left(Q_{\max} - Q_{\text{р}}\right) \times \right.$$

$$\left. \left[1 - \left(B \cdot \tau_{\text{из}} + 1\right)\exp^{-\beta\tau_{\text{из}}}\right] \right\} V, \text{ кВт}.$$

Подставляя исходные данные в формулу, получим $P_{\text{из}}$ = = 2218 Вт.

Определим теперь площадь поверхности металла

$$F_s = \pi \cdot 2,2 \cdot 320 \cdot 8 = 17684 \text{ см}^2,$$

где $\pi = 3,14$.

Тогда потребная удельная мощность источника тепла, которым в данном случае является прутковая арматура, на период разогрева составит:

$$\Delta P_{\text{р}} = \frac{7240}{17684} = 0,409 \text{ Вт/см}^3,$$

а на период изометрического прогрева

$$\Delta P_{\text{из}} = \frac{2218}{17684} = 0,125 \text{ Вт/см}^2.$$

Найдем по рис. 35:

$$H_{\text{р}} \approx 80 \text{ А/см}; \quad \rho_{\text{н}}^{\text{из}} = 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

$$H_{\text{из}} \approx 45 \text{ А/см}; \quad \rho_{\text{н}}^{\text{из}} = 8,0 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Определим электрическое сопротивление системы индуктор – загрузка. Активное сопротивление индуктора (в случае использования провода с медной жилой) будет равно:

$$\tau' = \frac{1,26}{\pi} 10^{-5} \left(30 + 4 + 40 + 4\right) = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление индуктора

$$\omega \cdot L_i = \frac{1,24}{\pi} 10^{-5} \left(30 + 4\right)\left(40 + 4\right)\beta.$$

По рис. 36 находим, что для $\frac{h}{R_1} = \frac{320}{40 + 4} \approx 7,2$. Этому числу соответствует коэффициент $\beta = 0,98$, тогда

$$\omega \cdot L_i = \frac{1,24}{\pi} 10^{-5} \left(30 + 4\right)\left(40 + 4\right) 0,98 = 5,71 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление загрузки, периметр которого равен:

$$\Pi_s = \pi \cdot 2,2 \cdot 8 = 55,26 \text{ см},$$

составит для периода разогрева

$$r_s^{\text{р}} = 55,26 \cdot 6,7 \cdot 10^{-5} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом},$$

а для периода изометрического прогрева

$$r_s^{\text{из}} = 55,26 \cdot 8 \cdot 10^{-5} = 4,42 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Соответственно индуктивное сопротивление загрузки будет на период разогрева

$$\omega \cdot L_s^{\text{р}} = r_s^{\text{р}} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом},$$

а для периода изометрического прогрева

$$\omega \cdot L_s^{\text{из}} = r_s^{\text{из}} = 4,42 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Тогда активное сопротивление системы индуктор – загрузка составит на период разогрева

$$r_{\text{р}} = r_i + r_s^{\text{р}} = (0,31 + 3,7)10^{-3} = 4,01 \cdot 10^{-3} \text{ Ом,}$$

а для периода изометрического прогрева

$$r_{\text{из}} = r_i + r_s^{\text{из}} = (0,31 + 4,42)10^{-3} = 4,73 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Аналогичное индуктивное сопротивление системы индуктор – загрузка составит на период разогрева

$$\omega \cdot L_{\text{р}} = \omega \cdot L_i + \omega \cdot L_s^{\text{р}} = 5,71 \cdot 10^{-3} + 3,7 \cdot 10^{-3} = 9,41 \cdot 10^{-3} \text{ Ом,}$$

а на период изометрического прогрева

$$\omega \cdot L_{\text{из}} = \omega \cdot L_i + \omega \cdot L_s^{\text{из}} = 5,71 \cdot 10^{-3} + 4,42 \cdot 10^{-3} = 10,13 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Следовательно, общее сопротивление нашей системы в период разогрева будет равно:

$$Z_{\text{р}} = \sqrt{\left(4,01 \cdot 10^{-3}\right)^2 + \left(9,41 \cdot 10^{-3}\right)^2} = 10,22 \cdot 10^{-3},$$

а для периода изометрического прогрева

$$Z_{\text{из}} = \sqrt{\left(4,73 \cdot 10^{-3}\right)^2 + \left(10,13 \cdot 10^{-3}\right)^2} = 11,18 \cdot 10^{-3}.$$

Задаваясь напряжением (V = 60 В), определим количество витков индуктора

$$N = \frac{60}{80 \cdot 10,22 \cdot 10^{-3}} = 74.$$

Тогда ожидаемая сила тока будет равна:

$$I_{\text{р}} = \frac{80 \cdot 320}{74} = \frac{25600}{74} = 345 \text{ А}.$$

Для пропуска такого тока потребуется провод с медной жилой сечением 90 мм^2. Предположим, мы имеем провод сечением лишь 50 мм на номинальную нагрузку 215 А. Тогда, задавая $I_{\text{доп}} = 215$ А и сохраняя $H_{\text{р}} = 80$ А/см, получим:

$$N = \frac{80 \cdot 320}{215} = 120.$$

Для сохранения $H_{\text{р}} = 80$ А/см при $N = 120$ витков необходимо на период разогрева подвести напряжение

$$V_{\text{р}} = 120 \cdot 80 \cdot 10,22 \cdot 10^{-3} \approx 100 \text{ В}.$$

В период изотермического прогрева при $N = 120$, $H_{\text{из}} = 45$ А/см и $Z_{\text{из}} = 11,18 \cdot 10^{-3}$ Ом на индуктор необходимо подать напряжение

$$V_{\text{из}} = 120 \cdot 45 \cdot 11,18 \cdot 10^{-3} \approx 60 \text{ В}.$$

При этом сила тока в индукторе будет равна:

$$I_{\text{из}} = \frac{45 \cdot 320}{120} = 120 \text{ А}.$$

Индукционный прогрев бетона монолитной колонны

Исходные данные:

Город	г. Томск
Месяц	февраль
Начальная температура прогрева бетона	$t_{\text{б.н}} = +5$ °С
Температура изотермическая	$t_{\text{из}} = +70$ °С
Время перевозки	$\tau_{\text{тр}} = 30$ мин
Высота подъема краном	$H_{\text{под}} = 6$ м
Марка автомобиля	МАЗ-503

Время укладки	$\tau_{укл}$ = 10 мин
Тип опалубки	I
Класс бетона	В15
Расход цемента	Ц = 350 кг/м^3
Марка цемента	М400
Требуемая прочность к окончанию прогрева	50 % от R_{28}
Колонна армирована:	
стержнями	4 ∅ 30 мм
жесткий каркас из швеллеров	2 № 16

Решение:

1. Определим объем бетона в конструкции:

$$V_б = 3 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}6 = 1{,}08 \text{ м}^3.$$

2. Рассчитаем поверхность охлаждения конструкции:

$$F_{охл} = 4 \cdot 0{,}6 \cdot 3 + 0{,}6 \cdot 0{,}6 = 7{,}56 \text{ м}^2.$$

3. Определим модуль поверхности конструкции:

$$М_п = \frac{F_{охл}}{V_б} = \frac{7{,}56}{1{,}08} = 7 \text{ м}^{-1}.$$

4. Определим суммарное относительное снижения температуры бетонной смеси при всех операциях: транспортировании, перегрузке, укладке и уплотнении.

4.1. При транспортировании:

$$\Delta t_{тр} = \Delta t'_{тр} \cdot \tau_{тр} = 0{,}0025 \cdot 30 = 0{,}075 \text{ °С/°С},$$

где $\Delta t'_{тр}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при транспортировке (табл. П.4.1).

4.2. При перемещении краном:

$$\Delta t_{пер} = 0{,}0022 \cdot H_{под} = 0{,}0022 \cdot 6 = 0{,}0132 \text{ °С/°С}.$$

4.3. При перегрузке и погрузке $\Delta t_п$ = 0,032 °С/°С.

4.4. При укладке и уплотнении

$$\Delta t_{\text{у}} = \Delta t'_{\text{у}} \cdot \tau_{\text{у}} = 0,007 \cdot 10 = 0,07 \ \text{°C/°C},$$

где $\Delta t'_{\text{у}}$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при уплотнении и укладке (табл. П.4.2).

4.5. Определим суммарное относительное снижение температуры:

$$\sum \Delta t_{\text{тр}} = \Delta t_{\text{тр}} + \Delta t_{\text{пер}} + \Delta t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{у}} =$$

$$= 0,075 + 0,0132 + 0,032 + 0,07 = 0,1902 \ \text{°C/°C}.$$

5. Определим температуру бетонной смеси при выходе ее из бетоносмесителя:

$$t_{\text{см}} = \frac{\left(t_{\text{б.н}} - t_{\text{н.в}} \sum \Delta t_{\text{тр}}\right)}{1 - \sum \Delta t_{\text{тр}}},$$

где $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона начальная, °С; $t_{\text{см}}$ – бетонной смеси при выходе из транспортного средства, °С; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С (табл. П.4.3).

$$t_{\text{см}} = \frac{\left(5 - \left(-16,9\right)0,1902\right)}{1 - 0,1902} = 10,1 \ \text{°C}.$$

6. Определим время подъема температуры:

$$\tau_{\text{р}} = \frac{t_{\max} - t_{\text{б.н}}}{V_{\text{р}}} = \frac{70 - 5}{10} = 6,5 \ \text{ч},$$

где $V_{\text{р}}$ – скорость подъема температуры, °С/ч; $\tau_{\text{р}} = 0,27$ сут.

7. Определим среднюю температуру бетона за период подъема:

$$t^{\text{п}}_{\text{б.св}} = \frac{t_{\text{из}} + t_{\text{б.н}}}{2} = \frac{70 + 5}{2} = 37,5 \ \text{°C}.$$

8. За время подъема температуры 6,5 ч при средней температуре подъема 37,5 °С, определим по номограмме (рис. П.4.6), что бетон класса В15 (М200) на портландцементе наберет 13,7 % от R_{28}.

9. Определим среднюю температуру остывания бетона:

$$t_{\text{б.ср}} = t_{\text{б.к}} + \frac{t_{\text{из}} - t_{\text{б.к}}}{1,03 + 0,181 \cdot \text{М}_{\text{п}} + 0,006\left(t_{\text{из}} - t_{\text{б.к}}\right)} =$$

$$= 5 + \frac{70 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 7 + 0,006\left(70 - 5\right)} = 29,2 \text{ °C}.$$

10. Пренебрегая тепловыделением цемента (экзотермия), определим время остывания бетона по формуле Б.Г. Скрамтаева:

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{C_{\text{б}}\gamma_{\text{б}}\left(t_{\text{из}} - t_{\text{б.к}}\right)}{3,6 \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}}\left(t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}}\right)} = \frac{1,05 \cdot 2400\left(70 - 5\right)}{3,6 \cdot 5,2 \cdot 7\left(29,2 - \left(-16,9\right)\right)} = 27 \text{ ч};$$

$$\tau_{\text{ост}} = 1,1 \text{ сут},$$

где $K_{\text{т}}$ – коэффициент теплопередачи опалубки, зависит от конструкции опалубки и скорости ветра (табл. П.4.4).

11. Определим прочность, которую наберет бетон за время остывания $\tau_{\text{ост}} = 27$ ч при средней температуре остывания бетона $t_{\text{б.ср}} = 29,2$ °С, по номограмме (рис. П.4.6) для бетона марки М200 (В15) на портландцементе М400 бетон набирает 25 % от R_{28}.

12. Таким образом, за время подъема температуры и время остывания бетон набирает $R = 13,7 + 25 = 38,7$ % от R_{28}.

13. По той же номограмме определим, что время изотермического прогрева $\tau_{\text{из}} = 5$ ч, за которое бетон набирает 11,3 % от R_{28}, оставшиеся от 50 %.

14. Рассчитаем активную электрическую мощность, необходимую для разогрева бетона со скоростью 10 °С/ч:

$$P_{as} = P_{n} \cdot V_{\text{б}} = \left(P_1 + P_2 + P_3 - P_4\right)V_{\text{б}} =$$

$$= \left(\frac{C_{\text{б}}\gamma_{\text{б}}V_{\text{под}}}{3600} + \frac{C_{\text{оп}}\gamma_{\text{оп}}\delta_{\text{оп}}\text{М}_{\text{оп}}}{3600}\frac{V_{\text{под}}}{2} + \frac{K \cdot \text{М}_{\text{п}}\left(t_{\text{из}} - t_{\text{б.н}}\right)}{1000} - 0,8\right)V_{\text{б}} =$$

$$= \left(\frac{1,047 \cdot 2400 \cdot 10}{3600} + \frac{2,52 \cdot 700 \cdot 0,025 \cdot 6,67}{3600} \frac{10}{2} + \right.$$

$$\left. + \frac{5,21 \cdot 7 \left(70 + 16,7\right)}{1000} - 0,8 \right) 1,08 = 10,5 \text{ кВт},$$

где $V_б$ – объем прогреваемого бетона, м^3.

15. Определим площадь поверхности металла:

$$S_а = n \cdot \pi \cdot d \cdot h + 2\left(h_ш + 2b_i\right)h =$$

$$= 4 \cdot 3,14 \cdot 0,03 \cdot 3 + 2\left(0,16 + 2 \cdot 0,08\right)3 = 3,05 \text{ м}^2,$$

где n – количество арматурных стержней, шт.; d – диаметр арматурных стержней, м; h – высота (длина) арматурных стержней, м; $h_ш$ – высота швеллера, м; $b_ш$ – ширина полки швеллера, м.

Удельная активная мощность ΔP равна:

$$\Delta P = \frac{P_{из}}{S_а} = \frac{10,5}{3,05} = 3,44 \text{ кВт/м}^2.$$

17. Определим коэффициенты сопротивления F_s и Q_s для швеллера.

17.1. Для швеллера средняя толщина сечения швеллера № 16 (по сортаменту) Δ = 0,007 м, отношение $\frac{2\Delta}{\Delta s} = \frac{2 \cdot 0,007}{0,003} = 4,67$, величина $F_s = Q_s = 1$.

17.2. Для стержневой арматуры радиус арматурного стержня ∅ 30 мм составляет: r = 0,015 м, отношение $\frac{r\sqrt{2}}{\Delta s} = \frac{0,015\sqrt{2}}{0,003} = 7,07$, величина $F_s = 0,9$; $Q_s = 1$.

18. Коэффициент формы индуктора β находим по графику рис. 36, при высоте h_i = 300 см отношение $\frac{h_i}{R_i} = \frac{30,544}{0,003} = 5,51$, тогда

$\beta = 0{,}9$, где $R_i = R_k + S_{оп} = 0{,}519 + 0{,}0025 = 0{,}544$ м – радиус конструкции; $R_k = \sqrt{0{,}3^2 + 0{,}3^2} = 0{,}519$; $S_{оп}$ – толщина опалубки, м.

19. Определим сумму периметров сечения металла в сечении конструкции:

$$\sum \Pi_s = n_с \pi d_с + n_ш (a + 2b) = 4 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}03 + 2(0{,}16 + 2 \cdot 0{,}08) = 1{,}02 \text{ м},$$

где $n_с$ – количество стержней арматуры в сечении, шт.; $d_с$ – диаметр стержневой арматуры, м; $h_ш$ – количество элементов жесткого каркаса (швеллера), шт.; a – высота швеллера, м; b – ширина полки швеллера, м.

20. Определим площадь сечения индуктора:

$$S_i = (0{,}6 + 0{,}025 + 0{,}01)^2 = 0{,}4 \text{ м}^2.$$

21. Условное активное сопротивление системы

$$r_0 = 1{,}1 \cdot \rho_н \sum \Pi_s \cdot F_s = 1{,}1 \cdot 6{,}75 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}02 \cdot 1 = 7{,}57 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

22. Условное индуктивное сопротивлении системы

$$\omega L_0 = 4 \cdot 10^{-4} \cdot S_i \cdot m + \rho_н \sum \Pi_s \cdot Q_s = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}9 \cdot 6{,}75 \cdot 10^{-5} \times$$
$$\times 1{,}02 \cdot 1 = 21{,}29 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

23. Определим условное сопротивление системы:

$$z_0 = \sqrt{r_0^2 + (\omega L_0)} = \sqrt{(7{,}57 \cdot 10^{-5})^2 + (21{,}29 \cdot 10^{-5})^2} = 24{,}1 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

24. Определим число витков индуктора при выбранном напряжении 62 В:

$$N = \frac{U}{z_0 \cdot H} = \frac{62}{24{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot 6750} = 38 \text{ витков}.$$

25. Ожидаемая сила тока

$$I = \frac{H \cdot h}{N} = \frac{6750 \cdot 3}{38} = 532{,}9 \text{ А}.$$

26. Коэффициент мощности системы

$$\cos\varphi = \frac{r_0}{z_0} = \frac{7{,}57 \cdot 10^{-5}}{24{,}1 \cdot 10^{-5}} = 0{,}314.$$

27. Полная мощность системы

$$P_c = \frac{P_{as}}{\cos\varphi} = \frac{10{,}5}{0{,}314} = 33{,}44 \text{ кВт}.$$

По величине силы тока подбираем сечение провода (кабеля) индуктора, мм^2. Допускаемая длительная нагрузка на медный провод сечением 70 мм^2 – 340 А, а на алюминиевый провод сечением 50 мм^2 – 215 А.

Тогда увеличиваем напряжение с 62 до 103 В. Пересчитываем количество витков:

$$N = \frac{U}{z_0 \cdot H} = \frac{103}{24{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot 6750} = 64 \text{ витка}.$$

Ожидаемая сила тока:

$$I = \frac{H \cdot h}{N} = \frac{6750 \cdot 3}{64} = 316{,}4 \text{ А}.$$

По величине силы тока принимаем медный провод сечением 70 мм^2.

5.6. Конвективно-лучевой обогрев бетона

Область применения

Областью применения конвективно-лучевого обогрева монолитных конструкций с помощью панельно-линейных пере-

носных электронагревателей являются фундаменты под конструкции и оборудование, массивные стены и т. п. с модулем поверхности 3–6 $м^{-1}$; колонны, балки, прогоны, элементы рамных конструкций, свайные ростверки, стены, перекрытия с модулем поверхности 6–10 $м^{-1}$; полы, перегородки, плиты перекрытий, тонкостенные конструкции с модулем поверхности 10–20 $м^{-1}$, бетонирование которых производится при минимальной температуре воздуха до –40 °С.

Сущность метода

Сущность конвективно-лучевого обогрева монолитных конструкций заключается в непосредственной передаче тепла от греющих поверхностей панельно-линейных переносных электронагревателей через опалубку к прогреваемому бетону. Распространение тепла в самом бетоне происходит путем его теплопроводности.

5.6.1. Методика расчета конвективно-лучевой обработки бетона

До начала работ по конвективно-лучевому обогреву монолитных конструкций выполняются следующие подготовительные операции:

– устанавливают опалубку и арматуру в рабочее положение при необходимости, очистив от мусора, снега и наледи;

– производят коммутацию панельно-линейных электронагревателей и в соответствии со схемой подключают их к переносному блоку подключения токоприемников. Подключают переносной блок подключения токоприемников к питающей сети (рис. 39);

– проверяют перед подачей напряжения на нагреватели правильность их установки и подключения, качество контактов,

расположение температурных скважин или установленных датчиков температуры, правильность укладки утеплителя.

После укладки бетонной смеси в опалубку устраивается теплоизоляция конструкции в виде минераловатных матов толщиной 26 мм, защищенных с двух сторон брезентом и начинается обогрев конструкции. При этом температура уложенного бетона составляет +15 °С (рис. 38).

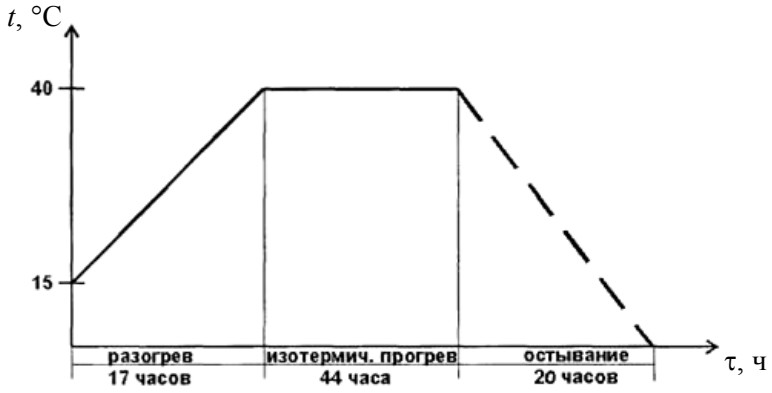


Рис. 38

Набор прочности бетона при различных температурах его выдерживания определяется графиком (рис. 41).

Каждые два часа изотермического прогрева замеряется температура бетона. Для замеров температуры используются технические термометры. Число точек измерения температуры устанавливается в среднем из расчета не менее одной точки на каждые 3 м^3 бетона, 6 м длины конструкции, 5 м^2 площади перекрытия, 40 м^2 площади подготовки полов и т. д.

Обогрев бетонной смеси в конструкции осуществляется на основании теплотехнического расчета в соответствии с графиком при скорости подъема температуры 1,5 °С/час. В период обогрева температура бетона контролируется не реже чем через 1 ч.

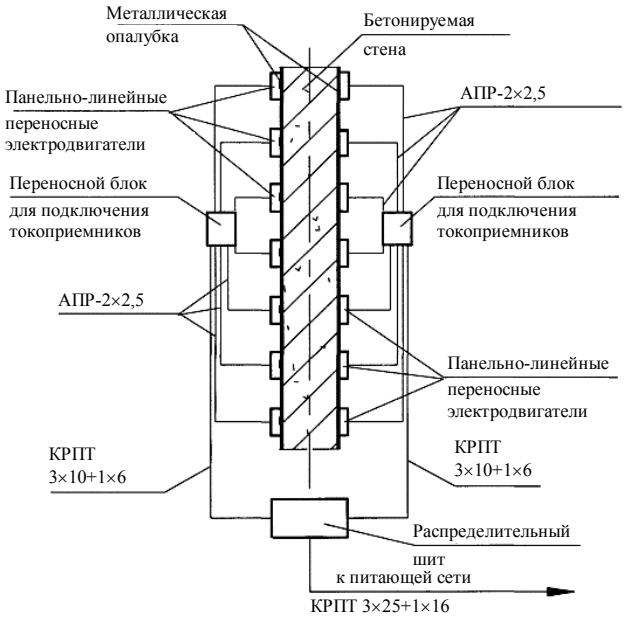


Рис. 39. Схема подключения панельно-линейных переносных электронагревателей к питающей сети

Обогрев бетонной смеси осуществляется панельно-линейными переносными электронагревателями, навешанными на опалубку, в соответствии с расчетными параметрами. Обогрев до температуры 40 °С ведется с помощью четырнадцати нагревателей. Изотермический прогрев осуществляется одиннадцатью нагревателями (рис. 42).

Остывание бетона происходит самопроизвольно после отключения напряжения. Демонтаж электрооборудования производится после окончания периода остывания во избежание внезапного резкого понижения температуры окружающего воздуха.

Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки для конструкции с модулем поверхности $М_п$ = 5–10 и $М_п$ > 10 составляет, соответственно, не более 5 и 10 °С в час.

Температура наружного воздуха замеряется один-два раза в сутки, результаты замеров фиксируются в журнале производства бетонных работ.

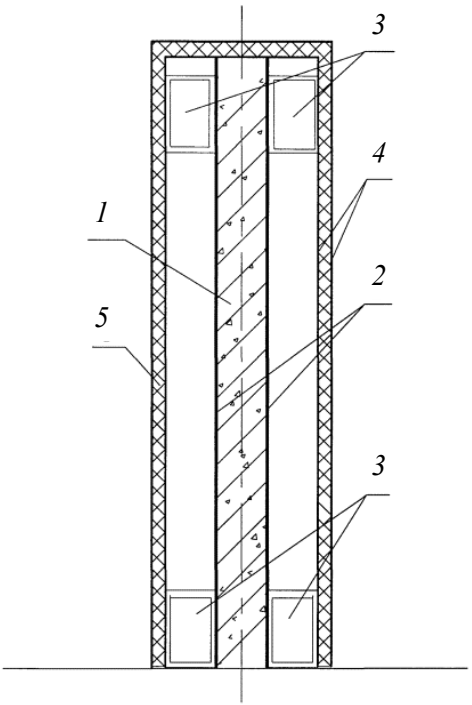


Рис. 40. Схема устройства теплозащиты:
1 – железобетонная стена; *2* – металлическая опалубка; *3* – панельно-линейные переносные электронагреватели; *4* – слой брезента; *5* – слой минеральной ваты

Прочность бетона проверяют по фактическому температурному режиму. Прочность бетона после распалубливания рекомендуется определять с помощью молотка конструкции НИИМосстроя ультразвуковым способом или высверливанием и испытанием кернов.

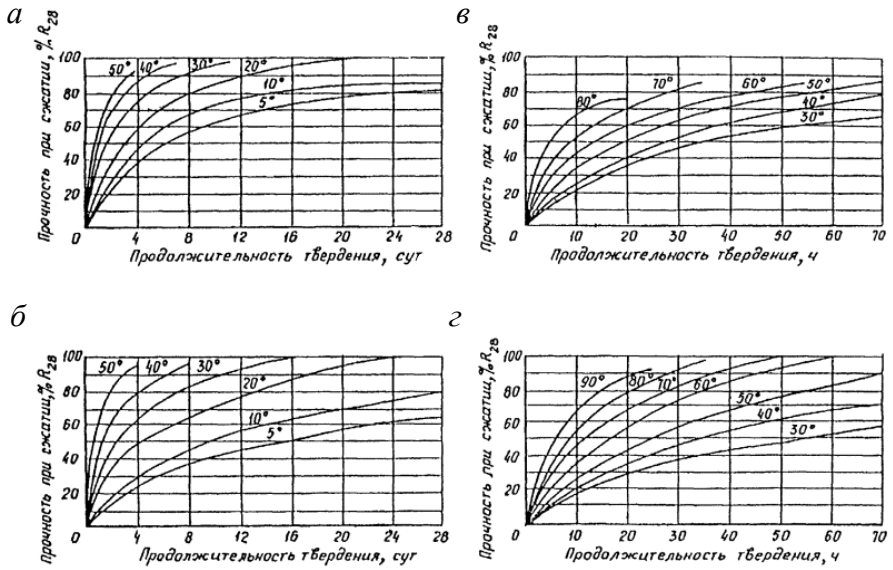


Рис. 41. Кривые набора прочности бетоном при различных температурах его выдерживания:

а, в – для бетона на портландцементе активностью 400–500; *б, г* – для бетона на шлакопортландцементе активностью 300–400

Теплоизоляция и опалубка снижаются не ранее того момента, когда температура бетона в наружных слоях конструкции достигает +5 °С и не позже, чем слои остынут до 0 °С. Не допускается примерзание опалубки, гидро- и теплоизоляции к бетону.

Для предотвращения появления трещин в конструкциях перепад температур между открытой поверхностью бетона и наружным воздухом не должен превышать:

а) 20 °С – для монолитных конструкций с $M_п < 5$;

б) 30 °С – для монолитных конструкций с $M_п > 5$.

В случае невозможности соблюдения указанных условий, поверхность бетона после распалубливания укрывается брезентом, толью, щитами и т. д.

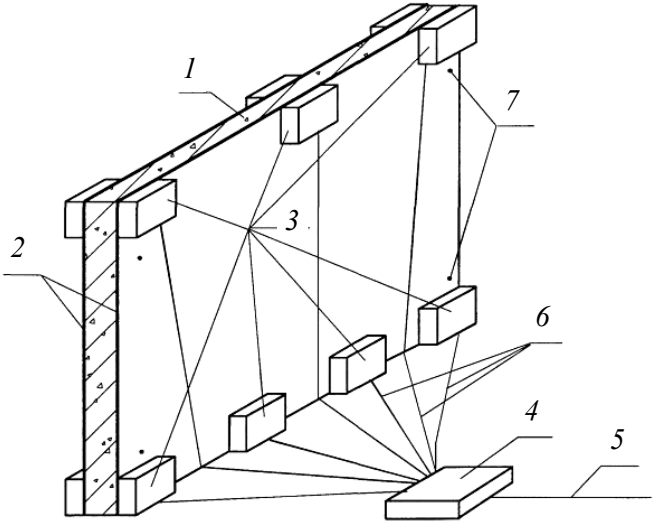


Рис. 42. Схема размещения панельно-линейных переносных электронагревателей:

1 – монолитная железобетонная плита; *2* – металлическая опалубка; *3* – панельно-линейный переносной электронагреватель; *4* – переносной блок для подключения токоприемников; *5* – кабель КРТП 3×10 + 1×6; *6* – провод АПР-2×2,5; *7* – температурная скважина

Укладка бетонной смеси в конструкцию при отрицательной температуре воздуха производится с учетом следующих требований:

– способ укладки должен исключать возможность замерзания бетона до приобретения им требуемой прочности;

– не допускается снимать наледь с опалубки, арматуры с помощью пара или горячей воды;

– при температуре воздуха ниже –10 °С арматуру диаметром более 25 мм, а также арматуру прокатных профилей и крупные металлические закладные детали следует отогревать до положительной температуры, все выступающие закладные части и выпуски должны быть утеплены;

– укладку бетонной смеси производят непрерывно, без перевалок, средствами, обеспечивающими минимальное охлаждение смеси при ее подаче;

– температура бетонной смеси, уложенной в опалубку, должна быть не ниже +5 °С.

5.6.2. Пример расчета конвективно-лучевого обогрева бетона

Исходные данные:

Температура наружного воздуха	–15 °С
Температура изотермического прогрева	40 °С
Скорость подъема температуры	1,5 °С/ч
Время обогрева бетонной смеси	17 ч
Температура бетона начальная	15 °С
Прочность бетона к моменту остывания до 0 °С	70 % от R_{28}

Решение:

1. Определяем время остывания по формуле

$$\tau_0 = \frac{C_б \cdot \gamma_б \cdot \Delta t_1}{3,6 \cdot K_т \cdot \mathrm{M_п} \Delta t_2},$$

где $C_б$ – удельная теплоемкость бетона, кДж/(кг·°С); $\gamma_б$ – объемная масса бетона, кг/м^3; Δt_1 – перепад температур от температуры изотермического прогрева до 0 °С; 3,6 – коэффициент перехода; $K_т$ – коэффициент теплопередачи теплоизоляции, Вт/(м^2·°С); $K_т = 2,68$; $\mathrm{M_п}$ – модуль поверхности, м$^{-1}$; Δt_2 – перепад температур между средней температурой остывания (20 °С) и температурой наружного воздуха:

$$\tau_0 = \frac{0,84 \cdot 2400\left(40 - 0\right)}{3,6 \cdot 2,68 \cdot 12\left(20 + 15\right)} = 20 \text{ ч}.$$

За 17 ч разогрева бетонной смеси при средней температуре (15 + 40)/2 = 27,5 °С бетон наберет 25 % от R_{28} (см. рис. 41, *в*).

Учитывая, что за время остывания бетон набирает незначительную прочность, принимаем, что к моменту остывания бетон должен набрать 70 % от R_{28}.

Тогда недостающие 45 % прочности бетон должен набрать за 44 ч изотермического выдерживания при температуре 40 °С и график термообработки будет выглядеть следующим образом (см. рис. 38):

– время обогрева бетонной смеси до 40 °С – 17 ч;

– время изотермического прогрева – 44 ч;

– время остывания с 40 до 0 °С – 20 ч.

2. Потребная мощность на обогрев бетонной смеси до 40 °С определяется по формуле:

$$P_{\text{р}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} V_{\text{б}} \cdot \Delta t}{3600 \cdot \tau_{\text{р}}},$$

где $C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость бетона кДж/(кг·°С); $\gamma_{\text{б}}$ – объемная масса бетона (2400); $V_{\text{б}}$ – объем бетона; 3600 – переходной коэффициент; $\tau_{\text{р}}$ – время обогрева бетонной смеси от 15 до 40 °С; Δt – перепад температур между температурой изотермического прогрева и начальной температурой бетона.

Тогда

$$P_{\text{р}} = \frac{0,84 \cdot 2400 \cdot 3,6\left(40 - 15\right)}{3600 \cdot 17} = 2,96 \text{ кВт} \gg 3,0 \text{ кВт}.$$

3. Потребная мощность на компенсацию теплопотерь через теплоизоляцию определяется по формуле

$$P_{\text{п}} = \frac{K_{\text{т}} \cdot F \cdot \alpha \cdot \Delta t}{1000} = \frac{2,68 \cdot 44,4 \cdot 1,2\left(50 + 15\right)}{1000} = 9,3 \text{ кВт},$$

где $K_{\text{т}}$ – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·°С); F – площадь теплоизоляции, м^2; α – коэффициент, учитывающий скорость ветра; Δt – перепад температур между температурой внутри изоляции и наружным воздухом.

4. Общая потребная мощность, необходимая для обогрева бетонной смеси и компенсацию теплопотерь:

$$3 \text{ кВт} + 9{,}3 \text{ кВт} = 12{,}3 \text{ кВт}.$$

5. Принимаем мощность одного панельно-линейного электронагревателя 0,9 кВт. Общее количество панельно-линейных электронагревателей на период обогрева бетонной смеси до температуры 40 °С будет равно:

$$12{,}3/0{,}9 = 13{,}6 = 14 \text{ шт}.$$

Изотермический прогрев производится с помощью 11 нагревателей:

$$9{,}3/0{,}9 = 10{,}3 \approx 11 \text{ шт}.$$

6. Расход электроэнергии на обогрев конструкции складывается из трех величин:

1) $N_{\text{п}}$ – предварительный отогрев опалубки и арматуры перед бетонированием в течение двух часов;

2) $N_{\text{р}}$ – обогрев бетона до 40 °С четырнадцатью нагревателями в течение 17 ч;

3) $N_{\text{из}}$ – изотермический прогрев бетона одиннадцатью нагревателями в течение 44 ч.

$$N_{\text{общ}} = N_{\text{п}} + N_{\text{р}} + N_{\text{из}} = 14 \cdot 2 \cdot 0{,}9 + 14 \cdot 17 \cdot 0{,}9 + 11 \cdot 44 \cdot 0{,}9 =$$

$$= 25{,}2 + 214{,}2 + 435{,}6 = 675 \text{ кВт·ч}.$$

Пример определения прочности бетона

Определить прочность бетона в конструкцию с $M_{\text{п}} = 4$ на портландцементе марки 400 при скорости подъема температуры 10 °С в час, температуре изотермического прогрева 70 °С, его продолжительности 12 ч и остывании со скоростью 5 °С в час до конечной температуры 8 °С. Начальная температура бетона $t_{\text{нб}} = 10$ °С.

Решение:

1. Определить величину относительной прочности за период подъема температуры:

– продолжительность подъема температуры (70 – 10)/10 = 6 ч;

– при средней температуре (70 + 10)/2 = 40 °С.

Для этого из точки А (рис. 43) проводим перпендикуляр до пересечения с кривой прочности при 40 °С (точка Б).

Величина прочности за время подъема температуры определяется проекцией точки Б на ось ординат (точка В) и составляет 15 %.

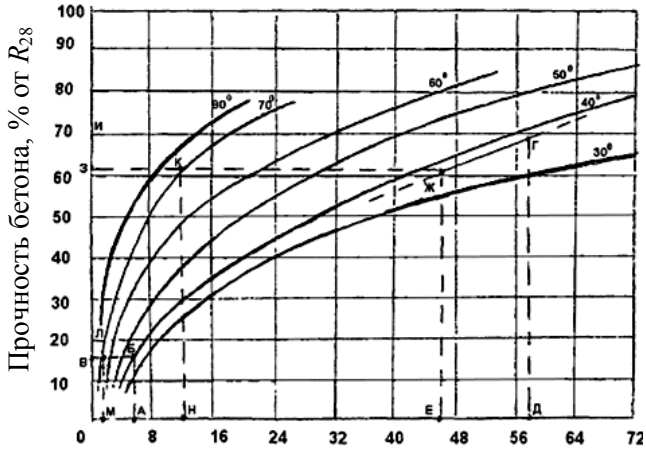


Рис. 43. Пример определения прочности бетона

Определяем прирост относительной прочности при изотермическом прогреве за 12 ч как проекцию участка (точки Л и К) кривой прочности при 70 °С (отрезок ВЗ), что соответствует 46 % от R_{28}.

Определяем прирост прочности бетона за 12 ч остывания по кривой прочности при 38 °С как проекцию участка ЖГ на ось ординат. Отрезок ЗИ соответствует 9 % от R_{28}.

За весь цикл термообработки бетон приобретает следующую прочность: 15 + 46 + 9 = 70 % от R_{28}.

5.7. Воздушный конвективный прогрев монолитных тонкостенных конструкций

Область применения

Применяется для обогрева бетона в перекрытиях, стенах, перегородках (замкнутые пространства). Наиболее распространенным способом термообработки бетона тонкостенных конструкций ($М_п$ > 10), возводимых в различных опалубках, является конвективный прогрев, что объясняется его универсальностью, низкой трудоемкостью и возможностью комбинирования с другими методами.

Сущность метода и разновидности конвективного прогрева

Тепловая обработка бетона воздушным конвективным методом осуществляется с помощью теплогенераторов. Прогрев бетона при применении этого метода происходит нагреваемым воздухом или продуктами сгорания топлива. Тепло подается к поверхности прогреваемой конструкции за счет кондукции и конвекции.

Поскольку теплоемкость нагреваемого воздуха или продуктов сгорания невелика, то прогрев таким методом требует больше времени из-за невысокой температуры прогрева (обычно 40–50 °С) при значительном расходе электрической энергии или сжигаемого топлива. Прогрев конструкций с неопалубленной поверхностью нагретыми газами нежелателен из-за быстрого испарения влаги с поверхности бетона и опасности его обезвоживания. Такой метод может быть относительно эффективным только в полностью закрытых помещениях (по существу тепляки).

Применяется для обогрева бетона в перекрытиях, стенах, перегородках (замкнутые пространства).

Прогрев бетона осуществляется нагретым воздухом, перемешиваемым вентиляторами. Нагретый воздух может подаваться по шлангам в местные брезентовые тепляки вокруг прогреваемых конструкций. Ориентировочный расход электроэнергии на 1 $м^3$ бетона – 120–200 кВт/ч.

Наиболее распространенным способом термообработки бетона тонкостенных конструкций ($М_п > 10$), возводимых в различных опалубках, является конвективный прогрев, что объясняется его универсальностью, низкой трудоемкостью и возможностью комбинирования с другими методами.

Методы конвективного прогрева классифицируется по принципу подведения теплового потока к прогреваемой конструкции, и разделяются на традиционный камерный прогрев, камерный прогрев с воздуховодами и конвективный прогрев с приопалубочными шторами.

При традиционном камерном прогреве тепловой поток от теплогенератора подается в замкнутый объем тоннеля (термин «тоннель» в данном разделе применяется для обозначения прогреваемого пространства) и далее, вследствие конвективного теплообмена, происходит нагревание внутренних опалубочных щитов (рис. 44).

Открытые вертикальные поверхности закрываются теплоизолирующими шторами, а в образованный таким способом замкнутый объем устанавливают теплогенераторы и подается нагретый воздух. Передача тепла от теплогенератора к поверхности опалубки осуществляется конвекцией. Далее, за счет теплопроводности бетона, происходит нагрев внутренних слоев возводимой конструкции. Наружные опалубочные щиты утепляются эффективными теплоизолирующими материалами, либо используются термоактивные маты.

При камерном прогреве с воздуховодами тепловой поток от теплогенератора поступает в распределитель, а далее в воздуховоды по периметру возводимых конструкций стен (рис. 45).

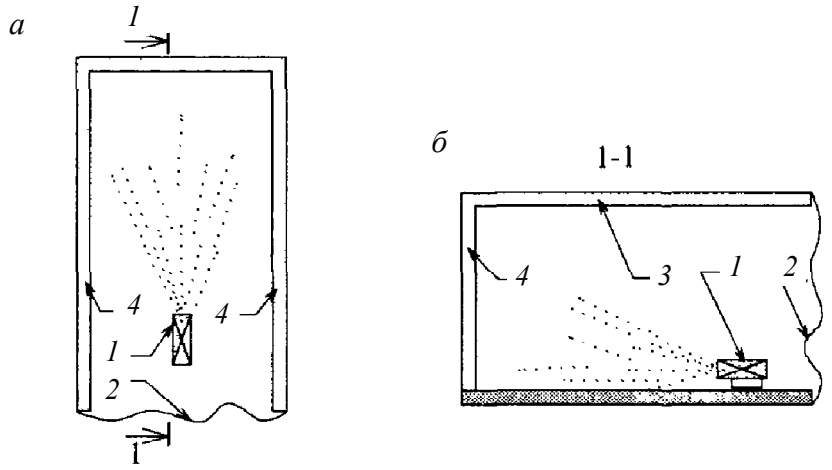


Рис. 44. Схема традиционного камерного прогрева:
1 – теплогенератор; *2* – теплоизолирующая штора; *3* – перекрытие; *4* – стены

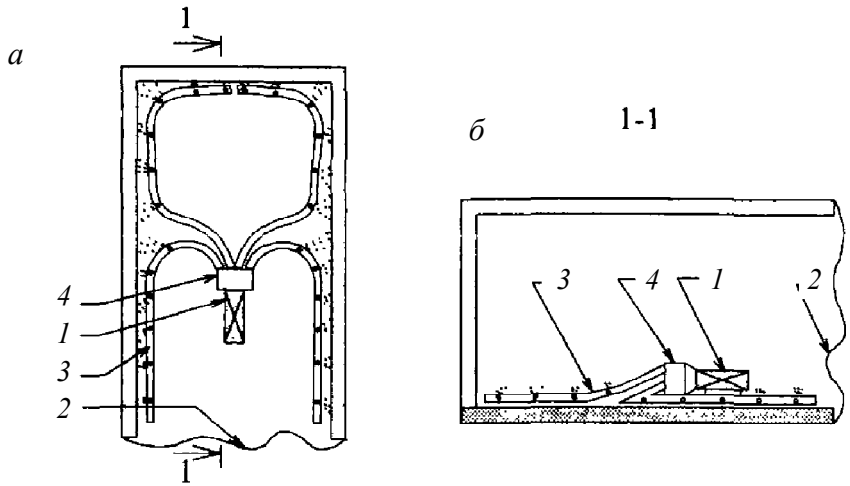


Рис. 45. Схема камерного прогрева с воздуховодами:
1 – теплогенератор; *2* – теплоизолирующая штора; *3* – воздуховоды; *4* – распределитель воздушного потока

Конвективный прогрев с приопалубочными шторами основан на передаче теплового потока от теплогенератора в область, ограниченную теплоизолирующей шторой и щитами опалубки (рис. 46), в результате чего уменьшается объем прогреваемого воздушного пространства, граничащего с опалубкой, и повышается эффективность передачи тепла бетону.

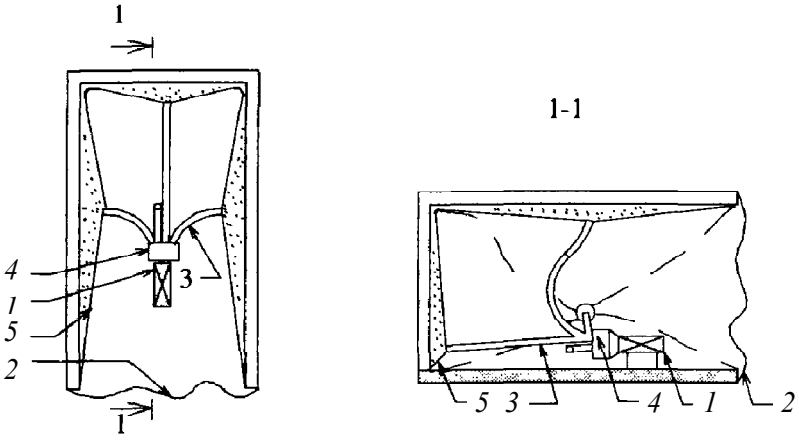


Рис. 46. Схема конвективного прогрева с приопалубочными шторами:
1 – теплогенератор; *2* – теплоизолирующая штора; *3* – воздуховоды; *4* – распределитель воздушного потока; *5* – приопалубочные шторы

Воздуховоды изготавливаются из прорезиненной ткани. По длине они должны иметь отверстия, предусмотренные для создания струй горячего воздуха, направленных на внутренние щиты опалубки. Приопалубочные шторы выполняются из двух слоев брезента с теплоизолирующей прослойкой из ватина. Возможно также использование и других материалов.

5.7.1. Методика расчета воздушного обогрева бетона

Расчет метода сводится к определению тепловой мощности теплогенератора, который основан на балансе между поступлением тепловой энергии от воздухонагревателя и его расходом на

нагревание опалубки, бетона, арматуры и восполнения теплопотерь через ограждающие конструкции, брезентовую штору и пр.

Мощность теплогенератора, Вт, рассчитывается по соотношению

$$Q_{\text{теп}} \geq Q_{\text{огр}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{н.о}} + Q_{\text{н.б}},$$

где $Q_{\text{огр}}$ – потери тепла через наружное ограждение, Вт; $Q_{\text{и}}$ – потери тепла на прогрев инфильтрующегося через ограждения воздуха; $Q_{\text{н.о}}$ – потери тепла на нагрев опалубки, Вт; $Q_{\text{н.б}}$ – потери тепла на нагрев бетона и арматуры, Вт.

Потери тепла через наружные ограждения определяются по формуле

$$Q_{\text{огр}} = \frac{\sum\left[\left(t_{\text{т}i} - t_{\text{н}i}\right) n_i \cdot F_i \cdot \beta_i\right]}{R_i},$$

где $t_{\text{т}i}$ – расчетная температура воздуха внутри тоннеля; $t_{\text{н}i}$ – температура воздуха при расчете потерь теплоты через наружные ограждения или температура воздуха более холодного помещения при расчете потерь тепла через внутренние ограждения тоннеля; n_i – коэффициент, учитывающий фактическое понижение расчетной разницы температур для ограждений, которые отделяют обогреваемое помещение от необогреваемых; β_i – коэффициент, учитывающий дополнительные потери тепла через ограждение; F_i – площадь ограждения, м^2; R_i – сопротивление теплопередаче ограждения, м^2·°С/Вт.

Значения коэффициентов n_i и β_i принимаются согласно данным, приведенным в табл. 69 и 70.

Общие потери тепла в тоннеле на нагревание наружного воздуха, поступающего в результате инфильтрации через ограждения, можно определить по формуле

$$Q_{\text{и}} = \left(\sum \beta_0 \cdot j \cdot C_{\text{в}} \cdot F_i + \sum \beta_0 \cdot j \cdot C_{\text{в}} \cdot l\right)\left(t_{\text{т}i} - t_{\text{н}i}\right),$$

где F_i – площадь ограждения помещения, через которое в процессе фильтрации поступает наружный воздух, м^2; l – протя-

женность стыков, щелей, м; $C_в$ – массовая теплоемкость воздуха Вт/(кг·°С); β_0 – коэффициент дополнительных теплопотерь (согласно табл. 71); j – удельные теплопотери проникающего воздуха, отнесенные к 1 м^2 площади ограждения или к 1 м погонной длины стыка.

Таблица 69

Значение коэффициент n_i в зависимости от положения наружных поверхностей к наружному воздуху

№ п/п	Ограждающие конструкции	Коэффициент n_i
1	Наружные стены и покрытия (в т. ч. вентилируемые наружным воздухом, перекрытия чердачные и над проездами; перекрытия над холодными подпольями в северной климатической зоне)	1,00
2	Перекрытия с холодными подвалами, перекрытия чердачные с рулонными материалами, перекрытия над холодными подпольями и холодными этажами в северной климатической зоне	0,90
3	Перекрытия над неутепленными подвалами со световыми проемами в стенах	0,75
4	Перекрытия над неутепленными подвалами без световых проемов в стенах	0,60
5	Перекрытия над неотапливаемыми техническими подвалами, расположенными ниже уровня земли	0,40

Таблица 70

Значение коэффициента β_i добавочных теплопотерь

Вид помещений		Коэффициент β_i
1	В помещениях любого назначения через наружные вертикальные и наклонные (вертикальная проекция стены)	1,10
2	Двери, окна, обращенные на север, восток, северо-восток, северо-запад, на юго-восток и запад	1,05
3	В угловых помещениях дополнительно на каждую дверь, окно, если одно из ограждений обращено на север, восток, северо-восток, северо-запад	1,10

Окончание табл. 70

Вид помещений		Коэффициент β_i
4	В помещениях, разрабатываемых для типового проектирования через стены, двери и окна, обращенные на любую сторону света:	
	при одной наружной стене	0,08
	при угловых помещениях	0,43

Таблица 71

Значения коэффициента β_0 при инфильтрации воздуха

№ п/п	Элементы конструкций	Коэффициент β_0
1	Массивные ограждения	0,60
2	Стыковые соединения	0,70
3	Окна:	
	одинарные	1,00
	двойные	0,80
	тройные	0,80
4	Двери, ворота, фрамуги, проемы в ограждении	1,00

В объеме тоннеля инфильтрационные процессы протекают в основном через теплоизолирующую штору, закрывающую технологический проем. Поэтому удельный расход наружного проникающего воздуха рассчитывается как отношение площади приопалубочной шторы $F_{\text{шт}}$ к производительности теплогенератора и электрокалорифера:

$$j = \frac{G}{F_{\text{шт}}},$$

где G – производительность теплогенератора, равная производительности вентилятора калорифера.

Расход тепла на нагревание внутренних щитов опалубки определяется по соотношению

$$Q_{\text{н.о}} = \gamma_{\text{о}} \cdot C_{\text{о}} \cdot \rho_{\text{о}} \cdot U\left(t_{\text{нач.о}} - t_{\text{т}}\right),$$

где $C_{\text{о}}$ – удельная теплоемкость материала внутренних щитов опалубки, соответственно; $\gamma_{\text{о}}$ и $\rho_{\text{о}}$ – объем и плотность материала внутренних щитов опалубки; U – средняя по объему относительная избыточная температура, определяемая по рис. 47. Она показывает долю полного перепада начальной температуры материала внутренних щитов опалубки $t_{\text{нач.о}}$ и температуру в обогреваемом тоннеле $t_{\text{т}}$, которая приобретается в среднем всем объемом материала за время τ с начала прогрева.

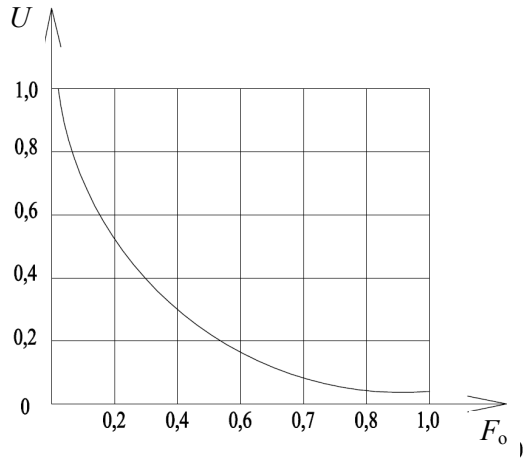


Рис. 47. Зависимость средней по объему тела относительно избыточной температуры U от критерия Фурье $F_{\text{о}}$

Значение U определяется в зависимости от критерия Фурье по формуле

$$F_{\text{о}} = \frac{\tau}{\gamma_{\text{о}} \cdot C_{\text{о}} \cdot \rho_{\text{о}} \cdot R_{\text{о}}},$$

где $R_о$ – сопротивление теплопередачи всей толщи материала внутренних щитов опалубки, которое рассчитывается по формуле

$$R_о = \frac{L}{\left(\lambda_о - A_о\right)} + l\left(\alpha + A_о\right),$$

где L – характерный размер, равный половине толщины внутренних щитов опалубки; $\lambda_о$ – коэффициент теплопроводности материала внутренних щитов опалубки; $A_о$ – площадь теплопоглощающей поверхности внутренних щитов; α – коэффициент теплообмена на поверхности в помещении;

$$\alpha = \alpha_л + \alpha_к,$$

где $\alpha_л$, $\alpha_к$ – коэффициенты теплопередачи излучением и конвекцией, соответственно, определяемые соотношением

$$\alpha_к = \frac{\left[A(\gamma_в \cdot V)^{0,8}\right]}{L^{0,2}},$$

где A – коэффициент, равный 4,32; $\gamma_в$ – плотность воздуха с учетом его температуры; V – скорость ветра; L – определяющий размер конструкции.

$$\alpha_л = \alpha_о \cdot \varepsilon \cdot B,$$

где $\alpha_о$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела ($\alpha_о$ = 5,67 Вт/(м^2·К); ε – степень черноты полного излучения материала опалубки; B – температурный коэффициент.

Расход тепла на нагревание бетона, уложенного в опалубку, определяется по формуле

$$Q_{н.б} = \gamma_б \cdot C_б \cdot V_б \left(t_{нач.б} - t_б^{\tau}\right),$$

где $C_б$ – удельная теплоемкость бетона; $\gamma_б$, $V_б$ – плотность и объем бетона, соответственно; $t_{нач.б}$, $t_б^{\tau}$ – средняя температура бетона в начальный момент и через определенный период времени τ.

Для равномерного прогрева бетонируемых конструкций необходимо выполнить расчет требуемой скорости воздушного потока:

$$V_{\min} \geq V_{\text{о}} = \frac{0,0533\left(t_r - t_{\text{в}}\right)^{0,3}\left(B_{\text{п}}^3 \cdot h_{\text{п}}\right)}{F_{\text{о}}^{0,25}},$$

где $t_{\text{в}}$, t_r – температура входящего и выходящего из теплогенератора воздуха, соответственно; $F_{\text{о}}$ – площадь выпускного отверстия теплогенератора; $h_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$ – высота и ширина помещения, где распространяется воздушная струя.

При расчете требуемых параметров теплогенератора необходимо учесть, что длина помещения, обслуживаемого воздухонагревателем, ограничена условием

$$l < 4,5(B_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}})^{0,5}.$$

Генератором тепла для конвективного прогрева чаще всего служат электрокалориферы, так как они отличаются простотой установки, высоким КПД, низкой стоимостью, возможностью быстрой замены в случае выхода из строя и безопасностью для обслуживающего персонала (табл. 72).

Таблица 72

Теплофизические характеристики электрокалориферов

Параметр	Марка электрокалорифера		
	КЭВ-60 (тип 1)	КЭВ-42 (тип 1)	СФО (тип 2)
Производительность вентилятора, $м^3/ч$	2300	1332	1341
Скорость воздушного потока, м/с	13,23	7,4	7,45
Фактическая температура калорифера (при $t_{\text{окр.среды}}$ 30 °С)	86	117	108
Площадь выпускного отверстия, $м^2$	0,126	0,203	0,312
Расчетная температура вырабатываемого калорифером воздуха, °С	110	127	89
Высота подъема воздушной струи на расстоянии 1 м от отопительного прибора	0,04	0,10	0,10
Разность температуры воздушного потока при выходе из сопла на расстоянии 1 м от сопла	39	64	54

Электрокалориферы, выпускаемые российскими предприятиями, подразделяются на два типа:

1-й тип – с оребренными ТЭНами;

2-й тип – с гладкими ТЭНами.

Принципиальные схемы работы электрокалориферов 1-го и 2-го типов представлены на рис. 48 и 49.

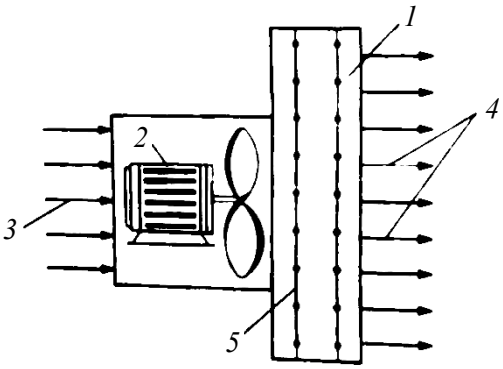


Рис. 48. Схема калорифера 1-го типа:

1 – корпус электрокалорифера; *2* – электродвигатель; *3* – воздух с температурой окружающей среды; *4* – нагретый воздушный поток; *5* – оребренные ТЭНы

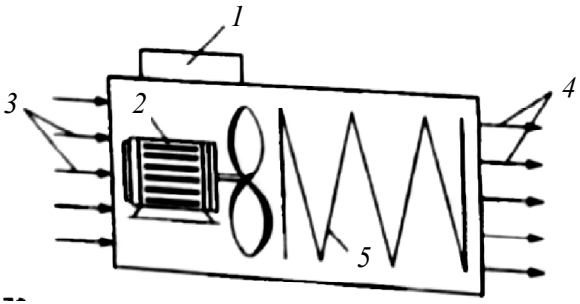


Рис. 49. Схема электрокалорифера 2-го типа:

1 – корпус электрокалорифера; *2* – электродвигатель; *3* – воздух с температурой окружающей среды; *4* – нагретый воздушный поток; *5* – гладкие ТЭНы

Расчет конвективного прогрева тонкостенной конструкции в тоннельной опалубке

К основным технологическим параметрам зимнего бетонирования данным методом относятся: температура бетона, длительность термообработки, прочность бетона.

Для выбора параметров конвективного прогрева монолитных тонкостенных конструкций необходимо, соблюдая нижеизложенную методику, определить следующие физические величины:

1. Расчет распределения температуры воздуха в приопалубочном пространстве по формуле

$$t_i = 45{,}65(y/L) + 0{,}32(z/H) - 33{,}27(y/L \cdot z/H) + 0{,}98t_{\text{ср}} - 11{,}0(y/L)^2 - \\ - 7{,}0(z/H)^2 - 10{,}62 + 0{,}0006(t_{\text{б.ср}})^2,$$

где $t_{\text{ср}}$ – среднее значение температуры в пространстве тоннеля; 10 °С < $t_{\text{ср}}$ < 50 °С (при $t_{\text{ср}}$ < 10 °С температура воздуха в нижней части тоннеля принимает отрицательное значение, при $t_{\text{ср}}$ > 50 °С возможен нагрев бетона в верхней части стены и перекрытии выше значений СП 70.13330.2012); L, H – длина и высота тоннеля, соответственно, м; z, y – соответствующие координаты по длине и высоте тоннеля, м: $0 < y < 1{,}0 < z < H$.

2. Среднюю температуру воздуха в тоннеле $t_{\text{ср}}$ можно найти, решив систему уравнений теплового баланса (рис. 50):

$$Q_{\text{огр}} = \frac{\sum\left[\left(t_{\text{т.ср}} - t_{\text{н}i}\right) n_i \cdot F_i \cdot \beta_i\right]}{R_i};$$

$$Q_{\text{и}} = \left[\sum_{i=1}^{n}\left[\beta_{\text{о}} \cdot j \cdot C_{\text{в}} \cdot F_i + \beta_{\text{о}} \cdot j \cdot C_{\text{в}} \cdot l\left(t_{\text{т}i} - t_{\text{н}}\right)\right]\right];$$

$$Q_{\text{эл}} = Q_{\text{огр}} + Q_{\text{и}},$$

где F_i – площадь ограждения, м^2; R_i – термическое сопротивление ограждения, м^2·°С/Вт; $t_{\text{н}i}$ – температура наружного воздуха,

°С; $Q_{огр}$, $Q_{и}$ – потери тепла через ограждающие конструкции и на инфильтрацию, соответственно, Вт; n_i, β_i – коэффициенты, принимаемые по табл. 69, 70; β_o, j – коэффициенты, принимаемые по табл. 71, 72.

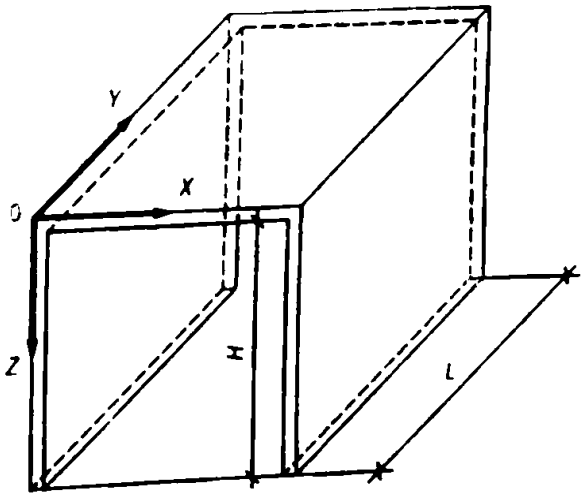


Рис. 50. Расчетная схема для определения температуры в пространстве тоннеля

3. На основании полученного распределения температуры производится расчет распределения прочности в бетоне прогреваемой конструкции через заданный период времени. Прочность бетона с учетом времени и температуры термообработки рассчитывается по формуле

$$R = R_{28} - A_{exp}\left\{-B\left[\left(0,6+0,2t\right)^n - C\right]\tau\right\},$$

где t, τ – температура бетона и время термообработки, соответственно; R_{28}, R – марочная прочность и прочность бетона после

термообработки, соответственно; A, B – коэффициенты начальной прочности и темпы твердения, которые рассчитываются по формулам:

$$A = \frac{zq^2}{\sqrt[3]{R_3}};$$

$$B = \frac{7,3}{\left(100 - R_3\right)},$$

где R_3 – прочность бетона в возрасте трех суток при нормальных условиях хранения, в % от R_{28}; C – коэффициент, учитывающий замедление скорости твердения бетона при температурах от 0 до минус 13 °С;

$$C = 0,054 + 1,33/100 - n,$$

где n – коэффициент, учитывающий вид и марку цемента, рассчитывается по формуле

$$n = \frac{1,4}{50 / R_3}.$$

После выполнения расчетов технологических параметров производится сравнение полученной (расчетной) прочности с требуемой.

Если требуемое значение прочности не превышает расчетного, то вариант теплообработки принимается к исполнению. В противном случае расчет повторяется до соблюдения условия, приведенного выше.

5.7.2. Расчет воздушного обогрева бетона

1. Требуется рассчитать параметры конвективного прогрева монолитных стен и перекрытий крайнего тоннеля (в осях *1–2*, ряды В-Г) строящегося 9-этажного жилого дома (рис. 51). Высо-

та этажа здания – 3,0 м. Монолитные стены и перекрытия возводятся из бетона класса В25 в объемно-переставной (тоннельной) опалубке, извлекаемой на фасад. Толщина возводимых конструкций стен и перекрытий – 160 мм. Район строительства – г. Челябинск. Температура наружного воздуха – –16 °С, скорость ветра – 5 м/с.

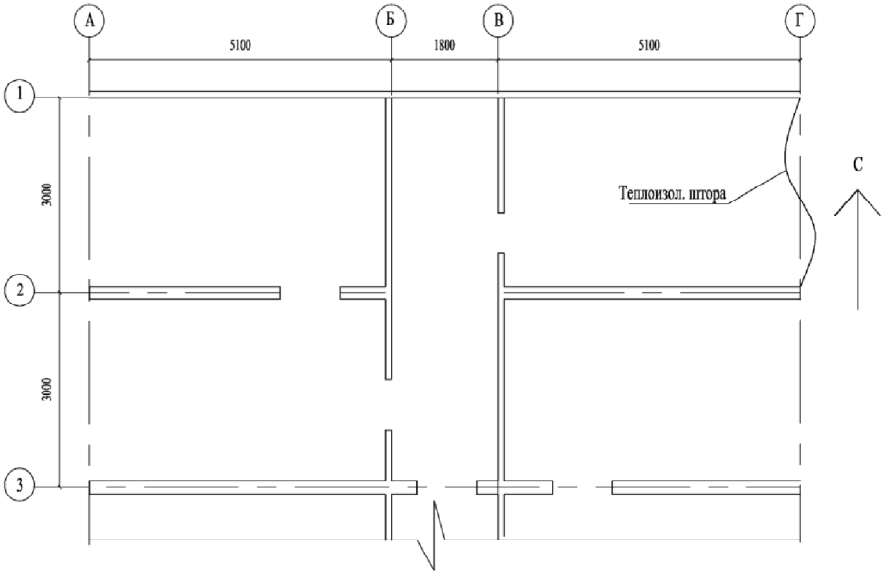


Рис. 51. Схема расположения монолитных конструкций

2. Теплофизические характеристики:

а) наружных опалубочных щитов: материал – стальной лист, утепленный пенополистиролом, толщина утеплителя $\delta_у = 50$ мм, коэффициент теплопроводности $\lambda_у = 0{,}06$ Вт/(м·°С);

б) внутренних опалубочных щитов: материал – стальной лист, толщина $\delta_о = 4$ мм, коэффициент теплопроводности $\lambda_о = 58$ Вт/(м·°С);

в) возводимых конструкций: материал – железобетон, толщина $\delta_б = 160$ мм, плотность $\gamma_б = 2500$ кг/м^3, удельная теплоемкость $C_б = 840$ Вт·с/(кг·°С), коэффициент теплопроводности $\lambda_б = 1{,}86$ Вт/(м·°С);

г) теплоизолирующей шторы, перекрывающей вход в тоннель во время конвективного прогрева: материал – брезент, утепленный ватином, толщина $\delta_{шт} = 14$ мм, коэффициент теплопроводности $\lambda_{шт} = 12$ Вт/(м·°С).

3. Для осуществления термообработки бетона был выбран метод конвективного прогрева с приопалубочными шторами.

4. Расчет мощности теплогенератора.

4.1. Определим потери тепла через ограждения (табл. 73) по формуле

$$Q_{теп} \geq Q_{огр} + Q_{и} + Q_{н.о} + Q_{н.б}.$$

Таблица 73

Потери тепла через ограждения тоннеля

№ п/п	Вид ограждения	Площадь F, м^2	Сопротивление теплопередачи R, м^2·°С/Вт	Разность внутренней и наружной температуры ($t_{вт} - t_{нш}$), °С	Коэффициент β	Коэффициент n	Потери тепла $Q_{огр}$, Вт
1	Стена В-Г, ось 1	15,3	1,04	46	1,2	1	812
2	Стена 1-2, ряд В	9,0	0,31	0	–	–	0
3	Стена В-Г, ось 2	15,3	0,31	0	–	–	0
4	Штора 1-2, ряд В	9,0	0,24	46	1,2	1	2070
5	Перекрытие 1-2, В-Г	15,3	1,04	46	1	1	677
6	Пол тоннеля 1-2, В-Г	15,3	0,20	46	1	1	3519
	Итого						7078

Среднюю температуру воздуха в объеме тоннеля первоначально принимаем 30 °С.

4.1.1. Сопротивление теплопередаче конструкций (табл. 73) рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}},$$

где $\alpha_{\text{н}}$, $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициенты теплоотдачи, соответственно, наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции. При расчете $\alpha_{\text{н}}$: $\alpha_{\text{к}}$ = 14,6 Вт/(м^2·°С) ($\gamma_{\text{б}}$ = 1,874 кг/м^3 при $t_{\text{н}}$ = –16 °С; V = 5 м/с, согласно заданным климатичским условиям; L = 5,1 м, длина рассчитываемых конструкций стены и перекрытия); $\alpha_{\text{л}}$ = 2,9 Вт/(м^2·°С), (ε = 0,75 для наружных щитов опалубки, β = 0,68 при $t_{\text{н}}$ = –16 °С). Таким образом, $\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}} =$ = 17,5 Вт/(м^2·°С). При расчете $\alpha_{\text{в}}$: $\alpha_{\text{к}}$ = 10,7 Вт/(м^2·°С) ($\gamma_{\text{в}}$ = 1,165 при $t_{\text{т}}$ = 30 °С; скорость воздушного потока V, обтекающего опалубку, принимается от 2 до 5 м/с, в рассматриваемом примере V = 4,0 м/с, L = 5,1 м); $\alpha_{\text{л}}$ = 5,5 Вт/(м^2·°С) (ε = 0,92, для внутренних стальных щитов опалубки, β = 1,05 при $t_{\text{н}}$ = 30 °С). Таким образом, $\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$ = 16,2 Вт/(м^2·°С).

4.1.2. Потери тепла в тоннеле на нагревание наружного воздуха, поступающего в результате инфильтрации через ограждения $Q_{\text{н}}$, определяются по формуле

$$Q_{\text{и}} = \left(\sum \beta_{\text{о}} \cdot j \cdot C_{\text{в}} \cdot F_i + \sum \beta_{\text{о}} \cdot j \cdot C_{\text{в}} \cdot l\right)\left(t_{\text{т}i} - t_{\text{н}i}\right),$$

Производительность теплогенератора принимаем G = = 1562 кг/ч (при $t_{\text{т}}$ = 30 °С, электрокалорифер СФО-25).

После подстановки теплоемкости поступающего наружного воздуха $C_{\text{в}}$ = 0,280 Вт·ч/(кг·°С) при $t_{\text{н}}$ = –16 °С, разности внутренней и наружной температуры ($t_{\text{т}i} - t_{\text{н}i}$) = 46 °С, коэффициента $\beta_{\text{о}}$ = 0,6 в формулу находится значение $Q_{\text{и}}$ = 12 422 Вт.

4.1.3. Расход тепла на нагревание бетона, уложенного в опалубку $Q_{\text{н.б}}$, определяют по формуле

$$Q_{\text{н.б}} = \gamma_{\text{б}} \cdot C_{\text{б}} \cdot V_{\text{б}} \left(t_{\text{нач.б}} - t_{\text{б}}^{\tau} \right).$$

Удельная теплоемкость бетона $C_{\text{б}}$ = 840 Вт·с/(кг·°С) = = 0,84 кДж/(кг·°С); объем бетона $V_{\text{б}}$ = 8,8 м^3, плотность бетона $\gamma_{\text{б}}$ = 2500 кг/м^3; $t_{\text{нач.б}}$ = 15 °С, через период подъема температуры, принимаемый τ = 24 ч, температура в бетоне должна увеличиться до $t_{\text{б}}^{\tau}$ = 30 °С. Таким образом, количество тепла на нагревание бетона за 24 ч составит: $Q_{\text{н.б}}^{\tau}$ = 277200 кДж.

Требуемый расход тепла на нагревание бетона:

$$Q_{\text{н.б}}^{\tau} = 277200 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(24 \cdot 3600 \text{ с}) = 3208 \text{ Вт}.$$

4.1.4. При возведении монолитных конструкций укладку бетона осуществляют в нагретую до бетонирования опалубку, в связи с чем расход тепла на нагревание щитов опалубки в расчете не учитывается: $Q_{\text{н.о}} = 0$.

4.1.5. Требуемая мощность теплогенератора определяется по формуле

$$Q_{\text{теп}} = 7078 \text{ Вт} + 12422 \text{ Вт} + 0 + 3208 \text{ Вт} = 22708 \text{ Вт}.$$

4.1.6. С учетом требуемой мощности для осуществления конвективного прогрева был выбран электрокалорифер СФО-25, мощностью 25 000 Вт (табл. 74).

Таблица 74

Теплофизическая характеристика	Марка электрокалорифера					
	ЭКО-60	ЭК-52	ЭК-40	ЭТВ4-30	СФО-25	СФОО-18
Мощность ТЭН, кВт	67,5	52,5	37,5	30,0	25,0	18,0
Производительность вентилятора, м^3/ч	4000	2600	2020	4100	1341	1000

Окончание табл. 74

Теплофизическая характеристика	Марка электрокалорифера					
	ЭКО-60	ЭК-52	ЭК-40	ЭТВ4-30	СФО-25	СФОО-18
Фирма-производитель	ОАО «Мовен» (Москва)	ЗАО «Урал-Микма-Терм» (Миасс)	ООО «Сибпром-комплект»	ООО «Тепло» (Омск)	ЗАО «Делсот» (Миасс)	ЗАО ПТК «Лингас» (Нижний Новгород)

4.2. Расчет температуры в приопалубочном пространстве. Температура в приопалубочном пространстве ($t + \Delta t$) для конвективного прогрева с приопалубочными шторами определяется из решения системы уравнений. Величина Δt принимается равной 15 °С. Выполняется расчет потерь тепла через ограждения, аналогичный расчету, приведенному в табл. 73:

$$Q_{\text{опал. стены}} = 17{,}7 \cdot t_{\text{т}} + 547;$$
$$Q_{\text{опал. перекр}} = 14{,}7 \cdot t_{\text{т}} + 456;$$
$$Q_{\text{штор}} = 45{,}0 \cdot t_{\text{т}} + 720;$$
$$Q_{\text{пол}} = 76{,}5 \cdot t_{\text{т}} + 1224.$$

Потери тепла через приопалубочные шторы:

$$Q_{\text{приоп. шт}} = (\Delta t \cdot F_{\text{приоп. шт}})/R_{\text{приоп. шт}} = 15 \cdot 54{,}9/0{,}24 = 3431 \text{ Вт}.$$

Потери тепла на инфильтрацию

$$Q_{\text{и}} = 270{,}0 \cdot t_{\text{т}} + 4320.$$

Из равенства расхода и поступления тепла в рассматриваемом тоннеле:

$$Q_{\text{теп}} = Q_{\text{опал. стены}} + Q_{\text{опал. перекр}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{пол}} + Q_{\text{шт}} + Q_{\text{приоп. шт}} =$$
$$= 423{,}9 \cdot t_{\text{т}} + 10698.$$

После подстановки мощности выбранного теплогенератора СФО-25 вычисляется температура в тоннеле: $t_{\text{т}} = 34$ °С. Температура в приопалубочном пространстве:

$$(t_{\text{т}} + \Delta t) = 49 \text{ °С}.$$

4.3. Определение температуры в бетоне. Согласно требованиям строительных норм, прочность бетона монолитных конструкций перекрытий к моменту разопалубки при пролете до 6 м должна составлять не менее 70 % от проектной прочности; прочность бетона монолитных конструкций стен – не менее 40 % от проектной прочности.

Поэтому конструкцией, определяющей продолжительность термообработки, является перекрытие, которое может быть разопалублено через 90 ч (или 3,5 сут). Продолжительность выдерживания перекрытия определяется по графику нарастания прочности бетона в зависимости от средней температуры твердения, как следует из выполненного расчета, +49 °С.

5.8. Паропрогрев бетона

Область применения

Паропрогрев бетона монолитных конструкций следует применять при наличии на строительном объекте достаточного количества пара. Паропрогрев бетона на грунтах, не допускающих увлажнения, не разрешается.

Для паропрогрева бетона должен быть использован насыщенный пар с давлением не более 0,07 МПа. Паропрогрев следует применять, как правило, при выдерживании конструкций небольшой толщины: полов, днищ резервуаров, перекрытий и т. д.

Сущность метода. Паропрогрев с нагнетанием пара в объем бетона

Сущность способа заключается в использовании сухих бетонных смесей, которые укладывают и уплотняют в опалубке, после чего их влагонасыщают и разогревают за счет нагнетания водяного пара под избыточным (рекомендуемым) давлением в 0,3–0,6 МПа. Пар подводят к смеси через перфорацию труб,

объемных вкладышей или иных устройств, которые устанавливают в опалубку одновременно с ведением арматурных работ и извлекают для дальнейшего использования после подачи пара. Перфорацию пароподводящих устройств (например, труб металлических ∅ 25–50 мм многократного использования) выполняют в виде отверстий ∅ 5–10 мм на рабочую высоту (на 50–100 мм меньше высоты слоя бетона захватки или конструкции). Их крепят растяжками к опалубке или арматуре. Допускается установка труб в процессе укладки сухой бетонной смеси с самофиксацией их при ее уплотнении.

Допускается охлаждение сухих смесей до начала подачи пара без ограничения температуры, остановки в работе по ее укладке в опалубку при отрицательной температуре воздуха до 30 дней. На период остановки в работе поверхность бетонируемой захватки должна быть укрыта от попадания влаги в виде дождя или снега и воздействия ветра, чтобы исключить вынос цемента с поверхности уложенной бетонной смеси.

Укладку сухой бетонной смеси ведут по матерчатому рукаву – течке, что обеспечивает ее нерасслаиваемость и предотвращает пылеобразование.

При малых объемах бетонирования рационально транспортировать и укладывать сухую бетонную смесь с использованием мешкотары. Уплотняют сухую бетонную смесь штыкованием, вибрированием, трамбованием. Верхний слой смеси рекомендуется уплотнять трамбованием с одновременным выравниванием поверхности.

Водяной пар для влагонасыщения и разогрева бетона может быть получен от теплоцентрали либо от мобильных передвижных парогенерирующих устройств, смонтированных на шасси автомобиля (например, ППУ-160-100) или на прицепных шасси. Конденсация пара при контакте с более холодными компонентами сухой бетонной смеси сопровождается образованием воды, обеспечивающей реакции гидратации и твердение цемен-

та, и выделением большого количества теплоты, позволяющей разогревать бетон с высокой скоростью за относительно короткий период времени подачи пара. В табл. 75 приведены данные о скорости разогрева бетона водяным паром, который при давлении 0,2–1,0 МПа характеризуется температурой 120–179 °С.

Таблица 75

Параметры пара $P_{нас}$, МПа (T, °С)	0,2(121)	0,4(144)	0,6(158)	0,8(170)	1,0(179)
Скорость разогрева бетона $V_р$, °С/мин	2	5	9	13	18

За время подачи пара в течение 15–30 мин бетон разогревают до температуры в 60–90 °С (при меньшем значении для бетона с добавками ускорителями твердения и большем значении для бетона на шлакопортландцементе), после чего он твердеет по методу термоса.

Рекомендуемая продолжительность термостатического твердения бетона (остывания с опалубкой) составляет 16–24 ч, что обеспечивает прочность бетона до 50–90 % от проектной. Разопалубку конструкций следует осуществлять при безопасной разнице температур наружных слоев бетона и воздуха (см. табл. 60, п. 8).

5.8.1. Методика расчета режима термосного твердения бетона сухого формования с пароразогревом сухой бетонной смеси

1. При расчете параметров паронасыщения бетона определяют режим паронасыщения сухой смеси и рациональное размещение пароподводящих труб, обеспечивающее равномерное распределение жидкости в объеме бетонируемой конструкции.

Определяют величину истинной (фактической) пористости цемента в уплотненной сухой бетонной смеси на основании данных о фактических расходах составляющих бетона по формуле

$$m_{\text{и}} = 1 - \frac{\text{Ц}_{\text{ф}}}{\left[1 - \left(\frac{\text{П}_{\text{ф}}}{\rho_{\text{п}}^{3}} + \frac{\text{Щ}_{\text{ф}}}{\rho_{\text{щ}}^{3}}\right)\right]\rho_{\text{ц}}},$$

где $\rho_{\text{п}}^{3}$, $\rho_{\text{щ}}^{3}$ – плотность зерен песка и крупного заполнителя, кг/м^3, а $\rho_{\text{ц}}$ – плотность цемента, кг/м^3; $\text{П}_{\text{ф}}$, $\text{Щ}_{\text{ф}}$, $\text{Ц}_{\text{ф}}$ – фактические расходы песка, крупного заполнителя и цемента, кг, полученные после корректировки их номинальных (расчетных) значений по фактической средней плотности (уплотненной принятым при ведении работ способом) сухой бетонной смеси; расчетные значения расходов составляющих бетона допускается определять как специальным методом, так и общепринятыми методами подбора состава обычного бетона при расчетном количестве воды, соответствующем подвижности бетонной смеси в 0–1 см осадки стандартного конуса.

Рассчитывают эффективную пористость цемента $m_{\text{э}}$ по зависимости

$$m_{\text{э}} = 1,0456 \cdot m_{\text{и}} - 0,0456.$$

Принимают значение коэффициента $K_{\text{п}}$ для планируемого к использованию давления пара $P_{\text{нас}}$ (рекомендуется $P_{\text{нас}}$ ~ ~ 0,3–0,6 МПа) при насыщении сухой бетонной смеси по табл. 76.

Таблица 76

Избыточное давление водяного пара $P_{\text{нас}}$, МПа	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Значение $K_{\text{п}}$	39	38	37	36	35	34	33	31	30

Определяют требуемый диапазон температуры разогрева, с учетом начальной температуры сухой бетонной смеси $t_{\text{нач}}^{\text{см}}$, °С, по зависимости

$$\Delta t_{\text{раз}} = t_{\text{раз}} - t_{\text{нач}}^{\text{см}},\ \Delta t_{\text{раз}} = t_{\text{раз}} - t_{\text{нач}}^{\text{см}}.$$

Температуру разогрева бетона $t_{\text{раз}}$, °С, принимают с учетом вида используемого цемента по табл. 63 или, исходя из требуемого уровня критической прочности бетона к окончанию периода его твердения в опалубке, по данным рис. 52. В последнем случае значение $t_{\text{раз}}$ принимают на 20–25 °С больше, чем $t_{\text{ср}}$ на рис. 52. При использовании добавок ускорителей твердения бетона среднюю температуру его твердения принимают по рис. 52: 40, 45, 50 °С, соответственно, для портландцемента 1-й, 2-й и 3-й групп эффективности при пропаривании, и 55–60 °С – для шлакопортландцемента.

Определяют время подачи пара $t_{\text{раз}}$, мин, для насыщения сухой бетонной смеси с учетом требуемого диапазона температуры разогрева бетона $\Delta t_{\text{раз}}$, °С, и скорости ее подъема $V_{\text{р}}$, °С/мин, по зависимости

$$t_{\text{нас}}^{\text{р}} = \Delta t_{\text{раз}} / V_{\text{р}}.$$

Скорость разогрева бетона $V_{\text{раз}}$ в зависимости от параметров пара принимают по данным табл. 60.

Определяют расчетный радиус распространения жидкости R, м, от места подвода пара через пароподводящую трубу по формуле

$$R = \frac{m_{\text{э}}}{1 - m_{\text{э}}} \sqrt{\frac{t_{\text{нас}}^{\text{р}} \cdot P_{\text{нас}}}{K_{\text{п}}}}.$$

Уточняют время подачи пара по установленной величине R на соответствие значения $t_{\text{нас}}^{\text{р}}$, рассчитанной по критерию обеспечения температуры разогрева бетона, условию введения при этом в бетон достаточного количества воды для влагонасыщения сухой смеси по формуле

$$t_{\text{нас.вл}} = K_{\text{п}} \frac{R^2}{P_{\text{нас}}} \left(\frac{1 - m_{\text{э}}}{m_{\text{э}}} \right).$$

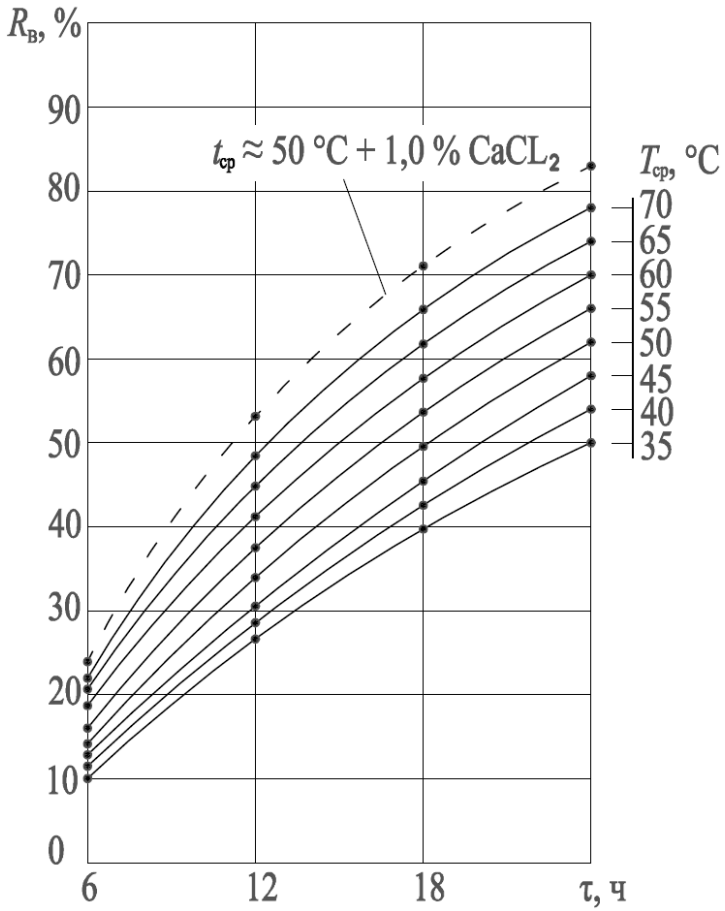


Рис. 52. Зависимость прочности бетона от средней температуры и времени твердения в условиях термоса

Должно соблюдаться условие $t^{р}_{нас} \geq t_{нас.вл}$.

Если окажется, что $t^{р}_{нас} < t_{нас.вл}$, то при изготовлении контрольных образцов и для практической работы используют время паронасыщения $t_{нас.вл}$.

Определяют расстояние между пароподводящими трубами L, м, из зависимости

$$L = \sqrt{2 \cdot R} = 1,414R,$$

с учетом рекомендуемого расстояния от труб до опалубки не более $0,5L$.

Определяют количество пароподводящих труб, необходимое для ведения работ в зависимости от значения L, размеров и конструктивных особенностей бетонируемого элемента (захватки).

2. Основной задачей расчета параметров разогрева и твердения бетона является определение температурного режима твердения бетона в опалубке, обеспечивающего за расчетный период (рекомендуется до 24 ч) достижение прочности бетона не ниже критической. Для решения этой задачи необходимо установить температуру начального разогрева бетона $t_{раз}$, °С, ее изменение за время твердения в виде величины средней ($t_{ср}$) и конечной ($t_{бк}$) температур в зависимости от конкретных условий ведения работ: модуля теплоотдающей поверхности конструкции (захватки) $М_п$, $м^{-1}$; коэффициента теплопередачи опалубки $K_т$, Вт/(м^2·°С); температуры окружающей среды $t_{нв}$, °С; теплофизических характеристик бетона и др. Расчет осуществляют в следующей последовательности.

Назначают уровень критической прочности бетона $f_{ст.кр}$ в соответствии с требованиями табл. 60 и проектной документации.

Определяют расчетное значение средней температуры бетона $t_{ср}$, °С, которое обеспечит достижение требуемой $f_{ст.кр}$ в процентах от проектной прочности бетона за планируемое время твердения по рис. 52.

Определяют фактическое расстояние распространения жидкости (конденсата пара) $R_ф$, м, от места подвода пара по зависимости

$$R_{\text{ф}} = 0,5L,$$

где L – расстояние между влагоподводящими трубами.

Корректируют расчетную среднюю температуру разогрева бетона $t_{\text{ср}}$, °С, с учетом значения $t_{\text{раз}}$, °С, и величины $R_{\text{ф}}$, м, по зависимости

$$t_{\text{ср}}^{\text{р}} = \frac{t_{\text{р}} + t_{R_{\text{ф}}}}{2},$$

где $t_{R_{\text{ф}}}$ – температура бетона на наибольшем удалении от паропроводящей трубы, т. е. на расстоянии $R_{\text{ф}}$, м. В расчетах принимают снижение температуры разогрева по мере удаления от места подвода пара равным Δt = 1,0 °С/см, а значение $t_{R_{\text{ф}}}$, °С, определяют из выражения

$$t_{R_{\text{ф}}} = t_{\text{раз}} - R_{\text{ф}} \cdot \Delta t.$$

Цель корректировки – обеспечить соответствие температурного режима твердения бетона значению $t_{\text{ср}}$, °С, определенному по рис. 52.

Контрольное определение температуры разогрева бетона осуществляют при изготовлении и паронасыщении контрольных образцов.

Определяют конечную температуру бетона $t_{\text{бк}}$, °С, по истечении времени твердения $\tau_{\text{ост}}$, ч, в опалубке с коэффициентом теплопередачи $K_{\text{т}}$, Вт/(м^2·°С), при модуле теплоотдающей поверхности конструкции $\text{М}_{\text{п}}$, м$^{-1}$, и температуре окружающей среды $t_{\text{н.в}}$, °С, по формуле

$$t_{\text{бк}} = t_{\text{р}} - \frac{3,6 \cdot \tau_{\text{ост}} \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}} (t_{\text{ср}}^{\text{р}} - t_{\text{н.в}})}{\text{С}_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}}},$$

где $C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость свежеотформованного бетона, принимаемая равной: $C_{\text{б}}$ = 1,05 кДж/(кг·°С); $\gamma_{\text{б}}$ – средняя плотность бетона, кг/м^3.

Уточняют значение ожидаемой средней температуры бетона за период $t_{ср}^{ож}$ для конкретных условий ведения работ, °С, по формуле

$$t_{ср}^{ож} = t_{б.к} + \frac{t_{ср}^{р} - t_{б.к}}{1{,}03 + 0{,}181 \cdot М_{п} + 0{,}006(t_{ср}^{р} - t_{б.к})}.$$

Оценивают соответствие расчета конкретным условиям ведения работ путем сравнения значения по формуле с установленным по графическим зависимостям (рис. 52). При отклонении величины $t_{ср}^{ож}$ более чем на 5 % следует уточнить расчет.

В случае если значение средней температуры бетона оказывается ниже требуемой, следует задаться более высокой температурой его разогрева, в пределах рекомендуемых (табл. 60) величин, уменьшить расстояние между пароподводящими трубами или рассчитать необходимый для данных условий ведения работ коэффициент теплопередачи опалубки, Вт/(м^2·°С), по формуле

$$K_{т} = \frac{C_{б} \cdot \gamma_{б}(t_{ср}^{р} - t_{б.к})}{3{,}6 \cdot М_{п}(t_{ср}^{ож} - t_{н.в})},$$

и обеспечить его за счет подбора соответствующей конструкции опалубки и укрытия неопалубленных поверхностей.

Контроль качества бетона с паронасыщением и разогревом сухой смеси, твердевшего в условиях термоса, осуществляют по методикам действующих стандартов, как и для бетона из традиционной водозатворенной смеси, твердевшего при различных видах прогрева.

Оперативный контроль соответствия прочности паронасыщенного бетона ее расчетному значению осуществляют, контролируя величину фактического водоцементного отношения (не должна превышать принятого при расчете значения, что устанавливают при изготовлении контрольных образцов), а также по прочности бетона, установленной по контрольным образцам

или неразрушающим методом после расчетного времени выдерживания бетона в опалубке.

Расчетное (ожидаемое) значение водоцементного отношения бетона сухого формования определяют с учетом зависимости

$$m_{\text{и}} = 1 - \frac{\text{Ц}_{\text{ф}}}{\left[1 - \left(\frac{\text{П}_{\text{ф}}}{\rho_{\text{п}}^{3}} + \frac{\text{Щ}_{\text{ф}}}{\rho_{\text{щ}}^{3}}\right)\right]\rho_{\text{ц}}},$$

т. е. по объему пор цемента, которые при насыщении заполняет вода (конденсат) $B_{\text{погл}}$, л, в количестве

$$B_{\text{погл}} = m_{\text{и}}\left[1 - \left(\frac{\text{П}_{\text{ф}}}{\rho_{\text{п}}^{3}} + \frac{\text{Щ}_{\text{ф}}}{\rho_{\text{щ}}^{3}}\right)\right]10^{3},$$

и по фактическому расходу цемента $\text{Ц}_{\text{ф}}$:

$$\text{В/Ц} = \text{В}_{\text{погл}}/\text{Ц}_{\text{ф}}.$$

5.8.2. Расчет режима термосного твердения бетона сухого формования с пароразогревом сухой бетонной смеси

Исходные данные:

Рассчитать параметры режима твердения бетона монолитного железобетонного ленточного фундамента с пароразогревом уложенной и уплотненной в опалубке сухой бетонной смеси по следующим исходным данным:

– конструкция – ленточный железобетонный фундамент (коэффициент армирования $P_{\text{а}} < 1$ %) с сечением стенки: ширина $B = 0{,}5$ м, высота $H = 1{,}5$ м; захватка в плане – прямоугольник с размерами в осях 12×3 м, имеющий внутреннюю стенку такого же сечения, расположенную перпендикулярно к середине большей стороны фундамента (рис. 53); модуль поверхности общий $\text{М}_{\text{п}} = 5$ м$^{-1}$; объем бетона 24,4 м^3; бетон класса В20 на портланд-

цементе М400 (C_3A < 7 %), состав сухих компонентов в уплотненной штыкованием сухой бетонной смеси: $Ц_ф$ = 295 кг; $П_ф$ = = 826 кг; $Щ_{ф,5–20}$ = 1210 кг;

– состав бетона подобран традиционным методом, абсолютных объемов для класса В20, как для обычного тяжелого бетона при осадке конуса 0–1 см ($(В/Ц)_{расч}$ = 0,59), и откорректирован по фактической средней плотности уплотненной штыкованием сухой бетонной смеси; характеристики заполнителей: $\rho_п^3$ = 2650 кг/м^3; $\rho_щ^3$ = 2700 кг/м^3; плотность цемента $\rho_ц$ = 3100 кг/м^3; для парана-сыщения сухой бетонной смеси используют мобильную парогенерирующую установку; давление пара при насыщении $P_{нас}$ = 0,3 МПа;

– опалубка с палубой из водостойкой ламинированной фанеры толщиной δ = 12 мм; плотностью γ = 700 кг/м^3, $K_т$ = = 7,0 Вт/(м^2·°С) при $V_в$ = 5 м/с; планируемая оборачиваемость опалубки – 2 сут (на период твердения бетона, после окончания паронасыщения и съема пароподводящих труб); опалубку укрывают гидро-, теплоизолирующим покрывалом, расчетный коэффициент теплопередачи опалубки с укрытием равен: $K_т$ = = 1,5 Вт/(м^2·°С) при скорости ветра $V_в$ = 5 м/с;

– требуемая по проектной документации распалубочная прочность бетона – не менее 70 % от проектной: $R_{б.расп}$ = 70 %;

– температура наружного воздуха $t_{н.в}$ = –10 °С;

– температура сухой бетонной смеси перед насыщением $t_{нач}^{см}$ = –10 °С.

Последовательность и результаты расчета

1. Устанавливают, что требуемая по проектной документации распалубочная прочность (при обеспеченности 0,95 и $V_т$ = 13,5 %) $R_{б.расп}$ = 70 % от $R_{28} \sim 0{,}8 \cdot 20/0{,}7786 = 20{,}5$ МПа удовлетворяет значению $R_{б.крит}$ (табл. 60).

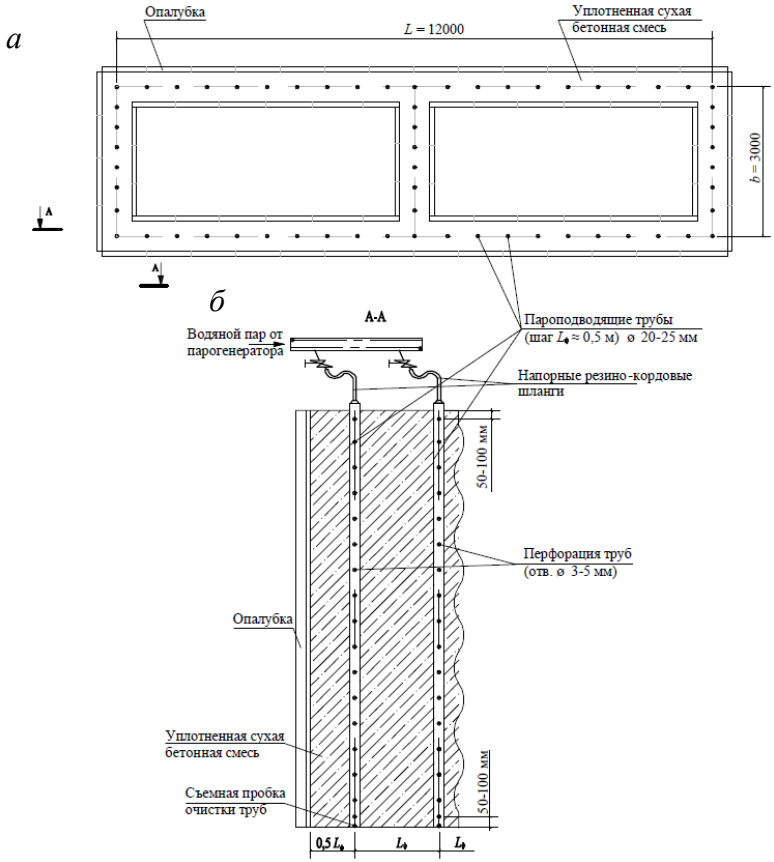


Рис. 53. Схема плана ленточного фундамента (*а*) и подвода пара к сухой бетонной смеси (*б*) для расчета режима термосного твердения бетона сухого формования с пароразогревом сухой смеси

2. Определяют по данным рис. 52 расчетное значение средней температуры бетона $t_{ср}$, необходимое для обеспечения 70 % от R_{28}.

Приняв время выдерживания бетона в опалубке 24 ч, устанавливают, что расчетное значение $t_{ср} \sim 57$ °С.

3. Определяют расчетное значение температуры разогрева бетона $t_р$ с учетом ограничений табл. 3 для портландцемента, соблюдая условие

$$t_р \sim t_{ср} + (20–25), \text{ тогда } t_р \approx 80\ °C.$$

4. Определяют параметры паронасыщения сухой бетонной смеси.

4.1. Определяют величину истинной пористости $m_и$ по формуле и данным о фактических расходах материалов и их характеристиках:

$$m_и = 1 - \frac{295}{\left[1 - \left(\frac{826}{2650} + \frac{1210}{2700}\right)\right]3100} = 0,6.$$

4.2. Определяют эффективную пористость по формуле:

$$m_э = 1{,}0456 \cdot m_и - 0{,}0456;$$

$$m_э = 1{,}056 \cdot 0{,}6 - 0{,}0456 = 0{,}582.$$

4.3. Определяют требуемый диапазон температуры разогрева смеси по формуле:

$$\Delta t_р = t_р - t_{нач}^{см};$$

$$\Delta t_р = 80 - (-10) = 90\ °C.$$

4.4. Определяют время подачи пара $t_{нас}^{р}$ для насыщения сухой бетонной смеси по формуле, приняв по табл. 75 скорость разогрева $V_р = 3{,}5$ °С/мин для водяного пара под давлением $P_{нас} = 0{,}3$ МПа:

$$t_{нас}^{р} = \Delta t_р / V_р;$$

$$t_{нас}^{р} = 90/3{,}5 = 26 \text{ мин}.$$

4.5. Определяют расчетный радиус распространения жидкости (конденсата) R по формуле, приняв по табл. 76 значение $K_п = 38$ для пара под давлением $P_{нас} = 0{,}3$ МПа:

$$R = \frac{m_э}{1-m_э}\sqrt{\frac{t^р_{нас}\cdot P_{нас}}{K_п}} = \frac{0,582}{1-0,582}\sqrt{\frac{26\cdot 0,3}{38}} = 0,6 \text{ м.}$$

4.6. Уточняют время подачи пара $t_{нас.вл}$ по формуле

$$t_{нас.вл} = K_п \frac{R^2}{P_{нас}}\left(\frac{1-m_э}{m_э}\right) = 38\frac{0,6^2}{0,3}\left(\frac{1-0,582}{0,582}\right) = 23,5 \text{ мин.}$$

Условие $t^р_{нас} \geq t_{нас.вл}$ соблюдается.

4.7. Определяют расстояние между пароподводящими трубами L с учетом формулы:

$$L = \sqrt{2\cdot R} = 1,414R = 1,414\cdot 0,6 = 0,85 \text{ м.}$$

Полученное расстояние в осях между пароподводящими трубами соответствует расстановке их в симметрично-шахматном порядке при насыщении массивов значительной площади.

В рассматриваемом случае (ширина стенки фундамента B = 0,5 м) рациональна расстановка труб в один ряд по оси стенки с «шагом», не превышающим 0,85 м и кратным межосевым размерам конструкции в плане. Например, принимаем шаг расстановки $L_ф$ пароподводящих труб равным 0,5 м.

4.8. Определяют количество пароподводящих труб для водонасыщения и разогрева бетона захватки.

Для стенки фундамента наружного контура (размер прямоугольника в осях 12×3 м)

$$(2 \cdot 12 + 2 \cdot 3)/0,5 = 60 \text{ шт.}$$

Для внутренней стенки фундамента

$$2,5/0,5 = 5 \text{ шт.}$$

5. Определяют параметры температурного режима твердения бетона.

5.1. Определяют фактическое расстояние $R_ф$ распространения жидкости (конденсата) по зависимости, с учетом принятого $L_ф = 0{,}5$ м:

$$R_ф = 0{,}5 \cdot L = 0{,}5 \cdot 0{,}5 = 0{,}25 \text{ м}.$$

5.2. Уточняют расчетную среднюю температуру бетона.

Для этого определяют расчетную температуру бетона на расстоянии $R_ф$, °С, с учетом ее снижения по мере удаления $\Delta t = 1$ °С/см:

$$t_{Rф} = t_{раз} - R_ф \cdot \Delta t;$$

$$t_{Rф} = 80 - 25 \cdot 1{,}0 = 55 \text{ °С}.$$

Корректируют расчетную среднюю температуру разогрева бетона $t_{ср}$, °С, с учетом значения $t_{раз}$, °С, и величины $R_ф$, м, по зависимости

$$t_{б.ср} = \frac{t_р + t_{R_ф}}{2} = \frac{80 + 55}{2} = 67{,}5 \text{ °С}.$$

Ее значение обеспечивает требуемое условие: $t_{б.ср} > t_{расч} \approx$ ≈ 57 °С, $t_{расч}$ принята по данным рис. 52.

5.3. Определяют конечную температуру бетона $t_{б.к}$ через 24 ч термосного твердения после его паронасыщения и разогрева по формуле, с учетом

$$K_т = 1{,}5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°С)} \text{ и } \text{М}_п = 5 \text{ м}^{-1};$$

$$t_{б.к} = t_р - \frac{3{,}6 \cdot \tau_{ост} \cdot K_т \cdot \text{М}_п (t_{ср}^р - t_{н.в})}{C_б \cdot \gamma_б} =$$

$$= 67{,}5 - \frac{3{,}6 \cdot 24 \cdot 1{,}5 \cdot 5(67{,}5 + 10)}{1{,}05 \cdot 2500} = 48{,}4 \text{ °С}.$$

5.4. Уточняют значение ожидаемой средней температуры при твердении бетона в течение $\tau_{ост} = 24$ ч по формуле:

$$t_{\text{ср}}^{\text{ож}} = t_{\text{б.к}} + \frac{t_{\text{ср}}^{\text{р}} - t_{\text{б.к}}}{1,03 + 0,181 \cdot \text{М}_{\text{п}} + 0,006(t_{\text{ср}}^{\text{р}} - t_{\text{б.к}})} =$$

$$= 48,4 + \frac{67,5 - 48,4}{1,03 + 0,181 \cdot 5 + 0,006(67,5 - 48,4)} = 58 \text{ °C}.$$

Полученное значение средней температуры бетона за период твердения $\tau_{\text{ост}}$ = 24 ч обеспечивает требуемое условие $t_{\text{ср}}^{\text{рас}} > t_{\text{расч}} \approx 57$ °C, $t_{\text{расч}}$ принята по данным рис. 52.

6. Определяют температуру бетона при распалубке $t_{\text{расп}}$, при которой обеспечивается безопасный перепад температуры Δt между ним и наружным воздухом ($t_{\text{н.в}} = -10$ °C).

По данным табл. 60 принимают для рассматриваемого случая ($\text{М}_{\text{п}} = 5$ м$^{-1}$; $\text{Р}_{\text{а}} < 1$ %) $\Delta t = 20$ °C. Тогда

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

или

$$t_{\text{расп}} = -10 + 20 = 10 \text{ °C}.$$

7. Определяют допустимое время остывания бетона в режиме охлаждения конструкции, предварительно приняв по табл. 60 скорость остывания для $\text{М}_{\text{п}} = 5$ м$^{-1}$, равную $V_{\text{ост}} = 5$ °C/ч, по формуле

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{расп}}}{V_{\text{ост}}} = \frac{48,4 - 10}{5} = 8 \text{ ч},$$

при $t_{\text{п}} = t_{\text{б.к}} = 48,4$ °C.

8. Определяют время естественного остывания бетона с опалубкой $K_{\text{т}}$ = 7,0 Вт/(м^2·°C) при снятом утепляющем временном укрытии по формуле

$$\tau_{\text{о}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}}(t_{\text{раз}} - t_{\text{б.к}}) + \text{Ц} \cdot \text{Э}}{3,6 \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}}(t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}})}$$

при средней за период остывания температуре:

$$t_{\text{ср}}^{\text{ож}} = t_{\text{б.к}} + \frac{t_{\text{ср}}^{\text{р}} - t_{\text{б.к}}}{1{,}03{+}0{,}181 \cdot \text{М}_{\text{п}}{+}0{,}006(t_{\text{ср}}^{\text{р}} - t_{\text{б.к}})} =$$

$$= 10 + \frac{48{,}4 - 10}{1{,}03 + 0{,}181 \cdot 5 + 0{,}006(48{,}4 - 10)} = 28\ ^{\circ}\text{C};$$

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{1{,}05 \cdot 2400(48{,}4 - 10)}{3{,}6 \cdot 7 \cdot 5(28 - 10)} = 20\ \text{ч}.$$

С учетом планового оборота опалубки за 2 сут принимают время выдерживания бетона в опалубке, включающее пропаривание и термостатическую выдержку с временным утепляющим укрытием и естественное остывание бетона с опалубкой по режиму: 24 ч + 20 ч.

9. Проверяют соответствие водоцементного отношения пропаренного бетона его расчетному значению, по исходным данным равному:

$$\text{В/Ц}_{\text{расч}} \approx 0{,}59.$$

Проверку расчетным путем осуществляют по ожидаемому количеству «поглощенной» сухой бетонной смесью воды (конденсата):

$$B_{\text{погл}} = m_{\text{и}}\left[1 - \left(\frac{\text{П}_{\text{ф}}}{\rho_{\text{п}}^{3}} + \frac{\text{Щ}_{\text{ф}}}{\rho_{\text{щ}}^{3}}\right)\right]10^{3} = 0{,}6\left[1 - \left(\frac{826}{2650} + \frac{1210}{2700}\right)\right]10^{3} = 146\ \text{л},$$

которое контролируют при изготовлении пробных образцов бетона.

В рассматриваемом случае ожидаемое значение В/Ц = = 146/305 ≈ 0,48, что ниже принятого при расчете расхода составляющих бетона традиционным способом $(\text{В/Ц})_{\text{расч}} \approx 0{,}59$,

и гарантирует обеспечение его прочности не ниже расчетного значения.

10. При использовании добавок ускорителей твердения бетона расчет осуществляют с учетом того, что расчетное значение температуры разогрева $t_{раз}$ должно быть равным значению средней температуры бетона за период твердения $t_{ср}$, которое определяют по графикам рис. 52, исходя из уровня требуемой распалубочной или критической прочности бетона, т. е. должно соблюдаться условие: $t_{раз} = t_{ср}$, принятое на рис. 53 для конкретных условий ведения работ.

6. ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ТЕРМООБРАБОТКИ БЕТОНА

В современной технологии монолитного строительства применяются разные методы термообработки бетона, но только хорошее знание возможностей каждого метода позволяет грамотно и экономично выбирать наилучший для конкретных температурных условий среды, видов возводимых конструкций, возможностей производственной организации и др. факторов.

Как показывает опыт производства зимних бетонных и железобетонных работ, методы производства таких работ, как правило, принимаются безальтернативно в соответствии с накопленным опытом в той или иной строительной организации. При этом параметры выбранного способа производства работ часто не имеют должного расчетного обоснования.

Решение задачи должно включать следующие этапы:

1) предварительный выбор метода зимнего бетонирования исходя из гарантированного набора бетоном проектной прочности в заданные сроки;

2) расчетное подтверждение правильности выбранного метода зимнего бетонирования;

3) расчет необходимой суммарной мощности нагревателей (в случае применения прогревных методов) с учетом интенсивности теплообмена всех граней конструкции и температуры окружающего воздуха;

4) расчет электрической сети нагревателей;

5) анализ температурного поля в прогреваемом бетоне с целью выявления возможных непрогретых или перегретых мест уже на стадии проектирования.

Нередки случаи, когда при применении прогревных методов ограничиваются только предпоследним из перечисленных

выше пунктов, а при использовании беспрогревных методов (противоморозных добавок) не учитывают, что проектная прочность бетона при низких температурах воздуха набирается только через 60–90 дней. И уж совсем не учитываются жесткие ограничения при применении противоморозных добавок в сочетании с прогревом бетона.

Особенности применения противоморозных добавок в сочетании с прогревом бетона сводятся к следующему:

1. Противоморозные добавки вводят в бетонную смесь перед ее укладкой и последующим прогревом бетона для понижения температуры льдообразования и сохранения более продолжительного срока удобоукладываемости смеси в случаях, когда условия транспортирования и укладки ее при отрицательной температуре наружного воздуха не позволяют сохранить положительную температуру до начала прогрева.

2. Рекомендуемые добавки: ХК + ХН, ХК + НН, ННК и НН.

При этом добавка ННК характеризуется ускорением сроков ее загустевания. Поэтому дополнительно в нее рекомендуется вводить замедлитель схватывания цемента СДБ до 0,5 % от массы цемента.

Запрещается вводить в обогреваемый бетон поташ, так как это приводит к недобору его прочности (более 30 %) и снижению морозостойкости, а также добавки, содержащие мочевину, которая разлагается при температуре выше 40 °С. Количество применяемых противоморозных добавок в бетоне зависит от допускаемой температуры его остывания до начала прогрева (табл. 77).

Необходимо помнить, что универсальных методов нет и каждый метод может дать наилучший эффект только при разумном его применении.

В реальных условиях производства монолитных бетонных и железобетонных конструкций, только сочетание двух, а в иных случаях и нескольких методов, может привести к оптимальному результату решения задачи.

Таблица 77

Количество противоморозных добавок при последующем прогреве бетона

Температура остывания бетона до электропрогрева		Количество добавок в расчете на сухое вещество, % от массы цемента			
От	До				
0	–5	4	4	0 + 2	1 + 1,5
–6	–10	6	7	0 + 3	1,5 + 2
–11	–15	8	10	1 + 3	3 + 3,5
–16	–20	10	–	1,5 + 3,5	4,5 + 5,5

Комбинированные методы термообработки бетона представляют собой синтез двух или более классических методов, сочетание которых в единой технологии зимнего бетонирования позволяет существенно расширить диапазон области их применения и осуществить бетонирование конструкций практически при любой температуре наружного воздуха, и ***ранней их распалубкой.***

Таким образом, комбинированные методы термообработки бетона в зимних условиях, благодаря ряду комплексных преимуществ, позволяют наиболее успешно реализовать их для возведения монолитных бетонных и железобетонных строительных конструкций, как каркасных жилых и гражданских зданий, так и промышленных сооружений.

6.1. Пример расчета выдерживания бетона методом термоса с предварительным отогревом грунта основания

Включает последовательное решение трех задач:

1. Выбор способа и времени отогрева грунтовых оснований.

2. Расчет требуемой температуры бетонной смеси на выходе из бетоносмесителя.

3. Продолжительность остывания бетона, твердеющего в условиях «термоса», до времени достижения этим бетоном критической прочности.

Зимними условиями бетонирования считаются при снижении среднесуточной температуры наружного воздуха не выше 5 °С с переходом ее в течение суток через 0 °С.

Во избежание недобора прочности и ухудшения других строительно-технических свойств бетона его прочность перед замораживанием должна быть не менее:

– для бетонов без противоморозных добавок – 50, 40 и 30 % от марочной при классах бетонов соответственно В12,5; В15; В22,5 и выше;

– для конструкций, подвергающихся по окончании выдерживания попеременному замораживанию и оттаиванию, – 70 % от марочной;

– для преднапряженных конструкций – 80 % от марочной. Возведение железобетонных конструкций может быть осуществлено, как правило, с использованием нескольких способов зимнего бетонирования.

Наиболее широко применяемые способы зимнего бетонирования приведены в табл. 78.

Во всех случаях неопалубленную поверхность свежеуложенного бетона укрывают гидроизоляционным рулонным материалом (полимерная пленка, рубероид), поверх которого укладывают утеплитель.

Кинетика роста прочности бетона, в зависимости от температурного режима твердения, приведена на рис. 54. По ним ориентировочно можно определить, достигнута ли критическая прочность бетона к моменту распалубки, а в последующем и замораживанию конструкций.

Технологические показатели способов отогрева промороженных суглинистых оснований с влажностью 15 % приведены в табл. 79.

Таблица 78

Способ	Область применения		Ориентировочные дополнительные затраты на 1 м^3 бетона		Дополнительные сведения
	по модулю поверхности конструкций	по температуре наружного воздуха, °С	энергии, тыс. кДж	труда, чел.-ч.	
Термос	До 2 До 6	До –20 До –10	237	1,7–2,14	Наиболее простой способ в производстве работ Необходимость в эффективном утеплителе Необходимость приготовления бетона с противоморозной добавкой Простота производства работ на строительной площадке
Термос с добавками-ускорителями или с противоморозными добавками	До 5 До 8	До –40 До –20	–	1,6–2,2	
Противоморозные добавки	Без ограничений	До –20 или –25	88	1,8–2,2	Замедленные темпы твердения бетона Необходимость приготовления бетона с противоморозными добавками
Предварительный электроразогрев бетонной смеси	До 4 До 12	До –25 До –5	188	2,2–2,9	Простота производства работ на строительной площадке Потребность в больших электрических мощностях

Окончание табл. 78

Способ	Область применения		Ориентировочные дополнительные затраты на 1 м^3 бетона		Дополнительные сведения
	по модулю поверхности конструкций	по температуре наружного воздуха, °С	энергии, тыс. кДж	труда, чел.-ч.	
Сквозной электропрогрев с применением стержневых электродов	Без ограничений	Без ограничений	175	7,1–8,6	Наиболее распространенный способ
Периферийный электропрогрев с применением полосовых электродов	Без ограничений	Без ограничений	175	4,8–5,9	Простота производства работ на строительной площадке
Обогрев в термоактивной опалубке	Без ограничений	Без ограничений	175	4–4,8	Наибольшая простота производства работ на строительной площадке, по сравнению с другими способами электрообработки бетона в конструкции

Примечание. В таблице приведены данные для конструкций с модулем поверхности 4–6 в опалубке с коэффициентом теплопередачи 3,6 Вт/(м^2·°С), при температуре наружного воздуха 15–20 °С, приобретаемая бетоном прочность 70 % от марочной.

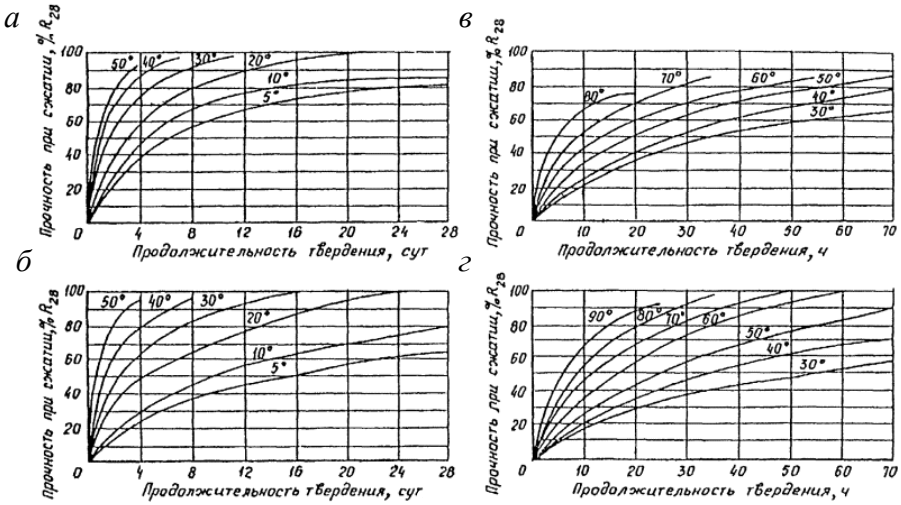


Рис. 54. Кривые набора прочности бетоном при различных температурах его выдерживания:

а, *в* – для бетона на портландцементе активностью 400–500; *б*, *г* – для бетона на шлакопортландцементе активностью 300–400

Таблица 79

Технологические показатели разных способов отогрева промороженных оснований (на $h > 0{,}5$ м)

Способы отогрева грунта	Требуемая электромощность, кВт, на 1 м^3 основания	Расход энергии или топлива на 1 м^3 грунта или искусственного основания на глубину $h > 0{,}3$ м
Щиты греющей опалубки или термоактивные гибкие покрытия	1–2	20–23 кВт·г
Теплогенераторы на жидком топливе	–	14 кг
Вертикальные электроды глубинные	1–2	18–20 кВт·г

Окончание табл. 79

Способы отогрева грунта	Требуемая электромощность, кВт, на 1 м^3 основания	Расход энергии или топлива на 1 м^3 грунта или искусственного основания на глубину $h > 0{,}3$ м
Вертикальные электроды в толще мерзлого грунта	1–2	44–48 кВт·г
Плоские жидкостно-топливные нагреватели	–	9 г

Температура грунтового или искусственного основания перед бетонированием должна исключать возможность замерзания бетона на контакте с ним в процессе выдерживания до приобретения им заданной прочности.

Обогрев промороженного основания производят при пучинистом грунтовом основании на глубину не менее 0,5 м, при непучинистом или искусственном основании – на глубину не менее 0,3 м. Размеры отогреваемого участка основания должны быть на 800–1000 мм больше с каждой стороны размеров в плане бетонируемой конструкции.

Искусственные и грунтовые основания отогревают при помощи: термоактивных щитов греющей опалубки или термоактивных гибких покрытий, укладываемых рабочей поверхностью вниз; горячим воздухом (с температурой не более 150 °С при отогреве бетонного основания) от теплогенераторов, работающих на жидком топливе; вертикальными стержневыми электродами, забиваемыми в грунт на глубину промерзания или ниже, если она не превышает 0,6 м, на расстоянии друг от друга (подключенных к разным фазам), равном 0,4–0,5 м; огневым способом с помощью жидкостно-топливных нагревателей.

Время отогрева грунтовых оснований термоактивной опалубкой принимается ориентировочно по табл. 80.

Таблица 80

Ориентировочное время оттаивания и отогрева грунтовых оснований нормальной влажности до температуры на поверхности 5–10 °С, ч

Температура наружного воздуха, °С	Глубина промерзания, мм	Мощность нагревателей, Вт/м^2			
		1000	1200	1500	2000
		Средняя температура на палубе, °С			
		40	60	70	85
Песчаные и супесчаные основания					
До –15	300	7	5	4,5	4
	500	9	7	6	5
	700	10	8	7	6
	1000	15	11	10	9
До –25	500	11	9	8	7
	700	12	10	9	8
	1000	19	14	12	11
	1200	22	17	14	13
До –35	500	12	9	8	7
	700	14	11	9	8
	1000	19	15	13	11
	1200	24	18	16	15
	1500	30	23	21	19
Глинистые и суглинистые основания					
До –15	300	6	5	4	3
	500	8	7	5	4
	700	9	8	6	5
	1000	13	11	10	9
До –25	500	9	7	6	5
	700	11	9	8	7
	1000	16	12	10	9
	1200	19	14	12	11
	1500	23	18	15	14
До –35	500	10	8	7	6
	700	12	9	8	7
	1000	16	13	11	10
	1200	20	16	14	13
	1500	25	19	17	16

При радиальном методе оттаивания мерзлых грунтов используются электрические иглы различных конструкций и трубчатые электронагреватели. При глубинном оттаивании (метод «снизу вверх») используются вертикальные глубинные электроды и электроиглы с нижним нагревом.

Одним из наиболее распространенных методов радиального оттаивания является метод оттаивания электрическими иглами. Существуют различные конструкции электроиглы, которые в основном различаются по их мощности и температуре.

Электроигла представляет собой цельнотянутую стальную трубу диаметром 42–60 мм и длиной 1200–1500 мм, в которой вставлена электронагревательная нихромовая спираль, засыпанная чистым кварцевым песком. Радиус оттаивания иглы 0,3–0,4 м, время оттаивания 10–12 ч, глубина оттаивания 1,5 м, электроемкость оттаивания 30–35 кВт·ч/м^3. Электроигла с нижним нагревом имеет в нижней части иглы длиной 500 мм шесть секций спирали, что позволяет их использовать при оттаивании грунта на глубину менее длины самой электроиглы (1200–1500 мм).

Время оттаивания грунта иглами определяется по формуле В.В. Магинского:

$$\tau = \frac{0,2 d_{\text{ц}}^2}{a \cdot K \cdot d_{\text{и}}^{0,75}},$$

где $d_{\text{ц}}$ – диаметр прогретого цилиндра грунта за время τ; a – коэффициент температуропроводности грунта; K – коэффициент теплопередачи между теплоносителем и грунтом (при расчетах его можно принимать: для сухих прослоек равным 30 ккал/(м^2·ч), для мокрых – 50 ккал/(м^2·ч); $d_{\text{и}}$ – диаметр иглы.

Пример. Определить время оттаивания грунта иглой при следующих условиях:

– влажность грунта 20 % по массе;

– коэффициент теплопроводности грунта $\lambda = 2$ ккал/(м·ч·°С);

– плотность грунта $\gamma = 1800$ кг/м^3;
– удельная теплоемкость сухого грунта $C = 0{,}22$ ккал/(кг·°С);
– средняя начальная температура по высоте иглы $t_н = -1$ °С;
– диаметр иглы = 0,025 м;
– коэффициент иглы $t_и = +40$ °С;
– массовая доля незамерзшей влаги в грунте $\varepsilon_{н.в} = 0{,}2$;
– массовая доля замерзшей воды в грунте $\varepsilon_{з.в} = 0{,}8$.

Определим усредненную удельную теплоемкость грунта $C_у$ по формуле

$$C_у = C(1-\varepsilon_{н.в}) + \varepsilon_{н.в}\left[1+\frac{80+0{,}5\cdot t_н}{t_к - t_н}\varepsilon_{з.в}\right] =$$

$$= 0{,}22(1-0{,}2) + 0{,}2\left[1+\frac{80+0{,}5(-1)}{13+1}0{,}8\right] = 0{,}944 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{°С)},$$

где $t_к$ – температура грунта как средняя параболическая между –1° и +40 °С; по кругу – (40 – 1)/3 = +13 °С.

Определим коэффициент температуропроводности грунта (или утеплителя) по формуле

$$a = \frac{\lambda}{C_у \cdot \gamma},$$

где $C_у$ – удельная теплоемкость грунта в ккал/(кг·°С); γ – объемная масса грунта, кг/м^3; λ – коэффициент теплопроводности мерзлых грунтов (табл. 81); $\lambda = 1{,}98$ ккал/(м·ч·°С).

$$a = \frac{2}{0{,}944\cdot 1800} = 0{,}0012;$$

$$\tau = \frac{0{,}2(0{,}6)^2}{0{,}0012\cdot 30(0{,}025)^{0{,}75}} = 34{,}7 \text{ ч.}$$

Таблица 81

Характеристики строительных и теплоизоляционных материалов

Материалы	Ед. изм.	Толщина слоя, мм	Объемная масса, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)
Бетон	–	–	2400	2,6	1,05
Минераловатные плиты на синтетическом связующем (мягкие и полужесткие)	м^3	20–40	100	0,05–0,07	0,76
Минераловатные плиты на битумном связующем (мягкие и полужесткие)	м^3	40	100	0,05–0,07	0,92
Тоже	м^3	40	200	0,07–0,08	0,92
Маты минераловатные прошивные	м^3	40	100	0,048	0,76
То же	м^3	40	200	0,06	0,76
Пенопласт плиточный	м^3	50	100	0,043	1,34
То же	м^3	50	150	0,049	1,34
То же	м^3	50	200	0,06	1,34
Войлок строительный	м^3	9–11	100	0,06–0,10	0,35
То же	м^3	9–11	150	0,07–0,12	0,45
Опилки	м^3	–	250	0,16–0,24	2,2
Шлак	–	–	600	0,24–0,29	–
Фанера	м^3	8 и более	600	0,17–0,20	2,72
Рубероид, пергамин, толь	м^2	1,0–2,0	600	0,17	1,47
Древесина, доски	м^3	20 и более	700	0,17	2,72
Сталь	кг	3–5	7850	52	0,48

Окончание табл. 81

Материалы	Ед. изм.	Толщина слоя, мм	Объемная масса, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)
Глина	–	–	1800	1,82	1,24
Суглинок	–	–	1750	1,50	1,16
Супесь	–	–	1600	1,10	1,13
Песок	–	–	1500	0,60	1,09

Требуемая температура свежеуложенного бетона в конструкции перед началом выдерживания должна быть не менее:

– при термосном выдерживании – определяемой расчетом для достижения бетоном заданной прочности в процессе остывания;

– при использовании бетонов с противоморозными добавками – на 5 °С выше температуры замерзания жидкой фазы бетона, т. е. содержащейся в бетоне воды с добавками;

– при всех способах электротермообработки бетона в конструкции и парообогреве – +2 °С.

Требуемая температура бетонной смеси на выходе из смесителя определяется по формуле (при температуре наружного воздуха ниже 0 °С):

$$t_{\text{см}} = \frac{t_{\text{б.н}} - t_{\text{н.в}} \sum \Delta t}{1 - \sum \Delta t},$$

где $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С; $t_{\text{б.н}}$ – температура бетона в начале бетонирования, °С; Δt – суммарное относительное снижение температуры бетонной смеси при всех операциях от выгрузки из смесителя в транспорт до окончания укладки, укрытия и утепления неопалубленной поверхности свежеуложенного бетона, °С/(°С·мин).

Относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения операции $\Delta t = \Delta t' \cdot \tau$, где $\Delta t'$ – относительное снижение средней температуры бетонной смеси при конкретной операции в течение 1 мин при разнице температур смеси и наружного воздуха 1 °С, °С/(°С·мин); τ – продолжительность операции, мин.

Величина $\Delta t'$ при транспортировании бетонной смеси составляет:

– самосвалами ЗИЛ-555 (2 м^3) – 0,003; МАЗ-503 (3,2 м^3) – 0,0025;

– автобетоносмесителями С-1036 (2,5 м^3) – 0,0024; СБ-92 (3,5 м^3) – 0,0019; АМ-65Н (5 м^3) – 0,0014; АМ-65Н (5 м^3) – 0,0004;

– в поворотных бункерах краном – 0,0022H (H – высота подъема бункера);

– при каждой погрузке или перегрузке – 0,032.

При укладке бетонной смеси в конструкцию и ее уплотнении величина $\Delta t'$ зависит от толщины конструкции (табл. 82).

Таблица 82

Изменение температуры $\Delta t'_у$ при укладке и уплотнении

Относительное снижение температуры при укладке $\Delta t'_у$	Толщина конструкции, мм
0,03	60
0,018	100
0,012	150
0,009	200
0,007	300
0,005	400
0,004	500
0,003	600

Сущность термосного выдерживания бетона заключается в нагревании бетона за счет подогрева заполнителей и воды,

а также использования тепла, выделяющегося при твердении цемента, для приобретения бетоном заданной прочности в процессе его медленного остывания в утепленной опалубке.

Первая задача термосного выдерживания бетона – определение продолжительности остывания конструкции и прочности бетона к моменту остывания (при известной конструкции опалубки).

Для решения этой задачи необходимо, чтобы были рассчитаны следующие параметры:

1. Объем бетонируемой конструкции, $м^3$.

2. Величина поверхности охлаждения конструкции, для чего суммируют площади поверхностей, соприкасающихся с охлаждающим конструкцию наружным воздухом, $м^2$.

3. Модуль поверхности конструкции, $м^{-1}$, $М_п = F/V$.

4. Начальное теплосодержание бетона, кДж,

$$Q_1 = C_б \cdot \gamma_б \cdot V \cdot t_{б.н},$$

где $C_б$ – удельная теплоемкость бетона, равная 1,05 кДж/(кг·°С); $\gamma_б$ – плотность железобетона, равная 2500 кг/м; V – объем бетона в одном фундаменте, $м^3$; $t_{б.н}$ – начальная температура бетона, °С (принимается по условию задачи).

5. Температура системы «бетон + арматура»

$$t' = \frac{\left(C_б \cdot \gamma_б \cdot t_{б.н} + C_а \cdot P_а \cdot t_а\right)}{C_б \cdot \gamma_б + C_а \cdot P_а},$$

где $C_а$ – теплоемкость арматурной стали, кДж/(кг·°С) (табл. 83); $P_а$ – расход стали на 1 $м^3$ бетона, $кг/м^3$ (принимается по условию задачи); $t_а$ – температура арматурной стали, численно равна температуре наружного воздуха (принимается по условию задачи).

6. Количество тепла, расходуемое на нагрев арматуры, кДж,

$$Q_2 = C_а \cdot P_а \cdot V(t' - t_а).$$

7. Расчетная температура нагрева опалубки, °С,

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

8. Тепло, расходуемое на нагрев опалубки, кДж,

$$Q_{\text{з}} = C_{\text{оп}} \cdot F_{\text{охл}} \cdot \delta_{\text{оп}} \cdot \gamma_{\text{оп}} (t'_{\text{оп}} - t_{\text{а}}),$$

где $C_{\text{оп}}$ – удельная теплоемкость дерева, из которого выполнена опалубка, кДж/(кг·°С) (табл. 83); $F_{\text{охл}}$ – площадь охлаждаемой поверхности, м; $\delta_{\text{оп}}$ – толщина опалубки, м; $\gamma_{\text{оп}}$ – объемная масса дерева, кг/м^3 (табл. 83).

Таблица 83

Теплофизическая характеристика строительных и теплоизоляционных материалов

Материал	Объемная масса в сухом состоянии, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·°С)	Расчетная величина коэффициента теплопроводности, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость в сухом состоянии, кДж/(кг·°С)
Железобетон	2500	1,68	2,03	0,84
Бетон на гравии или щебне из природного камня	2400	1,56	1,86	0,84
Шлакобетон и бетон на аглоперите	1800	0,7	0,93	–
То же	800	0,23	–	–
Керамзитобетон	1600	0,52	0,93	0,84
То же	600	0,16	0,23	0,84
Шлак	600	0,14	0,29	–
То же	800	0,17	0,34	
Вата минеральная	100	0,04	0,49	0,76
То же	150	0,05	0,06	0,76
Плиты мягкие, полужесткие и жесткие минераловатные:				

Продолжение табл. 83

Материал	Объемная масса в сухом состоянии, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·°С)	Расчетная величина коэффициента теплопроводности, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость в сухом состоянии, кДж/(кг·°С)
на синтетическом связующем	100	0,046	0,052	0,76
на битумном связующем	200	0,058	0,067	0,92
то же	300	0,069	0,081	0,92
то же	100	0,046	0,062	0,92
Плиты минераловатные	100	0,044	0,048	0,76
То же	200	0,053	0,06	0,76
Маты минераловатные рулонированные на синтетическом связующем	50	0,039	0,046	0,75
То же	75	0,043	0,049	0,76
Маты и полосы из стеклянного волокна	175	0,049	0,056	0,84
Хвойные породы дерева поперек волокон	550	0,093	0,17	2,52
Лиственные породы дерева поперек волокон	700	0.104	0,23	2,52
Фанера клееная	600	0,116	0,17	2,52
Плиты древесноволокнистые и древесностружечные	1000	0,15	0,29	2,1
То же	600	0,104	0,16	2,1
То же	400	0,081	0,14	2Д
То же	200	0,058	0,08	2,1

Окончание табл. 83

Материал	Объемная масса в сухом состоянии, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·°С)	Расчетная величина коэффициента теплопроводности, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость в сухом состоянии, кДж/(кг·°С)
Опилки	250	0,069	0,24	–
Оргалит	300	0,064	0,16	–
Пенопласт плиточный	200	0,049	0,047	
То же	100	0,041	0,043	1,34
То же	150	0,046	0,049	1,34
Мипора	15	0,041	0,052	1,34
Картон строительный многослойный	650	0,12	0,17	1,34
Рубероид, пергамин, толь кровельная	600	0,17	0,17	1,47
Сталь	7600	52	–	0,48
Снег рыхлый, сухой	300	0,29	–	2,1

9. Температура бетона к началу остывания конструкции

$$t_{\text{б.н}} = \left[Q_1 - \left(Q_2 + Q_3 \right) \right] / C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot V.$$

10. Средняя температура твердения бетона за время остывания конструкции

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

где $t_{\text{б.к}}$ – температура бетона к концу остывания, по условию задачи.

11. Значение коэффициента теплопередачи опалубки, Вт/(м^2·°С),

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

где α – коэффициент теплопередачи у наружной поверхности ограждения, Вт/(м^2·°С), зависящий от скорости ветра (определяется по табл. 84); δ_i – толщина опалубки или утеплителя, м; λ_i – коэффициент теплопроводности материала опалубки или утеплителя (табл. 87).

Таблица 84

Значение α от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	α, Вт/(м^2·°С)	Скорость ветра, м/с	α, Вт/(м^2·°С)	Скорость ветра, м/с	α, Вт/(м^2·°С)
0	3,77	3	14,69	10	33,18
1	3,88	5	26,56	15	43,15

12. Продолжительность остывания конструкции без учета влияния экзотермии цемента

$$\tau' = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} (t_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}})}{3,6 \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}} (t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}})}.$$

Величина тепловыделения (Э) цемента за время τ' при средней температуре твердения бетона $t_{\text{б.ср}}$ представлена в табл. 85.

13. Продолжительность остывания конструкции с учетом влияния экзотермии цемента

$$\tau' = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} (t_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}}) + \text{Ц} \cdot \text{Э}}{3,6 \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}} (t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}})}.$$

14. Прочность бетона, которую он наберет за время τ' при средней температуре твердения бетона $t_{\text{б.ср}}$ (табл. 86а–86г).

Таблица 85

Тепловыделение цементов различных видов и марок в зависимости от температуры и времени твердения

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение, Дж/кг							
		Время твердения, сут							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портландцемент М300	10	8,4	25,9	41,9	83,9	125,7	188,6	230,6	272,4
	20	25,2	41,9	75,4	125,7	167,6	230,5	251,4	283,3
	40	50,3	83,8	146,7	188,6	230,5	251,4	293,3	–
	60	83,8	146,7	188,6	230,5	272,4	298,3	–	–
Портландцемент М400	5	–	–	29,3	62,9	108,9	188,4	209,5	251,4
	10	12,6	25,2	50,3	104,8	146,7	209,5	251,4	293,3
	20	41,9	66,9	104,8	167,6	209,5	272,4	314,3	335,2
	40	83,7	133,9	188,6	230,5	272,4	314,3	335,2	–
	60	129,8	188,4	230,5	272,4	314,3	335,2	–	–
Портландцемент М500	5	12,6	25,2	41,9	88,8	125,7	188,6	230,5	272,4
	10	25,2	41,9	62,9	104,8	167,6	251,4	393,3	314,3
	20	41,9	83,8	125,7	188,6	251,4	293,3	335,2	377,1
	40	104,8	167,6	209,5	272,4	293,3	356,2	377,1	–
	60	188,6	230,5	272,4	314,3	356,2	377	–	–
БТЦ М600	10	33,5	50,3	75,4	125,7	167,6	372,4	335,2	377,1
	20	62,9	104,8	146,7	209,5	293,3	335,2	377,1	419
	40	117,3	188,6	230,5	293,3	335,2	377,1	419	–
	60	209,5	251,4	293,3	335,2	377,1	419	–	–
ШПЦ М300	10	–	25,2	33,5	62,9	104,8	167,6	209,5	230,5
	20	–	33,5	62,9	125,7	146,7	209,5	251,4	272,4
	40	41,9	75,4	117,3	167,6	209,5	251,4	272,4	–
	60	62,9	104,8	146,7	209,5	230,5	272,4	–	–

Таблица 86а

Нарастание прочности бетона классов В15–В22,5 на шлакопортландцементе М400, % от R_{28}

Возраст бетона, сут	Температура, °С								
	–3	0	5	10	20	30	40	50	60
1/2	–	1	4	5	12	17	28	38	50
1	3	5	9	12	23	35	45	55	63
2	6	12	19	25	40	55	65	75	80
3	8	18	27	37	50	65	77	85	–
5	12	28	38	50	65	78	90	–	–
7	15	35	48	58	75	87	98	–	–
14	20	50	62	72	87	100	–	–	–
28	25	65	77	85	100	–	–	–	–

Таблица 86б

Нарастание прочности бетона класса В15 на портландцементе М300, % от R_{28}

Возраст бетона, сут	Температура бетона, °С								
	–3	0	5	10	20	30	40	50	60
1/2	–	–	2	5	8	15	20	–	–
1	–	4	6	10	18	27	36	45	52
2	–	8	12	18	30	43	55	65	72
3	5	12	20	25	40	52	65	75	–
5	8	20	30	40	55	65	78	–	–
7	10	30	38	48	64	74	85	–	–
14	12	40	52	64	80	90	100	–	–
28	15	55	68	80	100	–	–	–	–

Таблица 86в

Нарастание прочности бетона класса В30 на портландцементе М500, % от R_{28}

Возраст бетона, сут	Температура бетона, °С								
	–3	0	5	10	20	30	40	50	60
1	–	8	12	18	28	40	55	65	70
2	–	16	22	32	50	63	75	85	90
3	10	22	32	45	60	74	85	92	98
5	16	32	45	58	74	85	96	–	–
7	19	40	55	66	82	92	100	–	–
14	25	57	70	80	92	100	–	–	–
28	30	70	80	90	100	–	–	–	–

Таблица 86г

Нарастание прочности бетона классов В15–В22,5 на шлакопортландцементе М400, % от R_{28}

Возраст бетона, сут	Температура бетона, °С								
	–3	0	5	10	20	30	40	50	60
1/2	–	–	2	4	7	20	25	32	42
1	–	3	6	10	16	30	40	50	65
2	3	8	12	18	30	40	66	75	90
3	5	13	18	25	40	55	70	90	–
5	8	20	27	35	55	65	85	–	–
7	10	25	34	43	65	70	92	–	–
14	12	35	50	60	80	96	100	–	–
28	15	45	65	80	100	–	–	–	–

Вторая задача термосного выдерживания бетона – подбор конструкции опалубки для обеспечения требуемых условий твердения бетона. Для решения этой задачи необходимо рассчитать:

1. Объем бетонируемой конструкции V, м^3.

2. Поверхность охлаждения бетонируемой конструкции F, м^2.

3. Модуль поверхности бетонируемой конструкции $М_п = F/V$.

4. Температуру бетона с учетом тепла, израсходованного бетоном на нагрев арматуры, °С, по формуле

$$t'_{б.н} = \frac{\left(C_б \cdot \gamma_б \cdot t_{б.н} + C_а \cdot P_а \cdot t_а\right)}{C_б \cdot \gamma_б + C_а \cdot P_а}.$$

5. Среднюю температуру твердения бетона в процессе его остывания в течение 3 сут по табл. 86, зная требуемую прочность бетона в конце его остывания, или по формуле

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

6. Экзотермию цемента – по известным данным о средней температуре твердения бетона $t_{б.ср}$ и времени твердения бетона (см. табл. 85).

7. Расчетный коэффициент теплопередачи опалубки и утеплителя

$$K_р = \frac{C_б \cdot \gamma_б (t'_{б.н} - t_{б.к}) + Ц \cdot Э}{3,6 \cdot \tau \cdot М_п (t_{б.ср} - t_{н.в})}.$$

8. Ориентировочно назначают конструкцию опалубки (табл. 87), соблюдая условие $K \geq K_{табл}$.

9. Если расчетный коэффициент теплопередачи значительно отличается от табличного, то требуемую толщину слоя теплоизоляции находят по формуле

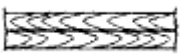
$$\delta_{из} = \lambda_{из}\left[\frac{1}{K_р} - \sum \frac{\delta_{оп}}{\lambda_{оп}}\right],$$

где $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, Вт/(м·°С); $K_р$ – расчетный коэффициент теплопередачи,

Вт/(м^2·°С); $\delta_{оп}$ и $\lambda_{оп}$ – соответственно, толщина и коэффициент теплопроводности отдельных слоев опалубки.

Таблица 87

Коэффициент теплопередачи опалубки различной конструкции $K_т$

№ п/п	Конструкция теплоограждения опалубки	Схема	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·°С) при скорости ветра, м/с		
			0	5	15
1	Доска 25 мм		2,44	5,22	5,97
2	Доска 40 мм		2,01	3,6	3,94
3	Толь (или рубероид), 1 слой Минераловатная плита или шлаковата, 40 мм Толь (или рубероид), 1 слой		1,2	1,57	1,65
4	Сталь, 3 мм Минеральная вата, 50 мм Фанера, 4 мм		1,02	1,27	1,33
5	Электронагреватель, 3 мм Доска, 25 мм		1,5–23	–	–
6	Электронагреватель, 3 мм Доска, 40 мм		1, 3–2	–	–
7	Электронагреватель, 3 мм Сталь, 3 мм		1,9–3,7	–	–
8	Доска, 25 мм Толь Доска, 25 мм		1,8	3,02	3,25
9	Доска, 25 мм Пенопласт, 30 мм Фанера, 4 мм		0,67	0,80	0,82
10	Доска, 25 мм Толь Минеральная вата, 50 мм Фанера, 4 мм		0,87	1,07	1,10

Например, опалубка может состоять из слоя досок, прокладки толя, слоя минеральной ваты и слоя фанеры. В таком случае нужно суммировать отношения толщин соответствующих слоев к их коэффициентам теплопроводности:

$$\sum \frac{\delta_{оп}}{\lambda_{оп}} = \frac{\delta_д}{\lambda_д} + \frac{\delta_т}{\lambda_т} + \frac{\delta_в}{\lambda_в} + \frac{\delta_ф}{\lambda_ф},$$

где $\delta_д$, $\delta_т$, $\delta_в$, $\delta_ф$ – соответственно, толщина слоя досок, толя, войлока (мин. вата) и фанеры, м; $\lambda_д$, $\lambda_т$, $\lambda_в$, $\lambda_ф$ – соответственно, коэффициенты теплопроводности дерева, толя, войлока и фанеры.

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

$$t_{оп}^{р} = \frac{(t'_{б.н} + t_{н.в})}{2}.$$

Тогда теплопроводность материалов конструкции опалубки

$$\lambda_т = \lambda_о(1 + 0,0025 \cdot t_{оп}^{р}),$$

где $\lambda_о$ – коэффициент теплопроводности материалов опалубки при 0 °С (принимается по табл. 83).

Продолжительность остывания бетона τ, ч, может быть определена по формуле Б.Г. Скрамтаева:

$$\tau = \frac{C_б \cdot \gamma_б (t_{б.н} - t_{б.к}) + Ц \cdot Э}{3,6 \cdot K_т \cdot М_п (t_{б.ср} - t_{н.в})},$$

где $C_б$ – удельная теплоемкость бетона, кДж/(кг·°С) (принимается 1,05); $\gamma_б$ – плотность бетона, кг/м^3 (по заданию); $t_{б.н}$, $t_{б.к}$, $t_{б.ср}$ –

температура бетона, соответственно, начальная (по окончании его укладки в опалубку), конечная (в конце выдерживания) и средняя (за время остывания), °С; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха средняя за сутки, °С; Ц – содержание цемента в бетоне, кг/м^3; Э – тепловыделение 1 кг цемента за время выдерживания бетона, кДж/кг (табл. 85); $K_т$ – коэффициент теплопередачи опалубки, Вт/(м^2·°С) (табл. 87); $М_п$ – модуль поверхности конструкции, м, $М_п = F/V$, где F – поверхность ограждения (опалубки) и открытая поверхность, м^2; V – объем конструкции, м^3.

Средняя температура бетона за время остывания, °С, вычисляется по формуле

$$t_{б.ср} = t_{б.н}/[1{,}03 + 0{,}181 \cdot М_п + 0{,}006(t_{б.н} - t_{б.к})].$$

Вычислив по формуле Б.Г. Скрамтаева продолжительность остывания, находят, исходя из средней температуры остывания, прочность бетона, % от R_{28}, к концу периода остывания по табл. 88 и сопоставляют ее с требуемой критической прочностью для распалубки и допустимостью замораживания конструкции.

Таблица 88

Кинетика набора прочности бетоном классов В15–В22,5 на портландцементе М400 и М500

Срок твердения, сут	Прочность бетона, % от R_{28}, при твердении в нормальных условиях									
	Средняя температура бетона, град									
	1		5		10		15		20	
	М400	М500	М400	М500	М400	М500	М400	М500	М400	М500
3	14	17	21	22	29	30	34	37	46	48
7	27	35	37	43	47	52	55	61	64	68
10	36	46	47	55	57	65	67	75	75	82
28	70	75	80	86	91	95	100	100	100	100

6.2. Расчет термообработки бетона с применением противоморозных добавок и тепловой обработки греющим проводом

Исходные данные:

Требуется подобрать вид и количество противоморозной добавки, а также рассчитать нагревательные элементы из провода марки ПНСВ со стальной жилой 1×1,6 мм, закладываемого в монолитную железобетонную плиту перекрытия размерами в плане 6×6 м и толщиной 250 мм, возводимую в инвентарной деревянной опалубке из фанеры толщиной 21 мм.

Бетон тяжелый, марки М300 (класс В22,5), на Чернореченском портландцементе марки М400, с расходом 350 кг/м^3, водоцементное отношение В/Ц составляет 0,35. Температура изотермического выдерживания +50 °С, режим обогрева – саморегулирующийся. Температура наружного воздуха ожидается –15 °С, скорость ветра 6 м/с. Электропитание осуществляют от прогревочного трансформатора типа ТСДЗ-63/0,38 с выходным напряжением 60 В. Расчетная удельная мощность на 1 пог. м греющего провода p равна 35 Вт/м. Площадь сечения токонесущей жилы S равна 2,01 мм^2. Электрическое сопротивление токонесущей жилы греющего провода R_t равно 0,143 Ом/м. Максимальная рабочая температура провода t составляет +98 °С. Требуемая прочность бетона к моменту окончания электрообогрева составляет 70 % от R_{28}.

Порядок расчета:

1. Определим объем бетона в конструкции:

$$V_б = 6 \cdot 6 \cdot 0,25 = 9,0 \text{ м}^3.$$

2. Определим модуль поверхности конструкции:

$$М_п = \frac{2}{\delta} = \frac{2}{0,25} = 8 \text{ м}^{-1},$$

где δ – толщина плиты, м.

3. Согласно прил. 19, при температуре остывания бетона до начала электрообогрева от 0 до –5 °С, в качестве противоморозной добавки можно применить нитрит натрия (НН) в количестве 4 % от расхода цемента, или

$$М_{нн} = 0,04 \cdot 350 = 14,0 \text{ кг/м}^3 \text{ бетона.}$$

4. Определим коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_к = \frac{4,32\left[(1,293 - 0,058 \cdot t_{н.в})\omega\right]^{0,8}}{(\delta)^{0,2}} =$$

$$= \frac{4,32\left[(1,293 - 0,058(-15))6\right]^{0,8}}{(0,25)^{0,2}} = 44,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)},$$

где ω – скорость ветра, м/с.

5. Определим коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_л = (4,6 + 0,045 \cdot t_{н.в})\varepsilon = (4,6 + 0,045(-15))0,65 = 2,55 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°С)}.$$

6. Определим приведенный коэффициент теплопередачи для плиты перекрытия (нижняя грань плиты с неутепленной опалубкой):

$$K^{н}_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_к + \alpha_л} + \sum \frac{\delta_{опал}}{\lambda_{опал}}};$$

для фанерной опалубки: $\delta_{опал} = 0,021$ м; $\lambda_{опал} = 0,18$ Вт/(м·°С), т. е.

$$K^{н}_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{44,3 + 2,55} + \frac{0,021}{0,18}} = 7,25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°С)}.$$

7. Определим приведенный коэффициент теплопередачи на верхней грани плиты с утеплением минплитой толщиной 50 мм:

$$K_{\text{пр}}^{\text{в}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{\frac{1}{44,3 + 2,55} + \frac{0,05}{0,047}} = 0,92 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

8. При толщине плиты более 200 мм греющий провод крепят с 2-х сторон в уровне нижней и верхней арматуры.

9. Удельная электрическая (тепловая) мощность, приходящаяся на единицу площади обогреваемых конструкций по нижней грани плиты:

$$P_{\text{уд}}^{\text{н}} = K_{\text{пр}}^{\text{н}}(t_{\max} - t_{\text{н.в}}) = 7,25(50 - (-15)) = 471,25 \text{ Вт/м}^2.$$

10. Удельная электрическая (тепловая) мощность, приходящаяся на единицу площади обогреваемых конструкций по верхней грани плиты:

$$P_{\text{уд}}^{\text{в}} = K_{\text{пр}}^{\text{в}}(t_{\max} - t_{\text{н.в}}) = 0,92(50 - (-15)) = 59,8 \text{ Вт/м}^2.$$

11. Суммарная электрическая мощность нагревателей по нижней и верхней грани плиты

$$P = (P_{\text{уд}}{}^{\text{н}} + P_{\text{уд}}{}^{\text{в}})F = (471,25 + 59,8)36 = 19117,8 \text{ Вт} = 19,13 \text{ кВт},$$

где F – площадь плиты, м^2.

12. Длина одного участка проволочного нагревателя

$$l_{\text{уч}} = \sqrt{\frac{U^2 \cdot S}{p \cdot \rho_t}} = \sqrt{\frac{U^2}{p \cdot R_t}} = \sqrt{\frac{60^2}{35 \cdot 0,143}} = 26,8 \text{ м}.$$

13. Шаг навивки проволочного нагревателя в уровне нижней арматуры

$$b_{\text{н}} = \frac{1}{\frac{P^{\text{н}}_{\text{уд}}}{p} + 1} = \frac{1}{\frac{471,25}{35} + 1} = 0,07 \text{ м} = 7,0 \text{ см}.$$

14. Шаг навивки проволочного нагревателя в уровне верхней арматуры

$$b_{\text{в}} = \frac{1}{\frac{P^{\text{в}}_{\text{уд}}}{p} + 1} = \frac{1}{\frac{59,8}{35} + 1} = 0,37 \text{ м} = 37,0 \text{ см}.$$

15. Определим время разогрева бетона:

$$\tau_{\text{р}} = \frac{t_{\max} - t_{\text{б.н}}}{V_{\text{р}}} = \frac{50 - 5}{10} = 4,5 \text{ ч}.$$

16. Определим среднюю температуру разогрева бетона:

$$t^{\text{ср}}_{\text{р}} = \frac{t_{\text{б.н}} + t_{\max}}{2} = \frac{5 + 50}{2} = 27,5 \text{ °C}.$$

17. По графику (рис. П.4.7, П.4.8) определим, что за время разогрева бетон класса В22,5 на портландцементе М400 набирает прочность $R_{\text{р}}$, равную 5 % от R_{28}.

18. Определим среднюю температуру бетона за время остывания:

$$t_{\text{б.ср}} = t_{\text{б.к}} + \frac{t_{\max} - t_{\text{б.к}}}{1,03 + 0,181 \cdot \text{М}_{\text{п}} + 0,006(t_{\max} - t_{\text{б.к}})} =$$

$$= 5 + \frac{50 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 8 + 0,006(50 - 5)} = 21,4 \text{ °C}.$$

19. Пренебрегая тепловыделением цемента Э, определим время остывания бетона:

$$\tau_{ост} = \frac{C_б \cdot \gamma_б \left(t_{мах} - t_{б.к}\right)}{3,6 \cdot K_т \cdot М_п \left(t_{б.ср} - t_{н.в}\right)} = \frac{1,05 \cdot 2400(50-5)}{3,6 \cdot 7,25 \cdot 8(21,4-(-15))} = 15 \text{ ч.}$$

20. По графику (рис. П.4.7, П.4.8) определим, что за время остывания бетон класса В22,5 на портландцементе М400 набирает прочность $R_{ост}$, равную 3 % от R_{28}.

21. По графику (рис. П.4.7, П.4.8) определим, что оставшуюся прочность $R_{из} = 70 - (R_р + R_{ост}) = 70 - (5 + 3) = 62$ % от R_{28} бетон класса В22,5 на портландцементе М400 набирает за время изотермического прогрева $\tau_{из} = 34$ ч.

6.3. Расчет электропрогрева бетона буронабивной сваи в сочетании с применением противоморозных добавок

Исходные данные:

Требуется подобрать вид и количество противоморозной добавки, а также рассчитать потребную тепловую мощность и режим электротермообработки бетона буронабивной сваи диаметром 400 мм и высотой 8,0 м.

Свая по периметру армируется 13 продольными стержнями диаметром 12 мм, с шагом 100 мм, и по высоте 81 поперечными стержнями диаметром 8 мм, с шагом 100 мм. Бетон тяжелый, марки М300 (класс В22,5), на Чернореченском портландцементе марки М400, с расходом 350 кг/м^3, водоцементное отношение В/Ц составляет 0,35. Температура изотермического выдерживания +50 °С, начальная температура бетона к моменту начала электропрогрева 0 °С, ожидаемая температура грунта – 15 °С. Требуемая прочность бетона к моменту окончания электропрогрева составляет 70 % от R_{28}.

Порядок расчета:

1. Определим объем бетона в конструкции:

$$V_{б} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} h = \frac{3{,}14(0{,}4^2)}{4} 8 = 1{,}0 \text{ м}^3.$$

2. Определим модуль поверхности конструкции:

$$\text{М}_{п} = \frac{2}{R} + \frac{2}{h} = \frac{2}{0{,}2} + \frac{2}{8} = 10{,}25 \text{ м}^{-1},$$

где R – радиус сваи, м.

3. Определим коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_{л} = (4{,}6 + 0{,}045 \cdot t_{н.в})\varepsilon = (4{,}6 + 0{,}045(-15))0{,}65 = 2{,}55 \text{ Вт/(м}^2 \cdot °\text{С)}.$$

где ε – степень черноты полного нормального излучения материала (при расчетах можно принимать ε = 0,65); $t_{н.в}$ – температура грунта, °С.

4. Определим коэффициент теплопередачи в зоне контакта бетона и грунта:

$$K_{пр} = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_{к} + \alpha_{л}} + \sum \dfrac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{\dfrac{1}{0 + 2{,}55} + 0} = 2{,}55 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot °\text{С)}.$$

5. Согласно табл. П.4.13, при температуре остывания бетона до начала электропрогрева от 0 до –5 °С, в качестве противоморозной добавки можно применить нитрит натрия (НН) в количестве 4 % от расхода цемента, или

$$\text{М}_{нн} = 0{,}04 \cdot 350 = 14{,}0 \text{ кг/м}^3 \text{ бетона}.$$

6. Количество противоморозной добавки НН, в % от веса воды затворения (В):

$$\frac{\text{М}_{нн}}{\text{В}} = \frac{14}{0{,}35 \cdot 350} = 0{,}114.$$

7. Определим электрическую мощность, необходимую для разогрева 1 м^3 бетона сваи:

$$P_{\text{р}}^{\text{уд}} = P_1 + P_2 + P_3 = 7 + 0{,}18 + 1{,}11 = 8{,}29 \text{ кВт/м}^3,$$

где P_1 – мощность на разогрев бетона, кВт/м^3; P_2 – мощность на нагрев арматуры, кВт/м^3; P_3 – мощность на возмещение теплопотерь, кВт/м^3.

Удельная мощность, требуемая для разогрева бетона от $t_{\text{б.н}}$ до $t_{\max}$ в течение $\tau_{\text{р}}$, т. е. со скоростью

$$V_{\text{р}} = \frac{t_{\max} - t_{\text{б.н}}}{\tau_{\text{р}}},$$

составит:

$$P_1 = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \left(t_{\max} - t_{\text{б.н}}\right)}{3600 \cdot \tau_{\text{р}}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot V_{\text{р}} \cdot \gamma_{\text{б}}}{3600} = \frac{1{,}05 \cdot 2400 \cdot 10}{3600} = 7{,}0 \text{ кВт/м}^3,$$

где $C_{\text{б}}$ – объемная темплоемкость бетона, кДж/(кг·°С); $\gamma_{\text{б}}$ – удельная масса бетона, кг/м^3.

$$P_2 = \frac{C_{\text{а}} \cdot \text{А} \cdot V_{\text{р}}}{3600} = \frac{0{,}48 \cdot 133{,}4 \cdot 10}{3600} = 0{,}18 \text{ кВт/м}^3,$$

где $C_{\text{а}}$ – удельная теплоемкость арматуры, кДж/(кг·°С); А – расход арматуры, кг/м^3.

$$P_3 = \frac{K_{\text{пр}} \cdot \text{М}_{\text{п}}}{1000}\left(\frac{t_{\max} - t_{\text{б.н}}}{2} - t_{\text{н.в}}\right) =$$

$$= \frac{2{,}55 \cdot 10{,}25}{1000}\left(\frac{50 - (-5)}{2} - (-15)\right) = 1{,}11 \text{ кВт/м}^3.$$

8. Определим электрическую мощность, необходимую для поддержания заданной температуры в процессе изотермического прогрева:

$$P_{\text{из}}^{\text{уд}} = \frac{K_{\text{пр}} \cdot \text{М}_{\text{п}} \left(t_{\max} - t_{\text{н.в}}\right)}{1000} = \frac{2{,}55 \cdot 10{,}25(50 - (-15))}{1000} = 1{,}7 \text{ кВт/м}^3.$$

9. Общая электрическая мощность, необходимая для разогрева бетона сваи,

$$P_{\text{р}} = P_{\text{р}}^{\text{уд}} \cdot V_{\text{б}} = 8,29 \cdot 1,0 = 8,29 \text{ кВт}.$$

10. Общая электрическая мощность, необходимая для изотермического прогрева бетона сваи,

$$P_{\text{из}} = P_{\text{из}}^{\text{уд}} \cdot V_{\text{б}} = 1,7 \cdot 1,0 = 1,7 \text{ кВт}.$$

11. Принимаем прогревочный трансформатор типа ТСДЗ-63/0,38 с выходным напряжением U = 49,60,70,85,103 и 121 В.

12. По табл. П.4.14 для Чернореченского портландцемента величины начального и минимального удельного электрического сопротивления равны: $\rho_{\text{нач}}$ = 7,9 Ом·м и $\rho_{\text{мин}}$ = 5,5 Ом·м.

13. Согласно табл. П.4.16, введение противоморозной добавки НН уменьшает $\rho_{\text{нач}}$ бетона на 3,65 %.

Таким образом, $\rho_{\text{нач}}$ = 7,9 · 0,9635 = 7,61 Ом·м.

14. Расчетное удельное электрическое сопротивление бетона определяется формулой

$$\rho_{\text{расч}} = \frac{\rho_{\text{нач}} + \rho_{\text{мин}}}{2} = \frac{7,61 + 5,5}{2} = 6,555 \text{ Ом·м}.$$

15. Электропрогрев бетона сваи осуществляем при помощи струнного электрода, устанавливаемого по оси конструкции. Струнный электрод подключается к одной фазе, а арматура сваи – к другой. Диаметр струнного электрода примем 10 мм.

16. При электропрогреве конструкции струнными электродами удельную электрическую мощность определим по формуле

$$P = \frac{6,28 \cdot 10^{-3} \cdot U^2}{\rho_{\text{расч}} \cdot B^2 \ln \dfrac{b}{d}},$$

где B – сторона сечения конструкции, м; b – расстояние от оси струны (электрода) до осей арматурных стержней, м; d – диаметр струны (электрода), м.

17. Определим величину подаваемого напряжения на электроды в период разогрева, приравняв P к $P_{\text{р}}^{\text{уд}}$:

$$8,29 = \frac{6,28 \cdot 10^{-3} \cdot U_{\text{р}}^2}{6,555(0,4)^2 \ln \dfrac{0,161}{0,01}}.$$

Тогда $U_{\text{р}} = 62,02$ В. Окончательно принимаем $U_{\text{р}} = 70$ В.

18. Определим величину подаваемого напряжения на электроды в период изотермического прогрева, приравняв P к $P_{\text{из}}^{\text{уд}}$:

$$1,7 = \frac{6,28 \cdot 10^{-3} \cdot U_{\text{из}}^2}{6,555(0,4)^2 \ln \dfrac{0,161}{0,01}}.$$

Тогда $U_{\text{из}} = 28,09$ В. Окончательно принимаем $U_{\text{из}} = 49$ В.

19. Определим время разогрева бетона:

$$\tau_{\text{р}} = \frac{t_{\max} - t_{\text{б.н}}}{V_{\text{р}}} = \frac{50 - (-5)}{10} = 5,5 \text{ ч.}$$

20. Определим среднюю температуру разогрева бетона:

$$t_{\text{р}}^{\text{ср}} = \frac{t'_{\text{б.н}} + t_{\max}}{2} = \frac{(-5) + 50}{2} = 22,5 \text{ °C.}$$

21. По графику (рис. П.4.7, П.4.8) определим, что за время разогрева бетон класса В22,5 на портландцементе М400 набирает прочность $R_{\text{р}}$, равную 5 % от R_{28}.

22. Определим среднюю температуру бетона за время остывания:

$$t_{\text{б.ср}} = t_{\text{б.к}} + \frac{t_{\max} - t_{\text{б.к}}}{1,03 + 0,181 \cdot \text{М}_{\text{п}} + 0,006(t_{\max} - t_{\text{б.к}})} =$$

$$= 5 + \frac{50 - 5}{1,03 + 0,181 \cdot 10,25 + 0,006(50 - 5)} = 19,3 \text{ °C}.$$

23. Пренебрегая тепловыделением цемента Э, определим время остывания бетона

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \left(t_{\max} - t_{\text{б.к}}\right)}{3,6 \cdot K_{\text{т}} \cdot \text{М}_{\text{п}} \left(t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}}\right)} = \frac{1,05 \cdot 2400(50 - 5)}{3,6 \cdot 2,55 \cdot 10,25(19,3 - (-15))} = 35 \text{ ч}.$$

24. По графику (рис. П.4.7, П.4.8) определим, что за время остывания бетон класса В22,5 на портландцементе М400 набирает прочность $R_{\text{ост}}$, равную 7 % от R_{28}.

25. По графику (рис. П.4.7, П.4.8) определим, что оставшуюся прочность $R_{\text{из}} = 70 - (R_{\text{р}} + R_{\text{ост}}) = 70 - (5 + 7) = 58$ % от R_{28} бетон класса В22,5 на портландцементе М400 набирает за время изотермического прогрева $\tau_{\text{из}} = 30$ ч.

6.4. Расчет периферийного электропрогрева бетона монолитной фундаментной плиты в сочетании с методом термоса и с применением противоморозных добавок

Исходные данные:

Требуется подобрать вид и количество противоморозной добавки, толщину утепления открытой поверхности, а также рассчитать потребную тепловую мощность и режим электропрогрева бетона фундаментной плиты, размером в плане 20×20 м, толщиной 1,5 м. Опалубка плиты – дорожные плиты марки ПДН, толщиной 140 мм, устанавливаемые вертикально по периметру фундаментной плиты. Сверху плита утепляется плитами из пеноплекса.

Бетон тяжелый, марки М300 (класс В22,5), на Чернореченском портландцементе марки М400, с расходом 490 кг/м^3, водоцементное отношение В/Ц составляет 0,38. Температура изотермического выдерживания +30 °С. Температура наружного воздуха ожидается –15 °С, скорость ветра 6 м/с. Электропитание осуществляют от прогревочного трансформатора типа ТСДЗ-63/0,38 с выходным напряжением U = 49, 60, 70, 85, 103 и 121 В. Требуемая прочность бетона к моменту достижения 0 °С и окончания электрообогрева составляет 100 % от R_{28}.

Порядок расчета:

1. Определим объем бетона в конструкции:

$$V_б = 20 \cdot 20 \cdot 1,5 = 600 \text{ м}^3.$$

2. Определим модуль поверхности конструкции:

$$М_п = \frac{2}{h} = \frac{2}{1,5} = 1,33 \text{ м}^{-1},$$

где h – толщина плиты, м.

3. Согласно табл. П.4.13, при температуре остывания бетона до начала электрообогрева от 0 до –5 °С, в качестве противоморозной добавки можно применить нитрит натрия (НН) в количестве 4 % от расхода цемента, или

$$М_{нн} = 0,04 \cdot 490 = 19,6 \text{ кг/м}^3 \text{ бетона}.$$

4. Количество противоморозной добавки НН, % от веса воды затворения (В):

$$\frac{М_{нн}}{В} = \frac{19,6}{0,38 \cdot 490} = 0,105.$$

5. Определим начальную температуру бетона после укладки с учетом потерь теплоты на нагрев арматуры:

$$t'_{\text{б.н}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot t_{\text{б.н}} + C_{\text{а}} \cdot A \cdot t_{\text{н.в}}}{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} + C_{\text{а}} \cdot A} = \frac{1,05 \cdot 2400 \cdot 30 + 0,48 \cdot 100(-15)}{1,05 \cdot 2400 + 0,48 \cdot 100} = 29,2 \text{ °C}.$$

6. Определим среднюю температуру бетона при остывании:

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

$$= 0 + \frac{29,2 - 0}{1,03 + 0,181 \cdot 1,33 + 0,006(29,2 - 0)} = 20,3 \text{ °C}.$$

7. По графику (рис. П.4.7) для того, чтобы бетон класса В22,5 на портландцементе М400 набрал прочность R = 100 % от R_{28}, необходимо 28 сут или 672 ч.

8. Согласно табл. П.4.15, тепловыделение портландцемента марки М400 составит 335,2 Дж/кг.

9. Определим коэффициент теплопередачи утепления открытой поверхности бетона плиты:

$$K_{\text{т}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \left(t'_{\text{б.н}} - t_{\text{б.к}}\right) + \text{Э} \cdot \text{Ц}}{3,6 \cdot \tau_{\text{ост}} \cdot \text{М}_{\text{п}} \left(t_{\text{б.ср}} - t_{\text{н.в}}\right)} =$$

$$= \frac{1,05 \cdot 2400(29,2 - 0) + 335,2 \cdot 490}{3,6 \cdot 672 \cdot 1,33(20,3 - (-15))} = 8,8 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{ч)},$$

или 2,44 Вт/(м^2·°С).

10. Определим коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_{\text{л}} = (4,6 + 0,045 \cdot t_{\text{н.в}})\varepsilon = (4,6 + 0,045(-15))0,65 = 2,55 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

11. Определим коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{4,32\left[(1,293 - 0,058 \cdot t_{\text{н.в}}) \cdot \omega\right]^{0,8}}{(h)^{0,2}} =$$

$$= \frac{4,32\left[(1,293-0,058(-15))6\right]^{0,8}}{(1,5)^{0,2}} = 8,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

где ω – скорость ветра, м/с.

12. Коэффициент теплопередачи утепления открытой поверхности бетона плиты рассчитывается по формуле

$$K_{\text{т}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{ут}}}} = \frac{1}{\frac{1}{2,55+8,4} + \frac{\delta_{\text{ут}}}{0,032}};$$

где $\delta_{\text{ут}}$ и $\lambda_{\text{ут}}$ – соответственно, толщина и коэффициент теплопроводности утеплителя – пеноплекса; $\delta_{\text{ут}} = 0,01$ м = 100 мм.

13. Для поддержания положительной температуры в зоне сопряжения бетона плиты и опалубки из дорожных плит принимаем периферийный электропрогрев одиночными стержневыми электродами. Толщина прогреваемого участка плиты по высоте составляет 200 мм.

14. Определим электрическую мощность, необходимую для разогрева 1 м^3 бетона плиты:

$$P_{\text{р}}^{\text{уд}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P_5 = 3,5 + 0,07 + 2,92 + 3 - 0,8 = 8,69,$$

где P_1 – мощность на разогрев бетона, кВт/м^3; P_2 – мощность на нагрев арматуры, кВт/м^3; P_3 – мощность на нагрев опалубки, кВт/м^3; P_4 – мощность на возмещение теплопотерь, кВт/м^3; $P_5 = 0,8$ – мощность, эквивалентная теплу, выделяющемуся за время прогрева вследствие экзотермии цемента, кВт/м^3.

Удельная мощность, требуемая для разогрева бетона от $t_{\text{б.н}}$ до $t_{\max}$ в течение $\tau_{\text{р}}$, т. е. со скоростью

$$V_{\text{р}} = \frac{t_{\max} - t_{\text{б.н}}}{\tau_{\text{р}}},$$

составит:

$$P_1 = \frac{C_б \cdot \gamma_б \left(t_{max} - t_{б.н}\right)}{3600 \cdot \tau_р} = \frac{C_б \cdot V_р \cdot \gamma_б}{3600} = \frac{1,05 \cdot 2400 \cdot 5}{3600} = 3,5 \text{ кВт/м}^3,$$

где $C_б$ – объемная теплоемкость бетона, кДж/(кг·°С); $\gamma_б$ – удельная масса бетона, кг/м^3;

$$P_2 = \frac{C_а \cdot А \cdot V_р}{3600} = \frac{0,48 \cdot 100 \cdot 5}{3600} = 0,07 \text{ кВт/м}^3;$$

$C_а$ – удельная теплоемкость арматуры, кДж/(кг·°С); А – расход арматуры, кг/м^3;

$$P_3 = \frac{С_{оп} \cdot \gamma_{оп} \cdot \delta_{оп} \cdot М_п}{3600 \cdot \tau_р}\left(\frac{t_{max}}{2} - t_{н.в}\right) = \frac{С_{оп} \cdot \gamma_{оп} \cdot \delta_{оп} \cdot М_п \cdot V_р}{3600 \cdot 2} =$$

$$= \frac{0,84 \cdot 2500 \cdot 0,14 \cdot 14,29 \cdot 5}{3600 \cdot 2} = 2,92 \text{ кВт/м}^3;$$

$$P_4 = \frac{K_т \cdot М_п}{1000}\left(\frac{t_{max} - t_{б.н}}{2} - t_{н.в}\right) =$$

$$= \frac{7,62 \cdot 14,29}{1000}\left(\frac{30-5}{2} - (-15)\right) = 3,0 \text{ кВт/м}^3.$$

15. Определим электрическую мощность, необходимую для поддержания заданной температуры в процессе изотермического прогрева:

$$P_{из}^{уд} = \frac{K_т \cdot М_п \left(t_{max} - t_{н.в}\right)}{1000} = \frac{7,62 \cdot 14,29(30-(-15))}{1000} = 4,9 \text{ кВт/м}^3.$$

16. Общая электрическая мощность, необходимая для разогрева бетона плиты, равна:

$$P_р = P_р^{уд} \cdot V_б = 8,69(4 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 0,2) = 208,56 \text{ кВт}.$$

17. Общая электрическая мощность, необходимая для изотермического прогрева бетона плиты, равна:

$$P_{\text{из}} = P_{\text{из}}^{\text{уд}} \cdot V_{\text{б}} = 4,9(4 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 0,2) = 117,6 \text{ кВт}.$$

18. По табл. П.4.14 для Чернореченского портландцемента величины начального и минимального удельного электрического сопротивления равны: $\rho_{\text{нач}} = 7,9$ Ом·м и $\rho_{\text{мин}} = 5,5$ Ом·м.

19. Согласно табл. П.4.16, введение противоморозной добавки НН уменьшает $\rho_{\text{нач}}$ бетона на 3,36 %.

Таким образом, $\rho_{\text{нач}} = 7,9 \cdot 0,9664 = 7,635$ Ом·м.

20. Расчетное удельное электрическое сопротивление бетона определим по формуле

$$\rho_{\text{расч}} = \frac{\rho_{\text{нач}} + \rho_{\text{мин}}}{2} = \frac{7,635 + 5,5}{2} = 6,568 \text{ Ом·м}.$$

21. При периферийном электропрогреве конструкции одиночными стержневыми электродами диаметром 6 мм удельную электрическую мощность определим по формуле

$$P = \frac{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot U^2}{\rho_{\text{расч}} \cdot b \cdot B\left(\alpha \ln \dfrac{B}{\pi \cdot d} + \dfrac{\pi \cdot b}{B}\right)},$$

где B – толщина прогреваемого слоя бетона, м; b – расстояние между электродами, м; d – диаметр электрода, м; α – коэффициент, равный при трёхфазовом токе 1,5, при двухфазовом – 2.

Из этого выражения определим величину подаваемого напряжения на электроды в период разогрева, приравняв P к $P_{\text{р}}^{\text{уд}}$:

$$8,69 = \frac{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot U_{\text{р}}^2}{6,568 \cdot 0,2 \cdot 0,2\left(1,5 \ln \dfrac{0,2}{3,14 \cdot 0,006} + \dfrac{3,14 \cdot 0,2}{0,2}\right)}.$$

Тогда $U_{\text{р}} = 69,7$ В. Окончательно принимаем: $U_{\text{р}} = 70$ В.

22. Определим величину подаваемого напряжения на электроды в период изотермического прогрева, приравняв P к $P_{\text{из}}^{\text{уд}}$:

$$4,9 = \frac{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot U_{из}^2}{6,568 \cdot 0,2 \cdot 0,2 \left(1,5 \ln \frac{0,2}{3,14 \cdot 0,006} + \frac{3,14 \cdot 0,2}{0,2} \right)}.$$

Тогда $U_{из}$ = 52,35 В. Окончательно принимаем: $U_{из}$ = 60 В.

6.5. Расчет термообработки бетона паром и методом греющего провода

Комбинированный метод термообработки бетона представляет собой синтез двух ранее рассмотренных методов:

– паропрогрев бетона;

– метод греющего провода.

Сочетание выше названных методов в единой технологии зимнего бетонирования позволяет существенно расширить диапазон области их применения и осуществить бетонирование тонкостенных конструкций при температуре наружного воздуха –30 °С с ранней их распалубкой.

Принципиальная технологическая схема метода состоит в следующем.

Бетонная смесь в миксере, поступившая на объект с температурой +30 °С, подвергается термообработке паропрогревом до температуры не менее +50 °С.

Далее она транспортируется автобетононасосом в опалубку конструкции и подвергается электротермии греющим проводом до температуры 70–80 °С.

Паропрогрев бетонной смеси можно рассматривать как подготовительный период комбинированного метода, предназначенный для прогрева бетона от +50 до ±55 °С. Бетон с этой температурой укладывается в опалубку, в частности ребристого перекрытия, или в вертикальную конструкцию с большой неопалубленной поверхностью, с модулем поверхности $M_п \geq 10$.

Интенсивное охлаждение такого типа конструкции при пониженном фоне температуры наружного воздуха ниже –20 °С, несмотря на значительное теплосодержание смеси, не позволяет обеспечить не только раннюю распалубку, но и достижение бетоном критической прочности, равной для монолитных перекрытий 70 % от R_{28}.

Поэтому основной цикл термообработки бетона по данному методу наряду с паропрогревом выполняется прогрев греющим кабелем, «разводка» которого заблаговременно осуществлена в период армирования возводимой конструкции. Такой двухцикличный прогрев смеси позволяет существенно сократить время паропрогрева бетона в «миксере», что благоприятно отражается впоследствии на сохранении технологически применяемого водоцементного соотношения этого этапа термообработки, из-за значительно меньшего по объему поступления воды конденсата в бетонную смесь. Оптимальным режимом прогрева греющим кабелем на этом этапе бетонирования можно считать классический режим, диаграмма которого приведена на рис. 55.

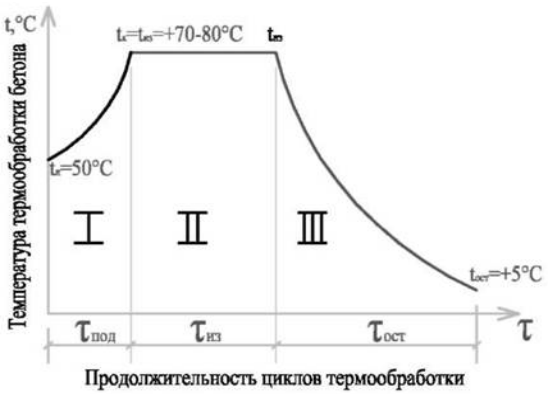


Рис. 55. Диаграмма режима термообработки бетона греющим кабелем при комбинированном методе:
I – цикл подъема температуры; II – цикл изотермического прогрева; III – цикл остывания (до +50 °С)

Основными параметрами этого режима являются следующие этапы (рис. 55):

– подъем температуры бетона, уложенного в опалубку, от +50 °С до +70–80 °С;

– изотермический прогрев конструкции при +70–80 °С;

– термосное выдерживание бетона со снижением температуры в конструкции со скоростью не более 5–7 °С.

Это достигается «утеплением» бетона системой инвентарных теплоизолирующих щитов.

Расчет технологических параметров прогрева, включающих продолжительность каждого цикла и диапазон изменения температуры бетонной смеси, осуществляется согласно следующим формулам:

$$\tau_{\text{под}} = \frac{t_{\text{из}} - t_{\text{б.н}}}{V_{\text{р}}}; \quad \tau_{\text{ост}} = \tau_{\text{бет}} = \frac{t_{\text{из}} - t_{\text{б.к}}}{V_{\text{о}}};$$

$$\tau_{\text{из}} = \frac{R_{\text{кр}}^{\text{кон}} - \sum R_i}{t_{\text{ср}}^{\text{из}}},$$

где $t_{\text{из}}$ – температура изотермического прогрева бетона греющим кабелем, °С; $t_{\text{б.н}}$ – начальная температура прогрева, равная

$$t_{\text{б.н}} = t_{\text{пар}}^{\text{н}} - \Delta t_{\text{ук}},$$

где $t_{\text{б.н}}$ – начальная температура паропрогрева бетонной смеси парогенератором на объекте; $\Delta t_{\text{ук}}$ – потери тепла при укладке смеси в опалубку (+5 °С); $t_{\text{б.к}}$ – конечная температура бетона в конструкции перед ее распалубкой; $V_{\text{р}}$ – скорость подъема температуры бетона для конструкции с $\text{М}_{\text{п}} \geq 10$; $V_{\text{р}}$ = 10–15 °С/ч; $V_{\text{о}}$ – скорость остывания бетона для конструкции с $\text{М}_{\text{п}} \geq 10$; $V_{\text{р}}$ = 5–7 °С/ч; $R_{\text{кр}}^{\text{кон}}$ – критическая прочность конструкции перед ее распалубкой (для пролетных строений $R_{\text{кр}}^{\text{кон}} > 70$ % от R_{28}); $\tau_{\text{под}}$, $\tau_{\text{из}}$, $\tau_{\text{ост}}$ – продолжительность циклов подъема температуры

в конструкции, изотермического прогрева и остывания ее перед распалубкой, соответственно; R_i – прочность конструкции, приобретенная за период подъема температуры и бетона, которая рассчитывается как функция времени и средней температуры смеси в данном цикле.

Анализ приведенных соотношений свидетельствует о том, что регламентируемый режим I и II циклов термообработки характеризуется существенным сокращением как времени прогрева, так и температурного диапазона этих технологических циклов.

Это сообщает методу ряд весьма значительных преимуществ. Основными из них являются:

1. Максимальная температура паропрогрева бетона в условиях объекта не превышает 50 °С, а диапазон подъема температуры составляет 20 °С. Последнее обстоятельство позволяет резко сократить объем конденсата пара, поступающего в смесь, а следовательно изменение водоцементного соотношения смеси на этом этапе бетонирования находится в технологически приемлемом «допуске» (В/Ц < 0,55–0,6). В частности, подъем температуры в условиях объекта осуществляется за счет паропрогрева от 30 до 50 °С. Тем самым время паропрогрева сокращается до $\tau < 10$ мин.

2. Снижение продолжительности паропрогрева бетона на объекте позволяет использовать парогенераторы меньшей производительности, а следовательно, и меньшей стоимости. Оптимальным с этой точки зрения является парогенератор МТ-700 производительностью 480 кг/ч.

3. Цикл подъема температуры смеси, уложенной «в дело» методом греющего кабеля, не превышает 30 °С, а продолжительность – не более 2–3 ч. Это означает, что соответственно сокращается общая продолжительность бетонирования конструкции, которая составит

$$6 + 2 + 8 = 16 \text{ ч},$$

где 2 – продолжительность подъема температуры (I – цикл подъема температуры); 8 – время изотермического прогрева (II – цикл изотермического прогрева); 6 – время бетонирования конструкции.

4. Сокращение продолжительности цикла подъема температуры на этом этапе термообработки позволяет избежать пиковой электрической нагрузки в пределах рабочей смены на силовой трансформатор, обеспечивающий прогрев конструкции. При традиционной схеме прогрева полный цикл термообработки бетона будет составлять более 20 ч.

Таким образом, при изменении режима прогрева в течение рабочей смены осуществляется вначале только подъем температуры, а затем только изотермический прогрев. Это означает, что максимальная мощность энергоустановки для прогрева греющим кабелем снизится на 10–15 % (или на 100–150 кВт). В условиях жесткого ограничения свободных энергомощностей в застраиваемых жилых микрорайонах такая экономия весьма существенна и для сравнения равна мощности башенного крана грузоподъемностью до 25 т.

Методика расчета технологических параметров циклов пропрогрева и электропрогрева греющим кабелем подробно изложена в соответствующих разделах настоящего учебного пособия с рассмотренными в них примерами расчета, что, по-видимому, не требует дополнительных комментариев к рассматриваемому методу.

В заключение изложения материала по методам и способам зимнего бетонирования монолитных железобетонных конструкций приводится сравнительный анализ описанных методов с точки зрения продолжительности термообработки бетона перед распалубкой возводимой конструкции.

Этот показатель наилучшим образом характеризует эффективность метода и перспективы его применения в монолитном домостроении. Указанные данные приведены в табличной форме (табл. 89).

Таблица 89

Сравнительный анализ методов и способов зимнего бетонирования монолитных железобетонных конструкций с точки зрения продолжительности термообработки бетона перед распалубкой возводимой конструкции

№ п/п	Метод	Характеристика циклов обработки					
		Цикл предварительного прогрева смеси $\tau_{ср}$, ч	Цикл подъема температуры $\tau_{под}$, ч	Цикл изотермического прогрева $\tau_{из}$, ч	Цикл остывания конструкции $\tau_{ост}$, ч	Общее время термообработки $\tau_{общ}$, ч	Рейтинг метода
1	Термоактивная опалубка	–	5–6 / 4–5	5–6 / 4–5	2–3 / 2–3	12–15 / 10–13	1
2	Греющий изолированный провод	–	6–7 / 5–5	10–12 / 6–8	–	18–20 / 12–15	2
3	Синэнергобетонирование	10–15	–	8–16 / 10–12	6–8 / 8–10	20–24 / 18–22	3
4	Предварительный прогрев в бункерах с последующим «термосом»	15–20	–	–	30–40 / 24–30	30–40 / 24–30	4
5	Конвективный прогрев в тонельных опалубках	–	24	46	13	70–80	5
6	Стержневой электропрогрев конструкций	–	8–10	20–24	6–8	40–42	6

Окончание табл. 89

№ п/п	Метод	Характеристика циклов обработки					
		Цикл предварительного прогрева смеси $\tau_{пр}$, ч	Цикл подъема температуры $\tau_{под}$, ч	Цикл изотермического прогрева $\tau_{из}$, ч	Цикл остывания конструкции $\tau_{ост}$, ч	Общее время термообработки $\tau_{общ}$, ч	Рейтинг метода
7	Пластинчатый электропрогрев конструкций	–	12–19	20–25	6–8	40–45	7
8	Прогрев в тепляках с обогревом элекрокалориферами (при $t \geq -10\ldots-15$ °С)	–	10–12	8–28	8–10	50	8
9	Бетонирование с использованием химических добавок (при $t \geq -10\ldots-15$ °С)	–	–	–	–	14–40 сут	9

Примечание. В числителе – время термообработки для конструкций с большой неопалубленной поверхностью горизонтальных конструкций перекрытия; в знаменателе – время термообработки для вертикальных тонкостенных конструкций.

Таким образом, комбинированный метод термообработки бетона в зимних условиях, благодаря ряду перечисленных преимуществ, позволяет наиболее успешно реализовать его для возведения тонкостенных конструкций с большой неопалубленной поверхностью монолитных конструкций, присущих каркасам жилищно-гражданских зданий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Человечество, используя природные ресурсы, получило отличный материал, называемый бетоном. С экономической точки зрения бетон является существенно важным элементом во многих областях строительства. При качественном подборе состава бетона, его компонентов, а также при должном контроле воздействующих на него факторов окружающей среды, бетон имеет очень хорошие прочностные характеристики и прекрасно защищает от радиации.

Теоретические положения, изложенные в пособии, подтверждены примерами решения задач для строительных конструкций с учетом природно-климатических условий. Необходимо отметить вопросы, не вошедшие в учебное пособие. Например, влияние градиентов тепло- и массопереноса на формирование капиллярно-пористой структуры цементного камня и местоположение монолитных бетонных конструкций в котлованах, траншеях, в пространстве за искусственными и естественными прогревами и т. д. Не учитывается внешний теплообмен монолитных конструкций в процессе тепловой обработки в зависимости от скорости ветра и его направления. Для обеспечения установленного уровня качества производства бетонных работ в зимних условиях, особенно монолитных тонкостенных перекрытий, необходимо провести исследования и предложить комплексные решения тепловой обработки бетона с учетом тщательного утепления опалубки и т. д.

Примеры, приведенные в учебном пособии, помогут читателю при самостоятельном освоении как вышеперечисленных вопросов теории и технологии производства бетонных работ в зимних условиях, так и иных вопросов, связанных с тепло- и массообменным процессом при тепловой обработке как отдельных бетонных конструкций, так и в целом монолитных зданий и сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

Учебники и учебные пособия

1. *Баженов, Ю.М.* Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М. : Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.

2. *Красный, Ю.М.* Монолитное домостроение / Ю.М. Красный, Д.Ю. Красный. – М. : Изд-во АСВ, 2000. – 550 с.

3. *Крылов, Б.А.* Руководство по производству бетона в монолитных конструкциях / Б.А. Крылов. – М. : Красный пролетарий, 2005. – 275 с.

4. *Молодин, В.В.* Бетонирование монолитных строительных конструкций в зимних условиях : монография / В.В. Молодин, Ю.В. Лунев ; науч. ред. Ю.А. Попов / Новосиб. гос. архит.-строит. ун-т (Сибстрин) ; ООО «Евросити». – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2006. – 300 с.

5. *Теличенко, В.И.* Технология строительных процессов: в 2 ч. / В.И. Теличенко, О.М. Терентьев, А.А. Лапидус. – Изд-е 4-е, стер. – М. : Высшая школа (строит. технологии), 2008. – Ч. 1–2.

6. *Технология* зимнего монолитного бетонирования / Э.И. Батянский, Н.М. Голубев, В.В. Бабицкий [и др.]. – М. : Изд-во АСВ, 2009. – 229 с.

7. *Гныря, А.И.* Технология бетонных работ в зимних условиях / А.И. Гныря, С.В. Коробков. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. – 412 с.

Нормативно-техническая литература

8. *ГОСТ 10178–85** (СТ СЭВ 5683–86). Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия / Госстрой СССР, 1985.

9. *ГОСТ 22266–94.* Цементы сульфатостойкие. Технические условия / Минстрой России, 1995.

10. *ГОСТ 8736–93*.* Песок для строительных работ. Технические условия / Минстрой России, 1994.

11. *ГОСТ 8735–88*.* Песок для строительных работ. Методы испытаний / Госстрой СССР, 1989.

12. *ГОСТ 8267–93*.* Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия / Госстрой России, 1994.

13. *ГОСТ 8269.0–97*.* Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний / Госстрой России, 1998.

14. *ГОСТ 30459–2008.* Добавки для бетонов и строительных растворов. Методы определения эффективности / Госстрой России, 2003.

15. *ГОСТ 24211–2008.* Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия / Госстрой России, 2003.

16. *ГОСТ 10180–90.* Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам / Госстрой СССР, 1989.

17. *ГОСТ 10181–2000.* Смеси бетонные. Методы испытаний / Госстрой России, 2000.

18. *ГОСТ 310.4–81*.* Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии / Госстрой СССР, 1981.

19. *ГОСТ 5578–94.* Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия / Минстрой России, 1995.

20. *ГОСТ 7392–2002.* Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия / Госстрой России, 2003.

21. *ГОСТ 7473–94.* Смеси бетонные. Технические условия / Минстрой России, 1995.

22. *ГОСТ 23732–79.* Вода для бетонов и растворов. Технические условия / Госстрой СССР, 1979.

23. *ГОСТ 27006–86.* Бетоны. Правила подбора состава / Госстрой СССР, 1986.

24. *ГОСТ 28570–90* (СТ СТВ 3978–83). Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкции / Госстрой СССР, 1990.

25. *ГОСТ 10060.0–95.* Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования / Минстрой России, 1996.

26. *ГОСТ 10060.1–95.* Базовый метод определения морозостойкости / Минстрой России, 1996.

27. *ГОСТ 10060.2–95.* Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многовариантном замораживании и оттаивании / Минстрой России, 1996.

28. *ГОСТ 7025–91.* Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости / Госстрой СССР, 1991.

29. *ГОСТ 12730.5–84*.* Бетоны. Методы определения водопроницаемости / Госстрой СССР, 1984.

30. *ГОСТ 12730.0–78.* Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости / Госстрой СССР, 1978.

31. *ГОСТ 1805–76*.* Масло приборное МВП. Технические условия / Госстандарт СССР, 1976.

32. *ГОСТ 11052–74.* Цемент глиноземистый расширяющийся / Госстрой СССР, 1974.

33. *ГОСТ 5802–86.* Растворы строительные. Методы испытаний / Госстрой СССР, 1985.

34. *ГОСТ 1526–81*.* Проволока стальная оцинкованная для бронирования электрических проводов и кабелей. Технические условия / Госстандарт СССР, 1981.

35. *ГОСТ 1668–73*.* Проволока стальная оцинкованная для воздушных линий связи. Технические условия / Госстандарт СССР, 1973.

36. *ГОСТ 7372–79*.* Проволока стальная канатная. Технические условия / Госстандарт СССР, 1979.

37. *ГОСТ 53231–2008.* Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – М. : Стандартинформ, 2009.

38. *ЕНиР.* Сборник Е4-М. Монтаж сборных и устройство монолитных железобетонных конструкций. Выпуск 1. Здания и промышленные сооружения / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1987. – 64 с.

39. *ЕНиР.* Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Общая часть. – М. : Прейскурантиздат, 1987. – 38 с.

40. *Методические рекомендации* по применению нагревательных проводов и кабелей при выполнении общестроительных работ в зимних условиях / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. – М., 1986. – 88 с.

41. *ПОТ Р М-016–2001,* РД 153-34.0-03.150-00. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок / Министерство энергетики РФ. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2000.

42. *ППБ 01-03.* Правила пожарной безопасности в Российской Федерации / МЧС России, 2003.

43. *Рекомендации* по технологии возведения монолитных гражданских зданий / ЦНИИЭПжилища. – М : Стройиздат, 1987. – 88 с.

44. *Руководство* по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1982. – 213 с.

45. *Руководство* по применению бетонов с противоморозными добавками. – М. : Стройиздат, 1989. – 188 с.

46. *Руководство* по производству бетонных работ. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 22–68.

47. *Руководство* по укладке бетонных смесей бетононасосными установками. – М. : Стройиздат, 1978. – С. 5–31.

48. *Руководство* по зимнему бетонированию с применением метода термоса. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 6–31, 109–179.

49. *Руководство* по подбору состава тяжелого бетона. – М. : Стройиздат, 1979. – С. 9–52.

50. *Руководство* по разработке технологических карт в строительстве. – М. : ЦНИИОМТП Госстроя России, 1998. – 17 с.

51. *СП 70.13330.2012.* Несущие и ограждающие конструкции (актуализированная редакция СНиП 3.03.01–87) / Минрегион России. – М., 2012. – 280 с.

52. *СНиП 52-01–2003.* Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М. : ГУП НИИЖБ Госстроя России, 2004. – 27 с.

53. *СНиП 23-01–99*.* Строительная климатология. – М. : Госстрой России, 2000. – 135 с.

54. *СНиП 12-03–2001.* Безопасность труда в строительстве. Ч. 1. Общие требования. – М. : Госстрой РФ, 2001. – 44 с.

55. *СНиП 12-04–2002.* Безопасность труда в строительстве. Ч. 2. Строительное производство. – М. : Госстрой РФ, 2002. – 38 с.

56. *СНиП 12-01–2004.* Организация строительства. – М. : Госстрой РФ, 2004. – 24 с.

57. *СП 18.13330.2011.* Генеральные планы промышленных предприятий (актуализированная редакция СНиП II-89–80*) / Минрегион России. – М. : ОАО «ЦПП», 2010.

58. *СП 44.13330.2011.* Административные и бытовые здания (актуализированная редакция СНиП 2.09.04–87) / Минрегион России. – М. : ОАО «ЦПП», 2011.

59. *СНиП 82-02–95.* Федеральные (типовые) элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций. – М. : Минстрой России, 1996.

60. *СП 12-135–2003.* Безопасность труда в строительстве. Отраслевые типовые инструкции по охране труда / Госстрой России. – М. : ГУП ЦПП, 2003.

Дополнительная литература

61. *Афанасьев, А.А.* Интенсификация работ при возведении зданий и сооружений из монолитного железобетона / А.А. Афанасьев. – М. : Стройиздат, 1990. – 376 с.

62. *Абрамов, В.С.* Электротермообработка бетона / В.С. Абрамов, И.И. Данилов, Б.М. Красновский. – М. : Наука, 1975. – С. 20–150.

63. *Арбеньев, А.С.* Проектирование технологии бетонных работ в зимних условиях / А.С. Арбеньев. – Новосибирск, 1979. – С. 64–67.

64. *Арбеньев, А.С.* Технология бетонирования с разогревом смеси / А.С. Арбеньев. – М. : Стройиздат, 1975. – 108 с.

65. *Арбеньев, А.С.* Бетонные и железобетонные работы / А.С. Арбеньев. – Владимир : Изд-во Владим. гос. техн. ун-та, 1999. – 64 с.

66. *Афанасьев, Н.Ф.* Электроразогрев бетонной смеси / Н.Ф. Афанасьев. – Киев : Будивельник, 1979. – С. 12–70.

67. *Баженов, Ю.М.* Способы определения состава бетона различных видов / Ю.М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 44–78.

68. *Бауман, В.А.* Строительные машины / В.А. Бауман. – М. : Машиностроение, 1976. – С. 15–28.

69. *Бужевич, Г.А.* Испарение воды из бетона / Г.А. Бужевич // Труды НИИЖБ. – М. : Госстройиздат, 1957. – Вып. 7. – С. 14–30.

70 *Булгаков, Э.Х.* Исследование некоторых свойств бетонов при раннем замораживании : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1965. – 16 с.

71. *Волосян, Л.Я.* Исследование диффузии влаги в кинетике твердения высокопрочного бетона при различных способах тепловлажностной обработки / Л.Я. Волосян, В.П. Журавлева // ИФЖ. – 1969. – XVI. – № 3. – С. 448–456.

72. *Временные дополнительные затраты* при производстве строительно-монтажных работ в зимнее время. – М. : Стройиздат, 1969.

73. *Гныря, А.И.* Внешний тепло- и массообмен при бетонировании с электроразогревом смеси / А.И. Гныря. – Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 1977. – 171 с.

74. *Гныря, А.И.* Технология бетонных работ в зимних условиях / А.И. Гныря, С.В. Коробков. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-стрит. ун-та, 2011. – 412 с.

75. *Гныря, А.И.* Технология бетонных работ в зимних условиях / А.И. Гныря. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1984. – 278 с.

76. *Гныря, А.И.* Рекомендации по бетонированию монолитных конструкций в зимнее время с применением метода термоса / А.И. Гныря, А.В. Злодеев, И.А. Боровских. – Томск : ТИСИ, 1985. – 60 с.

77. *Гныря, А.И.* Электропрогрев бетона монолитных конструкций / А.И. Гныря, И.А. Подласова. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 1998. – 90 с.

78. *Головнев, С.Г.* Технология зимнего бетонирования. Оптимизация параметров и выбор методов / С.Г. Головнев. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 1999. – 156 с.

79. *Горчаков, Г.И.* Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г.И. Горчаков, М.М. Канкин, Б.Г. Скрамтаев. – М. : Стройиздат, 1965. – 194 с.

80. *Данилов, Н.Н.* ТСП / Н.Н. Данилов. – М. : Стройиздат, 1977. – С. 96–209.

81. *Добшиц, Л.М.* Бетонирование строительных конструкций в зимних условиях / Л.М. Добшиц, К.В. Тармосин. – М. : МИИТ, 2010. – 68 с.

82. *Заседателев, И.Б.* Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений / И.Б. Заседателев, В.Г. Петров-Денисов. – М. : Стройиздат, 1973. – 168 с.

83. *Крылов, Б.А.* Факторы, влияющие на режим электропрогрева бетона в монолитных конструкциях при отрицательных температурах среды / Б.А. Крылов, В.Д. Коптелов // Бетон и железобетон, 1967. – № 10. – С. 21–24.

84. *Ларионова, З.М.* Формирование структуры цементного камня и бетона / З.М. Ларионова. – М. : Стройиздат, 1971. – 161 с.

85. *Лермит, Р.* Проблемы бетона / Р. Лермит. – М. : Госстройиздат, 1958. – 293 с.

86. *Лыков, А.В.* Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М. : Наука, 1963. – С. 48–49, 67–78.

87. *Лыков, А.В.* Явление переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. – М. : Гостехиздат, 1954. – С. 15–31; 138–159.

88. *Лыков, А.В.* Теоретические основы строительной теплофизики / А.В. Лыков. – Минск : Изд-во АН БССР, 1961. – С. 204–263.

89. *Лыков, А.В.* Теория сушки / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – С. 391–458.

90. *Лыков, А.В.* Теория переноса энергии и вещества / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Минск : Изд-во АН БССР, 1959. – С. 276–317.

91. *Миронов, С.А.* Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – М. : Стройиздат, 1978. – 180 с.

92. *Миронов, С.А.* Расчет охлаждения бетона на морозе с учетом влияния экзотермии / С.А. Миронов. – М. : Стройиздат, 1935. – 130 с.

93. *Мощанский, Н.А.* Плотность и стойкость бетонов / Н.А. Мощанский. – М. : Стройиздат, 1951. – С. 9–35.

94. *Мчедлов-Петросян, О.П.* Структурообразование и твердение паст и бетонов при пониженных температурах / О.П. Мчедлов-Петросян, А. Чернявский. – Киев : Будивельник, 1974. – 186 с.

95. *Пауерс, Т.К.* Физические свойства цементного теста и камня / Т.К. Пауерс // Четвертый международный конгресс по химии цемента. – М. : Госстройиздат, 1964. – С. 293, 402–438.

96. *Расчет технологических параметров* способов выдерживания бетона в зимних условиях. Часть 1. Беспрогревные методы / сост. А.И. Гныря, А.В. Рубанов, И.А. Подласова [и др.]. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2007. – 26 с.

97. *Расчет технологических параметров* способов выдерживания бетона в зимних условиях. Часть 2. Прогревные методы / сост. А.И. Гныря, А.В. Рубанов, И.А. Подласова [и др.]. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2007. – 26 с.

98. *Романовский, С.Г.* Исследование конвективного тепломассопереноса / С.Г. Романовский. – Минск : Наука и техника, 1968. – С. 382–397.

99. *Садович, М.А.* Методы зимнего бетонирования / М.А. Садович. – Братск : ГОУ ВПО БрГТУ, 2003. – 104 с.

100. *Федорцев, И.В.* Методы и технология монолитного бетона в зимних условиях / И.В. Федорцев, Р.Ф. Хуснутдинов. – Уфа : ООО «Монография», 2006. – 136 с.

101. *Шейкин, А.Е.* Специальные цементы и бетоны / А.Е. Шейкин. – Труды МИИТ, 1971. – С. 170.

102. *Хаютин, Ю.Г.* Монолитный бетон : Технология производства работ. – 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.Г. Хаютин. – М. : Стройиздат, 1991. – 576 с.

103. *Krischer, O.* Chem / O. Krischer // Jug Technik. – 1968. – № 1–2.

104. *Koch, R.* FDJ-Forschungsheft / R. Koch. – 1958. – № 469. – Ausgabe 13. – Band 24.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Суперпластификаторы для бетона

Суперпластификаторы для бетона позволяют улучшать показатели удобоукладываемости бетонной смеси без снижения прочностных характеристик бетона, улучшать смачивание и равномерность диспергирования цемента, повышать показатели ранней прочности, водонепроницаемости, долговечности бетона.

Применение суперпластификаторов позволяет сократить трудозатраты и энергозатраты на укладку смеси, формование изделий, уменьшить объем воды, необходимой для затворения. Дозировка добавок определяется типом и назначением бетонного раствора, дисперсностью цемента.

Полипласт СП-1 (С-3)	Представляет собой нафталинформальдегидный суперпластификатор для бетонов и строительных растворов. Является универсальной добавкой, применяемой при производстве товарного бетона, сборных и монолитных железобетонных конструкций из тяжелого, легкого и ячеистого бетона в гражданском, промышленном, транспортном и дорожном строительстве.
Полипласт СП-1Л	Представляет собой нафталинформальдегидный суперпластификатор с оптимизированным молекулярно-весовым распределением для бетонов и строительных растворов. Применяется при производстве товарных бетонов, армированных и предварительно напряженных сборных и монолитных железобетонных конструкций из тяжелого, легкого и мелкозернистого бетона.
Полипласт СП-1 (Са)	Представляет собой кальциевый полиметиленнафталинсульфонат, применяется в качестве пластифицирующей и водоредуцирующей добавки к бетонным и растворным смесям на основе различных вяжущих, предназначенных для изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций, в том числе предварительно напряженных.
Полипласт СП-2ВУ	Суперпластификатор на основе полиметиленнафталинсульфоната натрия и водоудерживающего компонента. Применяется при производстве товарного бетона, сборных и монолитных железобетонных конструкций, изготавливаемых из обычных и высокоподвижных бетонных смесей.

Продолжение прил. 1

Полипласт СП-3 М2	Представляет собой пластификатор для товарного бетона на основе смеси нафталинсульфонатов, лигносульфонатов и органического ускорителя. Предпочтительной областью применения является приготовление товарного бетона.
Полипласт СП-3	Комплексная добавка для бетонов и строительных растворов с небольшим эффектом замедления схватывания на основе пластифицирующего компонента и неорганических солей щелочных металлов. Предпочтительной областью применения добавки является приготовление товарного бетона.
Полипласт СП-4	Суперпластификатор для товарного бетона и строительных растворов, представляющий собой смесь сополимеров на основе нафталинсульфокислоты. Предпочтительной областью применения добавки является приготовление товарного бетона.
Полипласт Премиум	Первый в мире нафталинформальдегидный суперпластификатор с измененной молекулярной структурой, имеющий дозировки, близкие к поликарбоксилатам.
Полипласт СП СУБ	Нафталинформальдегидный суперпластификатор для самоуплотняющихся бетонов, в состав которого дополнительно включены регулятор структурообразования и стабилизатор. Выпускается двух типов: тип 1 – суперпластификатор; тип 2 – суперпластификатор с длительной сохраняемостью.
Полипласт Вибро	Добавка на основе производных нафталинсульфокислот. Применяется для производства жестких бетонных смесей, используемых для изготовления изделий с применением вибрационных машин и вибропрессованных изделий.
Полипласт П-1	Добавка, относящаяся к классу сильнопластифицирующих. Представляет собой смесь лигносульфонатов натрия, неорганических натриевых солей и пеногасителя. Предпочтительной областью применения добавки является приготовление товарного бетона.
Полипласт Люкс	Нафталинформальдегидный суперпластификатор, модифицированный добавлением регуляторов структурообразования. Является универсальной добавкой как для сборного железобетона, так и для товарных бетонов. Отличительной особенностью данной добавки является изменение дополнительных эффектов при различных дозировках.

Продолжение прил. 1

Вибро-пласт	Водоредуцирующая добавка, предназначенная для повышения формуемости жестких смесей при изготовлении изделий. Представляет собой смесь воздухововлекающего компонента и гидрофобизатора.

Замедлители схватывания

Замедлитель схватывания – это специальная добавка в бетонную смесь, которая применяется в строительстве как технологическое решение некоторых рабочих задач. Так, эти добавки необходимы при возведении конструкций из монолитного железобетона. Непрерывное бетонирование важно для обеспечения прочности конструкции, так как в этом случае удается избежать наличия рабочих швов (самое ослабленное место), однако такое возможно лишь при небольших объемах работы и при возведении сравнительно простых конструкций. Во всех остальных случаях выполняются стыки старого и нового бетона, которые будут значительно снижать прочностные характеристики конструкции. Кроме того, их устройство связано со значительными затратами труда и времени, т. к. надежное сцепление возможно лишь при тщательной обработке поверхности ранее уложенного бетона. Но этих работ можно избежать, если вести бетонирование таким образом, чтобы процесс схватывания ранее уложенной смеси начинался не так быстро, для этого в бетонную смесь вводят, с учетом графика строительных работ, замедлители схватывания бетона. Ввиду большого объёма бетонной смеси возникают риски по образованию усадочных трещин, так как гидратация является экзотермическим процессом. Таким образом, введение замедлителя схватывания позволяет замедлить процесс гидратации и снизить температуру бетона, что позволяет минимизировать или полностью избежать усадочных трещин на поверхности бетона.

Продолжение прил. 1

Эти добавки применяются при транспортировании бетонной смеси на большие расстояния для поддержания ее свойств при вынужденном длительном перерыве в производстве строительных работ и в других случаях, где требуется сохранить подвижность бетонной смеси.

Замедлители схватывания и твердения бетона действуют следующим образом: они тормозят процессы гидратации и гидролиза клинкерных минералов, что обуславливает замедление выделения свободной извести в растворы, снижение скорости процесса коагуляции и сближения частиц цемента с его гидратными новообразованиями. В результате схватывание затворенных водой клинкерных цементов становится менее интенсивным.

Линамикс П120 (90)	Пластифицирующая и замедляющая схватывание бетонной смеси добавка на основе полиметиленнафталинсульфоната натрия и лигносульфоната натрия. Рациональной областью применения добавки является приготовление товарного бетона, в том числе при возведении массивных монолитных конструкций с целью снижения или замедления тепловыделения при твердении бетона.
Линамикс СП-180	Суперпластификатор с длительной сохраняемостью бетонной смеси на основе пластифицирующего и замедляющего компонентов. Добавка производится 2-х типов: тип 1 – суперпластификатор с длительной сохраняемостью; тип 2 – суперпластификатор с пониженной оптимальной дозировкой и длительной сохраняемостью при умеренных и высоких исходных подвижностях.
Линамикс ПК	Увеличивающий сохраняемость подвижности суперпластификатор на основе полиоксиэтиленовых производных полиметакриловой кислоты.
Линамикс РС	Замедляющие схватывание бетонной смеси добавки (тип 1, тип 2, тип 3) на основе модифицированного крахмала и солей гидроксикарбоновых кислот. Рациональной областью применения добавки является приготовление товарного бетона, а также использование при возведении массивных монолитных конструкций с целью снижения или замедления тепловыделения при

твердении бетона. Рекомендовано использование замедлителя Линамикс РС совместно с пластифицирующими добавками на любой основе.

Ускорители набора прочности бетона

Ускоритель твердения бетона – комплексная добавка, выпускаемая в разных составах и разных марок, которая относится к суперпластификаторам и ускорителям набора прочности, обычно это водные растворы хлористых солей (например, хлористого кальция, натрия и др.) Они оказывают воздействие на бетонную смесь, активируя процесс гидратации клинкера, что ведет к более быстрому затвердеванию бетона. Эта добавка применяется специалистами для производства конструкций из сборного железобетона (сюда же отнесем и преднапряженные конструкции), из монолитного и мелкозернистого бетона, в производстве густоармированных, тонкостенных конструкций и строительных конструкций сложной конфигурации. Не рекомендуется применять такие добавки в конструкциях из сборного железобетона с диаметром арматуры менее 5 мм. Ускоритель твердения бетона максимально эффективен при изготовлении высокоподвижных смесей, для получения высокопрочных бетонов (бетоны класса В40 и выше), а также бетонов с высоким показателем прочности на ранних сроках твердения (на 1–2 сут). Применение этой добавки позволяет снизить количество воды затворения, сократить продолжительность тепловлажностной обработки и снизить ее температуру, изготавливать изделия и конструкции по беспропарочной технологии, увеличить оборачиваемость форм.

Реламикс — Ускоритель набора прочности и суперпластификатор на основе смеси неорганических и органических солей натрия. Ускоритель применяется в технологии получения товарных бетонов и ЖБИ, к которым предъявляются высокие требования к ранней прочности бетона.

Продолжение прил. 1

Реламикс-М	Нафталинформальдегидный суперпластификатор и ускоритель набора прочности для бетонов и строительных растворов. Применяется для сборного железобетона, а также для товарных бетонов, изготавливаемых из бетонных смесей в гражданском, промышленном, транспортном и дорожном строительстве.
Реламикс Торкрет	Не содержащий щелочей ускоритель схватывания на основе сульфата алюминия, используемый в качестве ускорителя схватывания для бетонов, наносимых методом торкретирования (набрызга). В зависимости от области применения добавку подразделяют на тип 1 и тип 2.
Реламикс ПК	Суперпластификатор и ускоритель твердения бетона на основе полиоксиэтиленовых производных полиметакриловой кислоты
Экомикс	Пластифицирующая добавка с эффектом ускорения твердения на основе смеси лигносульфонатов и комплексного органического ускорителя. Добавка применяется в технологии получения товарных бетонов и ЖБИ, к которым предъявляются повышенные требования к ранней прочности бетона.
Реламикс СЛ	Пластификатор и ускоритель твердения. Представляет собой смесь поверхностно-активных натриевых солей и неорганических солей натрия и калия. Область применения: производство сборных изделий и конструкций из тяжелого и мелкозернистого бетона различного назначения; изготовление конструкций монолитных сооружений с высокими требованиями к распалубочной прочности; производство легких бетонов, в том числе ячеистых; приготовление строительных растворов; изготовление жестких и малоподвижных смесей.
Реламикс-М2	Ускоритель и суперпластификатор. Представляет собой смесь нафталинсульфонатов и органического ускорителя.

Противоморозные добавки

Добавки в бетон противоморозные (нитраты натрия, кальция, хлориды натрия и др.) применяют, когда необходимо бетонирование при низких температурах. Эти добавки изменяют температуру, при которой вода переходит из жидкого состояния

в твердое, образуя так называемый сольват, который в свою очередь обеспечивает протекания реакции гидратации при отрицательных температурах, а также ускоряет процесс набора прочности.

Криопласт СП15-1	Противоморозная добавка-суперпластификатор на основе смеси нафталинсульфонатов и органических солей натрия, обеспечивающая бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до –15 °С.
Криопласт СП15-2	Суперпластификатор с противоморозным эффектом на основе нафталинсульфоната и неорганических солей щелочных металлов, обеспечивающий бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до –15 °С.
Криопласт П25-1 тип 1	Комплексная противоморозная добавка на основе нафталинсульфоната и солей щелочных металлов. Использование добавки позволяет осуществлять бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до –25 °С.
Криопласт П25-1 тип 2	Добавка представляет собой смесь тиосульфата и роданида натрия, полиметиленнафталинсульфонатов и неорганических натриевых солей противоморозного действия. Основные области применения: производство тяжелого конструкционного бетона при возведении монолитных бетонных и железобетонных конструкций и замоноличивании стыков этих конструкций, производство легких бетонов, в том числе ячеистых, приготовление строительных растворов.
Криопласт СП25-2	Комплексная противоморозная добавка, состоящая из нафталинсульфоната и противоморозного компонента на основе спиртов. Использование добавки позволяет осуществлять бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до –25 °С.
Криопласт 30	Противоморозная добавка на основе смеси противоморозных компонентов, обеспечивающая бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до –25 °С.
Полипласт ПМП	Комплексная противоморозная и пластифицирующая добавка для бетонов и строительных растворов на основе натриевых солей лигниновой кислоты и противоморозного компонента: смеси хлористого кальция и ингибитора коррозии.

Окончание прил. 1

Криопласт ЛН	Суперпластификатор представляет собой смесь солей полиметиленнафталинсульфонатов натрия различной молекулярной массы и противоморозного компонента. Добавка может содержать антивспениватель на основе высших жирных кислот и олигомерного лапромола.
Криопласт Премиум	Противоморозная добавка на основе азотосодержащих солей кальция и спиртов, обеспечивающая бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до –25 °С. Обеспечивает устойчивое твердение «теплых» и «холодных» бетонов при температурах не ниже –25 °С.
Криопласт ПК	Противоморозная добавка на основе противоморозного компонента и поликарбоксилатной основы, обеспечивающая бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до –25 °С.
Криопласт Экстра	Противоморозная добавка на основе смеси противоморозных компонентов и полиметиленнафталинсульфоната натрия, обеспечивающая бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до –25 °С.
Полипласт NORD	Добавка представляет собой смесь поверхностно-активных натриевых солей метиленбиссульфокислоты и противоморозного компонента на основе органических многоатомных спиртов и солей неорганических кислот. Обеспечивает протекание процессов гидратации цемента при температуре твердения бетона не ниже –25 °С.
Криопласт Альфа	Противоморозная добавка на основе смеси противоморозных компонентов и производных полиметиленнафталинсульфокислот, обеспечивающая бетонирование при температуре окружающего воздуха от 0 до –25 °С.
Крио-25 тип 2	Представляет собой смесь регулятора структурообразования, многоатомных спиртов, солей и ингибитора коррозии.
Криопласт Люкс	Представляет собой комплексную пластифицирующую и противоморозную добавку для бетонов и строительных растворов, состоящую из смеси пластификаторов и противоморозных компонентов. Предназначена для работы с растворными и бетонными смесями при температуре окружающей среды до –25 °С, обладает пластифицирующим и водоредуцирующим действием.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Температурно-прочностной контроль бетона при возведении монолитных конструкций в зимний период

При выборе методов зимнего бетонирования необходимо исключить преждевременное замораживание бетонной смеси и бетона, обеспечить заданные темпы укладки бетонной смеси и получение нормируемых значений прочности бетона при сокращении времени твердения, а также создать условия, исключающие образование трещин в конструкции из-за температурных перепадов по сечению конструкции.

Организация и осуществление работ по температурно-прочностному контролю бетона возлагается на организацию, выполняющую бетонные работы.

Обязанности по контролю температуры бетона, анализу результатов контроля температуры, контролю прочности бетона, обеспечению качества и достоверности результатов контроля, прогнозированию поведения бетона в постоянно меняющейся климатической обстановке должны быть установлены в должностных инструкциях персонала подрядной организации.

На основании чертежей прогреваемых конструкций организация, выполняющая бетонные работы, разрабатывает организационно-технологическую документацию зимнего бетонирования, в состав которой входят:

1. Особенности технологии приготовления и транспортирования бетонной смеси, обеспечивающие получение требуемых свойств и, прежде всего, заданной температуры этой смеси при выгрузке из бетоносмесителя и у места укладки в конструкции;

2. Бетонные и железобетонные работы в зимних условиях рекомендуется производить только по специально разработанным технологическим картам, в которых должны быть приведены:

– способ и температурно-влажностный режим выдерживания бетона;

Продолжение прил. 2

– данные о материале опалубки с учетом требуемых теплоизоляционных показателей;

– данные о теплоизоляционном укрытии неопалубленных поверхностей;

– нормируемые значения прочности бетона;

– ожидаемые величины прочности бетона;

– сроки и порядок распалубливания и загружения конструкции;

– схемы размещения температурных скважин и типы приборов для измерения температуры бетона;

– расход материалов и трудозатраты на выполнение работ;

– требования к контролю качества;

– охрана труда и техника безопасности.

В случае применения электротермообработки бетона в технологических картах дополнительно указываются:

– схемы размещения и подключения электродов или электронагревателей;

– требуемая электрическая мощность, напряжение, сила тока;

– тип понижающего трансформатора, сечения и длины проводов.

Персонал организации, выполняющий бетонные работы в соответствии с требованиями организационно-технологической документации, организует монтаж электрической схемы прогрева бетона, выполняет контроль за работой прогревного оборудования, производит регулирование подаваемого напряжения и осуществляет:

1) локальное обследование конструкций с внесением записей в листы температурно-прочностного контроля;

2) контроль текущих и расчет прогнозируемых температурно-прочностных параметров бетона в процессе его выдерживания;

3) анализ результатов температурно-прочностного контроля бетона;

4) внесение, при необходимости, изменений в технологические карты;

5) мастера и прорабы, осуществляющие бетонные работы, помимо основных технологических мероприятий летнего периода обеспечивают:

– дополнительное утепление конструкций, если это необходимо для соблюдения заданного режима выдерживания бетона;

– вспомогательные работы, сопутствующие зимнему бетонированию (сверление отверстий в опалубке для электродов и температурных измерений, утепление конструкций, ограждение участков термообработки и другие работы).

Контроль прочности бетона

Контроль прочности бетона осуществляется при помощи термопар (хромель-копелевых, хромель-алюмелевых и т. п.), термометров, пирометров или термодатчиков с передачей информации о текущей температуре бетона в измерительный прибор. Передача данных может осуществляться проводным или беспроводным способом. Каналы передачи данных и сам прибор должны иметь достаточную помехозащищенность от электромагнитных излучений прогревочного оборудования.

Не рекомендуется применять термометры (спиртовые, ртутные и т. п.) при контроле температуры в массивных ($М_п < 5$ м$^{-1}$) и среднемассивных ($М_п = 5–10$ м$^{-1}$) конструкциях (из-за невозможности измерения температуры по сечению конструкции), а также в конструкциях любой массивности при использовании электротермообработки бетона (из-за опасности поражения электрическим током при снятии показаний).

Допускается осуществлять неразрушающий контроль текущей прочности маломассивных конструкций по ГОСТ 22690,

Продолжение прил. 2

ГОСТ 17624 при фактической положительной температуре бетона в местах проведения измерений. Показания прочности, полученные при нулевой и отрицательной фактической температуре бетона в местах проведения измерений, использовать при освидетельствовании и приемке конструкции по прочности бетона не допускается.

Применение цифровых термометров с возможностью считывания информации при касании к нему измерительного прибора и пирометров возможно только для маломассивных конструкций ($М_п > 10$ м$^{-1}$).

Определение текущей прочности бетона по контрольным образцам, твердеющим в тех же условиях, что и конструкция, не допускается.

Интенсивность измерения температуры для любых методов термообработки и этапов выдерживания должна быть не реже 1 раза в 3 ч.

Окончательно принятое значение интенсивности измерений указывается в технологической карте (проекте производства работ). Фиксация времени измерения осуществляется с точностью до 10 мин.

До начала бетонирования термопары и провода термодатчиков прокладывают вдоль арматуры в наиболее безопасных, с точки зрения повреждения, местах (например, между опалубкой и арматурой). Концы термопар и термодатчики следует защитить от электромагнитных помех, возникающих при электротермообработке бетона, при помощи трубок ПВХ.

Крепление проводов к арматуре осуществляют отрезками полипропиленового шпагата или мягкой вязальной проволоки диаметром не менее 1,2 мм с контролем отсутствия повреждения изоляции проводов. Крепление производится без сильного натяжения. Установку цифровых термометров на опалубке осуществляют комплектными фиксаторами.

Продолжение прил. 2

Полученные значения температур бетона и времени их замеров используют для расчета текущей прочности бетона. Расчеты могут быть выполнены следующими методами:

– по температурным графикам;

– по зрелости бетона;

– по аналитическим зависимостям.

Расчет прочности по температурным графикам имеет ряд недостатков, но, тем не менее, может быть рекомендован для контроля текущей прочности бетона на строительных площадках.

Основные недостатки – невозможно осуществлять прогноз поведения бетона во времени, точность расчетов зависит от физического размера графика (чем больше размер, тем точнее можно определить прочность бетона), для каждого состава должен быть использован свой график.

Не допускается выполнять расчет по графикам для бетона несоответствующего состава, даже если график взят из любого нормативного документа и относится к классу бетона, аналогичного применяемому на строительной площадке.

Построение графика набора прочности должно быть выполнено лабораторией поставщика бетона или строительной лабораторией подрядчика в специальных климатических камерах. При построении графика необходимо экспериментально получить изотермы для 10, 20, 40, 60 и 80 °С выдерживания бетона.

Расчет прочности по зрелости бетона является наименее точным из всех методов. Однако из-за своей простоты может быть применен на строительной площадке, но только в качестве оценочного метода расчета. Полученные этим методом результаты прочности бетона использовать при освидетельствовании и приемке конструкции по прочности бетона не допускается.

График набора прочности должен быть построен только для бетона нормального хранения (температура выдерживания

Продолжение прил. 2

20 (± 3) °С и относительная влажность 95 (± 5) %) по рекомендуемым моментам времени 1, 3, 7, 14 и 28 сут. Построение графика осуществляется лабораторией поставщика бетона или строительной лабораторией подрядчика.

Нормируемые показатели прочности бетона

Оценку прочности бетона, согласно ГОСТ 18105, следует проводить статистическим методом с учетом однородности бетона по прочности.

При твердении бетона в зимний период его прочность оценивают в процентах от требуемой прочности бетона в проектном возрасте (% от R_{28}).

Полученные на строительной площадке значения текущей прочности бетона должны быть сопоставлены с нормируемыми значениями прочности, указанными в технологических картах (проектах производства работ).

В качестве нормируемых значений могут выступать:

– *промежуточная прочность:* прочность бетона на определенном этапе выдерживания бетона;

– *критическая прочность:* прочность бетона, после достижения которой замораживание уже не вносит необратимых нарушений в структуру бетона, а бетон в нормальных условиях набирает нормируемую прочность;

– *распалубочная прочность:* прочность бетона, при которой осуществляется снятие опалубки с поверхностей конструкции;

– *прочность при поэтапном загружении:* прочность бетона, определяемая с учетом допустимой интенсивности загружения конструкций при их выдерживании;

– *фактический класс по прочности* на сжатие: значение класса бетона по прочности монолитных конструкций, рассчи-

Продолжение прил. 2

танное по результатам определения текущей прочности бетона и ее однородности.

Значения промежуточной прочности отсутствуют в нормативных документах и принимаются при разработке технологических карт в качестве ориентира для производителя работ. Например, может указываться промежуточная прочность, которую должен достичь бетон к концу определенного этапа выдерживания (подъема температуры, изотермической выдержки и т. п.).

Значения критической прочности принимаются согласно табл. П.2.1.

Таблица П.2.1

Значения критической прочности бетонов

№ п/п	Параметр	Величина параметра
1	Бетон без противоморозных добавок для конструкций, эксплуатируемых внутри зданий, фундаментов под оборудование, не подвергающихся динамическим воздействиям, подземных конструкций	Не менее 5 МПа
2	Бетон без противоморозных добавок для конструкций, подвергающихся атмосферным воздействиям в процессе эксплуатации, при классе бетона: В7,5–В10 В12,5–В25 В30 и выше	% от проектной прочности, не менее 50 40 30
3	Самоуплотняющийся бетон при классе В30 и выше	Не менее 25 % от проектной прочности
4	Бетон конструкций, подвергающихся по окончании выдерживания переменному замораживанию и оттаиванию в водонасыщенном состоянии или расположенных в зоне сезонного оттаивания вечномерзлых грунтов при условии введения в бетон воздухововлекающих и казообразующих ПАВ	Не менее 70 % от проектной прочности

Окончание табл. П.2.1

№ п/п	Параметр	Величина параметра
5	Бетон с противоморозными добавками	Не менее 20 % от проектной прочности к моменту охлаждения бетона до температуры, на которую рассчитано количество добавок

Распалубочная прочность бетона определяется:

– для вертикальных поверхностей ненагруженных конструкций – организационно-технологической документацией;

– для остальных случаев – организационно-технологической документацией и согласовывается с проектной организацией.

Контроль температурных напряжений в бетоне

В процессе выдерживания бетона необходимо следить за возникающими в нем температурными напряжениями, которые при превышении допустимого уровня могут вызвать появление трещин.

На температурные напряжения оказывают влияние следующие основные параметры:

– скорость нагрева и остывания бетона;

– перепад температуры по сечению бетона;

– разность температур наружного воздуха и бетона при распалубке.

Допустимый уровень температурных напряжений определяется условием $\frac{\sigma_{ti}}{R_{bti}} \le 1$, где σ_{ti} – температурные напряжения

Продолжение прил. 2

в бетоне в текущий момент времени; R_{bti} – расчетное сопротивление бетона на осевое растяжение по II группе предельных состояний.

Скорость нагрева бетона принимается для конструкций с модулем поверхности:

– до 5 $м^{-1}$ – не более 5 °С/ч;

– 5–10 $м^{-1}$ – не более 10 °С/ч;

– свыше 10 $м^{-1}$ – не более 15 °С/ч.

Прогрев бетона на высоких скоростях подъема температуры приводит к появлению температурных деформаций бетона, которые вызваны внутренним давлением, возникающим при быстром расширении образующихся паров воды. Кроме того, в массивных конструкциях могут возникнуть значительные температурные перепады, приводящие к движению влаги. Эта мигрирующая влага создает в порах бетона избыточное давление, которое оказывает негативное влияние на неокрепшую структуру бетона.

Скорость остывания бетона принимается для конструкций с модулем поверхности:

– до 2 $м^{-1}$ – не более 0,5 °С/ч;

– более 2 $м^{-1}$ – по рис. П.2.1.

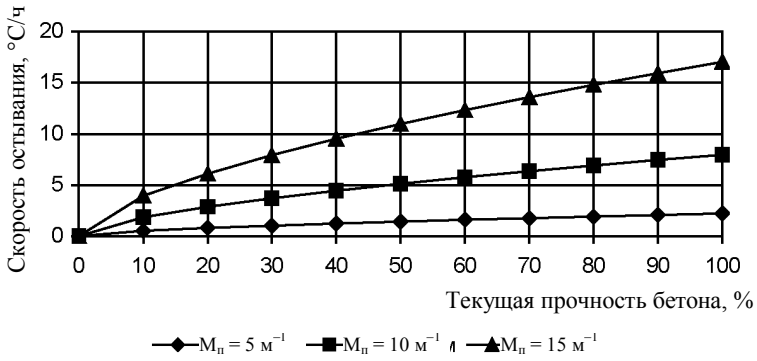


Рис. П.2.1. Максимальные скорости остывания бетона

Продолжение прил. 2

Ограничения по скорости остывания вызваны тем, что при охлаждении происходит сжатие бетона, чему противодействует образовавшаяся структура бетона.

В результате этого в нем возникают температурно-усадочные напряжения. Чтобы снизить такие напряжения, необходимо, чтобы скорость остывания была минимальной.

Перепад температур между наружными слоями бетона и воздуха при распалубке определяется по рис. П.2.2. Превышение указанных величин разности температур бетона при распалубке конструкции может привести к неравномерному распределению температур в конструкции, вследствие чего поверхностные слои бетона будут остывать более интенсивно, нежели центральные участки.

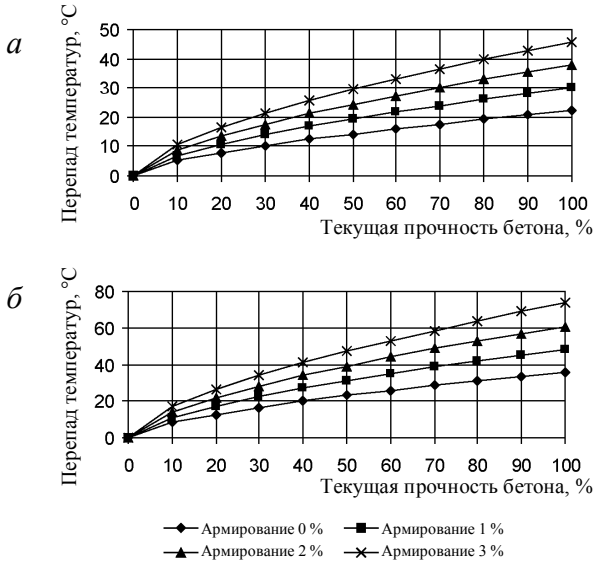


Рис. П.2.2. Максимальные перепады температур между поверхностью бетона и окружающим воздухом при распалубке (окончание см. на с. 385):
а – $М_п = 2$ м$^{-1}$; *б* – $М_п = 5$ м$^{-1}$

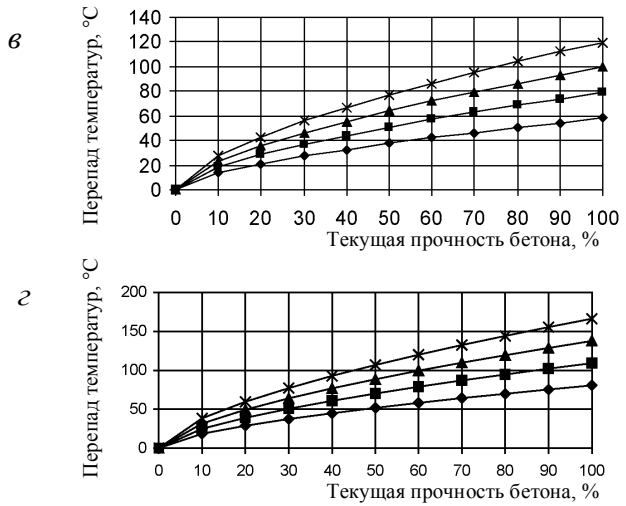


Рис. П.2.2. Окончание (начало см. на с. 384):
в – $М_п = 10$ м$^{-1}$; *г* – $М_п = 15$ м$^{-1}$

Максимальный перепад температуры по сечению бетона конструкции зависит от параметров армирования конструкции и текущей прочности бетона и не должен превышать значений, взятых по рис. П.2.3.

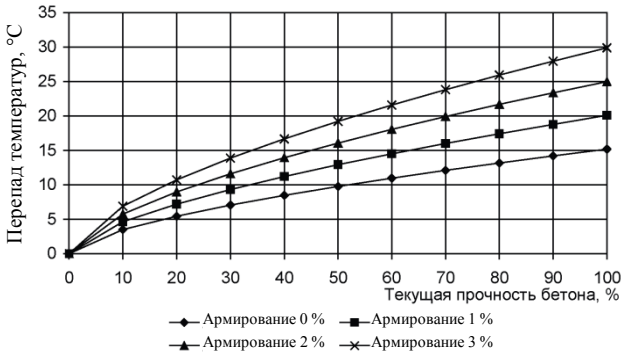


Рис. П.2.3. Максимальный температурный перепад по сечению конструкции

Продолжение прил. 2

Превышение указанных значений может вызвать значительные температурные напряжения в бетоне и снизить несущую способность и долговечность конструкции.

Расположение контрольных точек для измерения температуры бетона

Количество точек измерения температуры определяется на стадии разработки организационно-технологической документации и зависит от типа, массивности и места расположения конструкции.

Измерения температур должны проводиться в точках с прогнозируемой наибольшей разницей температур (например, углы и ядро конструкции), не пренебрегая промежуточными участками конструкции.

Независимо от типа конструкции, при укладке бетона на промороженное основание или соприкосновении свежеуложенного бетона с ранее замороженным, контроль температуры должен дополнительно осуществляться в сечении, расположенном в непосредственной близости от промороженной среды. Количество точек измерения температуры в этом сечении:

– при площади сечения до 1 м^2 – не менее двух;

– при площади сечения более 1 м^2 – не менее трех на каждые 10 м^2.

В колоннах и пилонах температуру контролируют в трех сечениях, расположенных внизу, в середине и вверху конструкции. В каждом сечении измерение температур осуществляют не менее чем в двух точках.

В балках и ригелях температуру контролируют в опорном сечении и далее не менее чем в одном сечении на каждые 4 м длины конструкции. В каждом сечении измерение температур осуществляют не менее чем в двух точках.

Продолжение прил. 2

В стенах температуру контролируют в трех сечениях, расположенных внизу, в середине и вверху конструкции. В каждом сечении измерение температур осуществляют не менее чем в двух точках на каждые 6 м длины стены.

В плитах перекрытия и фундаментных плитах температуру контролируют не менее чем в трех точках на каждые 20 м^2 конструкции. Если размер захватки меньше 20 м^2, то температуру контролируют не менее чем в трех точках на каждой захватке. Точки располагают:

– при толщине плиты до 200 мм – внизу и вверху плиты;

– при толщине плиты более 200 мм – внизу, в середине и вверху плиты.

В остальных конструкциях количество температурных точек зависит от их массивности и определяется по табл. П.2.2.

Таблица П.2.2

Количество температурных точек

Модуль поверхности конструкции, м$^{-1}$	До 3	До 6	До 9	Более 9
Количество температурных точек на 100 м^3 бетона	20	40	50	55

В симметричных конструкциях, находящихся в однородной по температуре среде, возможно контролировать температуру на $^1/_4$ сечения конструкции с наветренной стороны (рис. П.2.4).

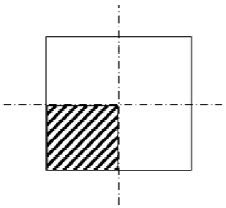


Рис. П.2.4. Участок измерения температур в симметричных конструкциях

Окончание прил. 2

Документирование температурно-прочностного контроля бетона

При проведении температурно-прочностного контроля выдерживания бетона документированию подлежат все виды нормируемой прочности, а также результаты температурного контроля, включая контроль температурных напряжений.

Полученные в ходе температурно-прочностного контроля данные, а также значения нормируемых показателей заносят в листы температурно-прочностного контроля.

При проведении компьютерного температурно-прочностного контроля форму листов температурно-прочностного контроля допускается принимать в соответствии с применяемым специализированным программным обеспечением.

Записи, вносимые в листы температурно-прочностного контроля, подтверждают подписью с указанием расшифровки и должности ответственного лица.

Заполненные листы температурно-прочностного контроля включают в состав исполнительной документации, необходимой для дальнейших контрольных мероприятий: приемки монолитных конструкций по прочности бетона и освидетельствования ответственных конструкций.

Техническая документация по выдерживанию бетона в зимнее время хранится до окончания наблюдения за бетоном на объекте. Затем она передается в производственно-технический отдел организации, ведущей бетонные работы на объекте.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Типы опалубок и области их применения

1. Разборно-переставная опалубка:
– при возведении массивов;
– фундаментов;
– стен;
– перегородок;
– колонн;
– балок, плит покрытий и перекрытий.
2. Блочная опалубка:
– при возведении крупноразмерных конструкций и их фрагментов.
3. Объемно-переставная (туннельная) опалубка:
– при одновременном возведении стен и перекрытий жилых и гражданских зданий.
4. Скользящая опалубка:
– при возведении вертикальных конструкций зданий и сооружений большой высоты.
5. Горизонтально-перемещаемая (катучая) опалубка:
– при возведении линейно-протяженных конструкций.
6. Несъемная опалубка:
– при возведении конструкций без распалубливания, с устройством гидроизоляции, облицовки, утепления и др.
7. Пневматическая опалубка:
– при возведении пространственных конструкций криволинейного очертания.

Зарубежные системы опалубок

Стальные и алюминиевые

1. PERI (Германия):
а) опалубка для стен и шахт:

Продолжение прил. 3

– рамная опалубка TRIO, TRIO Housing, DOMINO, HANDSET;

– балочная опалубка VARIO GT24;

– опалубка для круглых стен RUNDFLEX Plus;

– опалубка для круглых колонн с распределяющим ригелем GRV;

б) опалубка для колонн (квадратная, круглая, прямоугольная):

– для квадратных и прямоугольных колонн RAPID;

– для квадратных и прямоугольных колонн TRIO;

– для квадратных и прямоугольных колонн QUATTRO;

– для квадратных и прямоугольных колонн VARIO GT 24;

– опалубка квадратных и прямоугольных колонн для опалубливания вручную LICO;

– опалубка SRS для колонн круглого сечения;

в) опалубка для перекрытий (панельная, балочная, стол для перекрытия, для ригелей):

– панельная опалубка SKYDECK;

– балочная опалубка GRIDFLEX;

– балочная опалубка MULTIFLEX;

– модульные столы перекрытия UNIPORTAL;

– опалубочный стол перекрытия SKYTABLE;

– опалубка балок перекрытия UZ, UZR, AW;

г) подъемные системы опалубки:

– система складных консольных лесов FB 180;

– система консольно-переставных лесов CB;

– рельсовая подъемная опалубка RCS;

– самоподъемная система ACS;

д) опалубка для мостов и туннелей VARIOKIT.

2. RINGER (Австрия):

– опалубка стен, фундаментов, опорных закругленных конструкций – Алю-Мастер, Сталь-Мастер, Алю-2000, Алю-легкая;

– опалубка колонн;

– балочная опалубка для перекрытий.

3. MEVA (Германия):

– опалубка для квадратных и прямоугольных колонн CaroFalt;

– опалубка для круглых колонн Circo;

– опалубка для стен и фундаментов AluStar/StarTec, Mammut, EcoAs;

– опалубка для стен круглых и полигональных сооружений Arcus, Rundfix, Polygonal;

– балочная опалубка для перекрытий MevaDec, MevaFlex;

– крупногабаритные опалубочные столы перекрытия STD;

– подъемно-переставная опалубка KLK 230, MAC, MGC/MGS.

4. NOE-Schaltechnik (Германия):

а) опалубка для фундаментов, стен и колонн:

– рамная стальная опалубка для промышленного и гражданского строительства NOEtop;

– рамная алюминиевая опалубка ручной и крановой сборки NOEtopAlu;

– рамная алюминиевая опалубка ручной и крановой сборки NOEaluL;

– рамная стальная опалубка для ручной и крановой сборки NOElight;

– опалубка криволинейных в плане стен и сооружений NOE Rundshalungen;

– опалубка для колонн прямоугольного сечения NOE Vario 2000;

– фасадная опалубка (односторонняя опалубка);

б) опалубка для перекрытий:

– балочная система для перекрытий NOE H20;

– опалубочные столы для перекрытий NOE;

– опалубка для балок перекрытия NOE UZ-Schalung;

Продолжение прил. 3

– алюминиевая опалубка для перекрытий NOEdeck;

– стальная опалубка для перекрытий NOESFK;

в) туннельная и сводчатая опалубка:

– туннельная опалубка NOE для одновременного бетонирования стен и перекрытия;

г) опалубка для лестничных маршей NOE.

5. DOKA (Германия):

а) опалубка стен, колонн и фундаментов:

– рамная крупнощитовая опалубка стен Framax Xlife;

– рамная мелкощитовая опалубка стен, колонн и фундаментов Frami Xlife;

– рамная опалубка стен Dokaset;

– алюминиевая рамная опалубка стен Doka Alu-Framax Xlife;

– балочная опалубка стен FF20;

– балочная опалубка стен FF100 tec;

– крупнощитовая балочная опалубка стен Top 50;

– усиленная балочная опалубка Top 100 tec;

– круговая опалубка стен H20;

б) опалубка для перекрытий:

– балочная опалубка перекрытий и балок Dokaflex 1-2-4, Doka Xtra и Dokaflex 30 tec;

– щитовая опалубка перекрытий Dokadek 30;

– опалубочные столы перекрытий Dokamatic и Dokaflex;

в) подъемно-переставные системы:

– самодвижущаяся подъемно-переставная опалубка для высотного строительства на платформе SCP;

– самодвижущаяся подъемно-переставная опалубка SKE plus для сооружений любой формы и высоты;

– самодвижущаяся подъемно-переставная опалубка Xclimb 60 для строительных объектов простой формы и любой высоты;

– самодвижущаяся подъемно-переставная опалубка SK175 для строительства градирен;

г) направляемая подъемно-переставная опалубка:

– направляемая подъемно-переставная опалубка Xclimb 60;

– подъемно-переставная опалубка MF240 для строительных объектов любой формы и размера;

– подъемно-переставная опалубка из складных подмостей К и опалубочных элементов;

– односторонняя подъемно-переставная опалубка для сооружения дамб, плотин для водохранилищ, ГЭС, а также для пилонов;

– подъемно-переставная опалубка для внутренних стен шахт.

6. PASCHAL (Германия):

– балочная круговая опалубка стен резервуаров, наклонных стен, лестничных клеток и шахт подъемников, башен;

– универсальная крупнощитовая и мелкощитовая опалубка «РАСТЕР/ГЕ» для фундаментов, диафрагм жесткости, стен, колонн, ригелей и лестничных маршей;

– крупнощитовая опалубка ЛОГО для стен, круглых стен, колонн и фундаментов;

– крупнощитовая опалубка Атлет для стен;

– стальная регулируемая опалубка ПАУК-60 для колонн;

– стальная регулируемая опалубка ГРИП для колонн;

– стальная опалубка для круглых колонн;

– одноразовая опалубка из картона для круглых колонн;

– балочная опалубка ГАСС для перекрытий и ригелей;

– балочная опалубка ДЕК для перекрытий.

7. HUNNEBECK (Германия):

– мелкощитовая рамная опалубка стен, колонн, округлых сооружений и фундаментов РАСТО/ТАККО;

– крупнощитовая опалубка для округлых вертикальных сооружений РОНДА;

– крупнощитовая рамная опалубка стен МАНТО;

– балочная опалубка ТОПЕК для перекрытий и ригелей.

Продолжение прил. 3

8. РОБУД (Германия):

а) опалубка для стен, стен шахт лифтов, колонн, фундаментов, резервуаров, подпорных стен, опор мостов и др.:

– стальная универсальная рамная опалубка РОБУД STAYER (G 7000);

– опалубка для радиальных стен РОБУД RAMFLEX;

б) опалубка для перекрытий:

– балочная опалубка для перекрытий РОБУД STELDECK;

в) система подъемно-переставной опалубки РОБУД VERTIKAL.

9. BYGGING UDDEMANN AB (Швеция) – опалубка скользящая гидравлическая – стены постоянного сечения по высоте и одинаковой толщины (силосы, копры, резервуары, ядра жесткости).

Полимерные (пластмассовые)

GEOPLAST (Италия):

– GEOPANEL – для стен, фундаментов и квадратных колонн;

– GEOSKY – для перекрытий и ригелей;

– SKYDOME – для создания двунаправленных перекрытий;

– SKYRAIL – для создания однонаправленных перекрытий;

– GEOTUB – для квадратных, прямоугольных и круглых колонн.

Российские опалубочные системы

1. Опалубка мелкощитовая МСК, ООО «Монолит Строй Комплект», г. Москва (аналог немецкой системы Paschal Raster GE):

– рамная опалубка прямоугольных и квадратных колонн, стен, шахт лифтов, фундаментов, криволинейных конструкций.

2. ЗАО «Промстройконтракт» (г. Москва):

Продолжение прил. 3

а) опалубка вертикальных конструкций (аналог немецкой системы PERI-VARIO):

– балочно-ригельная опалубка PSK-CLASSIC (прямоугольные и квадратные колонны, круглые колонны, стены, радиусные стены, подъемно-переставная система, одностороннее бетонирование);

– опалубка рамная крупнощитовая PSK-DELTA (аналог Peri Trio);

– стальная крупнощитовая опалубка стен Опрус-3 (аналог Meva);

б) опалубка перекрытий, ригелей и капителей:

– балочно-рамная опалубка PSK-CUP на лесах (аналог английской опалубочной системы);

– балочно-стоечная опалубка PSK-CUP на телескопических стойках;

– опалубка на основе системы столов перекрытий PSK-SET (аналог PERI PD-8);

в) катучая тоннельная опалубка;

г) катучая опалубка для водоводов PSK-AQUEDUCT;

д) опалубка одноразовая картонная (H-BAU Technik, Германия):

– для круглых колонн RAPIDOBAT-SPIRAL (спиральная) и RAPIDOBAT-GLATT (гладкая);

– для 6-угольных колонн RAPIDOBAT-SECHSECK;

– для 8-угольных колонн RAPIDOBAT-ACHTECK;

– для квадратных колонн RAPIDOBAT-QUADRAT;

– для прямоугольных колонн RAPIDOBAT-RECHSECK;

– для структурных колонн, с канелюрами RAPIDOBAT-STRUKTUR.

3. ОАО «Старооскольская опалубка» (г. Старый Оскол):

а) универсальная опалубка для стен и колонн СООП;

б) универсальная опалубка перекрытий СООП;

в) туннельная опалубка.

Окончание прил. 3

4. ООО «Алума-Опалубка» (ЦНИИИОМТП, г. Москва):

а) крупнощитовая алюминиевая (и стальная) опалубка для стен и колонн;

б) опалубка колонн из универсальных щитов и шкворней;

в) опалубка колонн с креплением щитов на угловых элементах;

г) опалубка перекрытий на алюминиевых и стальных рамах;

д) опалубка перекрытий на телескопических стойках;

е) опалубка перекрытий на фермах (перекатывающихся столах).

5. ЗАО «Строительные технологии» (г. Омск) – стальная щитовая опалубка Модуль-А – бетонирование стен, колонн, пилонов, перекрытий, элементов лестничного узла, лифтовых шахт и др.

6. ООО «МоноПласт» (г. Красноярск):

а) опалубка стен;

б) опалубка колонн на универсальных щитах;

в) опалубка колонн на угловых щитах;

г) опалубка колонн на линейных щитах с применением углового элемента;

д) опалубка колонн на линейно-торцевых щитах;

е) опалубка лифтовых шахт;

ж) опалубка перекрытий на телескопических стойках;

з) опалубка перекрытий на объемных стойках.

7. ООО «ДАК» (г. Красноярск) – разборно-переставная алюминиевая крупнощитовая опалубка стен, колонн и перекрытий (на телескопических стойках, на рамах).

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица П.4.1

Изменение температуры $\Delta t'_{тр}$ при транспортировке различными автосредствами

Способ транспортирования	Марка или конструкция транспортного устройства	Объем перевозимой бетонной смеси, $м^3$	град/град·мин
Автосамосвалами	ГАЗ-93	1,4	0,0037
	ЗИЛ-ММЗ-555	2	0,003
	МАЗ-503	3,2	0,0025
Автобетоновозами	Кузов с двойной обшивкой, с пространством между ними 50–60 мм и крышкой	3,2	0,00022
Автобадьевозами	Бадья опрокидная с шарнирно-роликовыми затворами	1,6	0,0009

Таблица П.4.2

Изменение температуры $\Delta t'_{у}$ при укладке и уплотнении

Относительное снижение температуры при укладке $\Delta t'_{у}$	Толщина конструкции , мм
0,03	60
0,018	100
0,012	150
0,009	200
0,007	300
0,005	400
0,004	500
0,003	600

Таблица П.4.3

Средняя месячная температура воздуха, °С

Край, область, пункт	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Алтайский край												
Барнаул	–17,5	–16,1	–9,1	2,1	11,4	17,7	19,8	16,9	10,8	2,5	–7,9	–15
Рубцовск	–17,5	–16,4	–8,9	3,6	12,6	18,7	20,5	17,7	11,8	3,7	–7,1	–14,9
Читинская область												
Чара	–33,8	–29,7	–18,3	–4,9	4,4	12,7	16,2	13	5,2	–6,4	–22	–31,9
Чита	–26,2	–22,2	–11,1	–0,4	8,4	15,7	17,8	15,2	7,7	–1,8	–14,3	–23,5
Кемеровская область												
Кемерово	–18,8	–16,9	–9,8	1	9,7	16,3	18,8	15,4	9,5	1,3	–9,6	–16,9
Киселевск	–17,2	–15,5	–8,1	2	10	16,6	18,8	15,8	10	2,2	–8,3	–15,4
Новокузнецк	–17,2	–15,5	–8,1	2	10	16,6	18,8	15,8	10	2,2	–8,3	–15,4
Прокопьевск	–17,2	–15,5	–8,1	2	10	16,6	18,8	15,8	10	2,2	–8,3	–15,4
Мариинск	–17,8	–16,2	–9,3	0,8	9	15,9	18,3	15,2	9,1	1	–9,1	–16,2
Красноярский край												
Ачинск	–17,7	–15,6	–9,1	0,4	8,6	15,6	17,9	15	9	0,6	–9,3	–16,3
Красноярск	–17,7	–15,6	–9,1	0,4	8,6	15,6	17,9	15	9	0,6	–9,3	–16,3
Минусинск	–20,8	–19	–8,9	3	10,5	17,2	19,8	16,9	10	1,9	–8,9	–17,8
Томская область												
Асино	–19,1	–16,9	–9,9	0	8,7	15,4	18,3	15,1	9,3	0,8	–10,1	–17,3
Колпашево	–20,7	–18,7	–10,8	–0,7	7,3	15,2	18	14,4	8,7	0,1	–11,4	–19,4
Томск	–19,1	–16,9	–9,9	0	8,7	15,4	18,3	15,1	9,3	0,8	–10,1	–17,3
Новосибирская область												
Новосибирск	–18,8	–17,3	–10,1	1,5	10,3	16,7	19	15,8	10,1	1,9	–9,2	–16,5
Иркутская область												
Иркутск	–20,6	–18,1	–9,4	1	8,5	14,8	17,6	15	8,2	0,5	–10,4	–18,4

Таблица П.4.4

Коэффициент теплопередачи опалубки различной конструкции $K_т$

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

* Применяется с сетчатым нагревателем, расположенным между слоями асбеста.

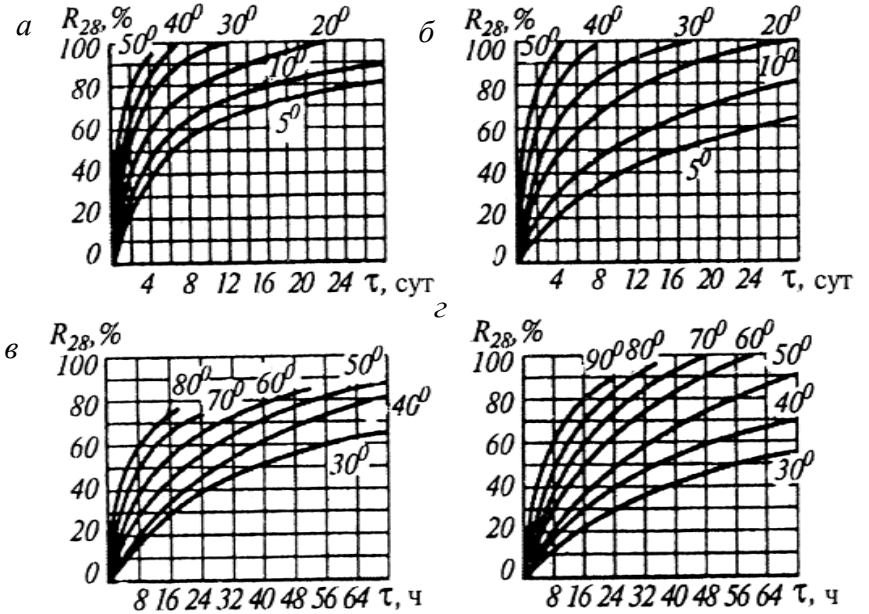


Рис. П.4.1. Кривые набора прочности бетоном классов В15–В22,5: *а* – при температуре твердения до 50 °С на портландцементе М400–500; *б* – то же, при температуре твердения до 80 °С; *в* – при температуре твердения до 50 °С на шлакопортландцементе М400–500; *г* – то же, при температуре до 90 °С

Таблица П.4.5

Техническая характеристика масляных трёхфазных силовых трансформаторов

Марка	Мощность, кВ·А
ТМ 63/6	63
ТМ 63/10	
ТМ 100/6	100
ТМ 100/10	
ТМ 160/6	160
ТМ 160/10	
ТМ250/6	250
ТМ 250/10	

Окончание табл. П.4.5

Марка	Мощность, кВ·А
ТМ 400/6	400
ТМ 400/10	
ТМ 630/6	630
ТМ 630/10	
ТМ 1000/6	1000
ТМ 1000/10	

Таблица П.4.6

Техническая характеристика понижающих трансформаторов

Марка	Мощность, кВт	Напряжение, В		Сила тока, А		Масса, кг	Габариты, мм
		первичное	вторичное	первичное	вторичное		
ТСПК-20А	20	380, 220	6, 12, 22, 38, 48, 62, 101	–	480, 320, 240, 160, 120	260	775×775 ×740
ТМОА-50	50	380	49, 60, 70, 85, 103, 121	76, 65, 53	418, 239	473	980×930 ×1232
ТМОБ-63	63	380	49, 60, 70, 85, 103, 121	96, 82, 69	520, 301	900	1150×1200 ×890
ТМО-50/10	50	380, 220	50, 61, 87, 106	131, 76	670, 470, 320, 270	890	1450×1290 ×890
ТМ-75/6	50	380, 220	50, 61, 87, 106	131, 76	572, 470, 330, 272	650	1050×1290 ×740
КТП-06-63	63	380	49, 60, 70, 85, 103, 121	–	–	900	–

Таблица П.4.7

Удельное электрическое сопротивление бетона на ПЦ разных заводов

Завод-изготовитель цемента	Величина удельного электросопротивления бетона, Ом·м	
	$\rho_{нач}$	$\rho_{мин}$
Алексеевский	7,2	4,3
Белгородский	18,8	12,2
Воскресенский	7,2	4,9
Николаевский	6,2	4
Ростовский	8,5	7,2
Сухоложский	10,6	6,9
Чернореченский	7,9	5,5

Таблица П.4.8

Значение коэффициентов лучистого потока $\varphi_{и\text{-}п}$, $\varphi_{и\text{-}о}$, $\varphi_{о\text{-}и}$

Коэффициенты	Значения коэффициентов при S/d, равном					
	1	2	5	10	20	50
$\varphi_{и\text{-}п}$, $\varphi_{и\text{-}о}$	0,318	0,417	0,466	0,48	0,482	0,49
$\varphi_{о\text{-}и}$	1	0,656	0,293	0,151	0,077	0,031

Примечание. Для промежуточных значений S/d величина φ определяется по правилу линейной интерполяции.

Таблица П.4.9

Значение коэффициента лучистого потока $\varphi_{о\text{-}п}$

Величина α_1/h	Значения $\varphi_{о\text{-}п}$ при α_2/h, равном							
	0,1	1	5	10	50	100	500	10000
0,1	0	0,013	0,032	0,034	0,041	0,048	0,049	0,049
1	0,015	0,195	0,358	0,388	0,411	0,412	0,413	0,414
5	0,032	0,299	0,564	0,793	0,8	0,815	0,818	0,819
10	0,04	0,385	0,729	0,812	0,822	0,895	0,9	0,905
50	0,044	0,469	0,813	0,866	0,959	0,968	0,977	0,98
100	0,045	0,6	0,815	0,893	0,967	0,972	0,98	0,985

Окончание табл. П.4.9

Величина α_1/h	Значения $\varphi_{о\text{-}п}$ при α_2/h, равном							
	0,1	1	5	10	50	100	500	10000
500	0,046	0,681	0,818	0,9	0,974	0,983	0,993	0,998
1000	0,05	0,707	0,82	0,905	0,98	0,99	0,998	0,999

Примечание. Для промежуточных значений α_1/h и α_2/h величина $\varphi_{о\text{-}п}$ определяется по правилу линейной интерполяции.

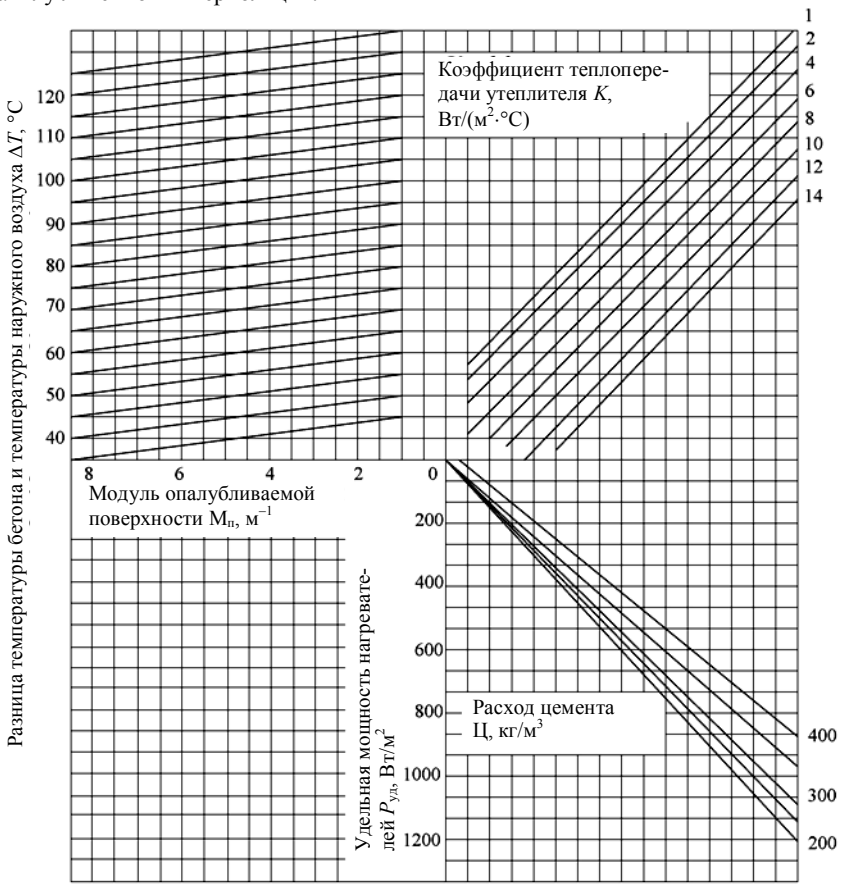


Рис. П.4.2. Номограмма для определения удельной мощности нагрева бетона

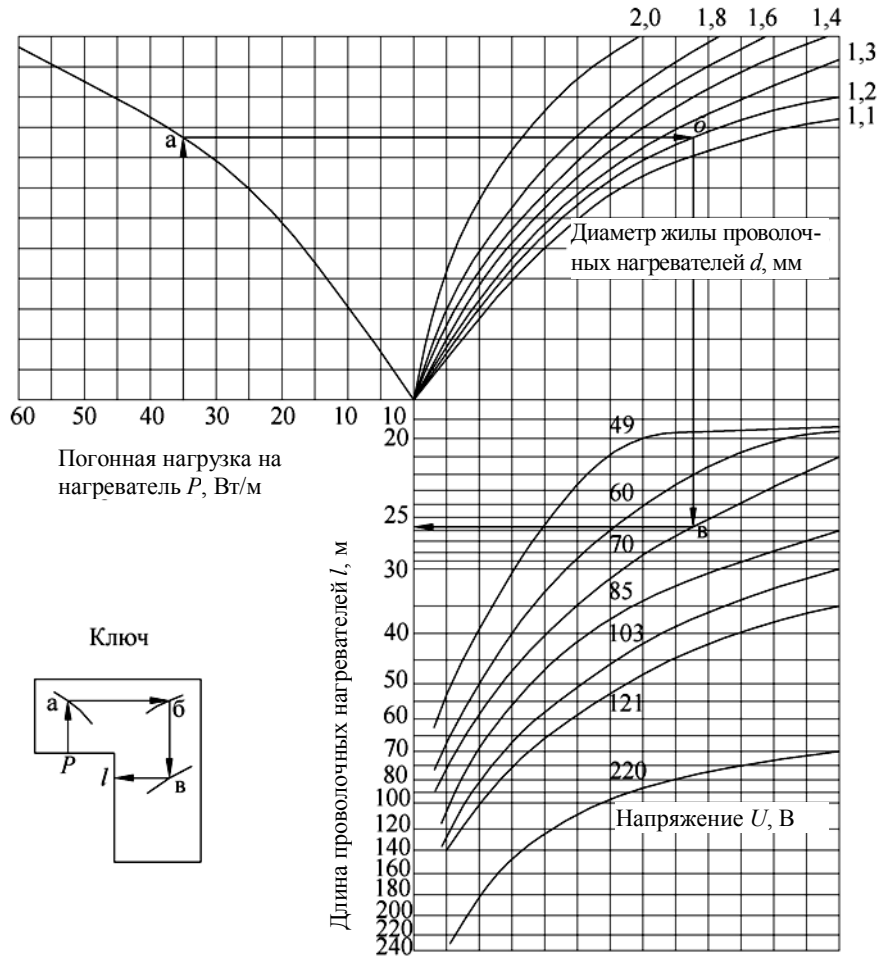


Рис. П.4.3. Номограмма для определения длины нагревателей

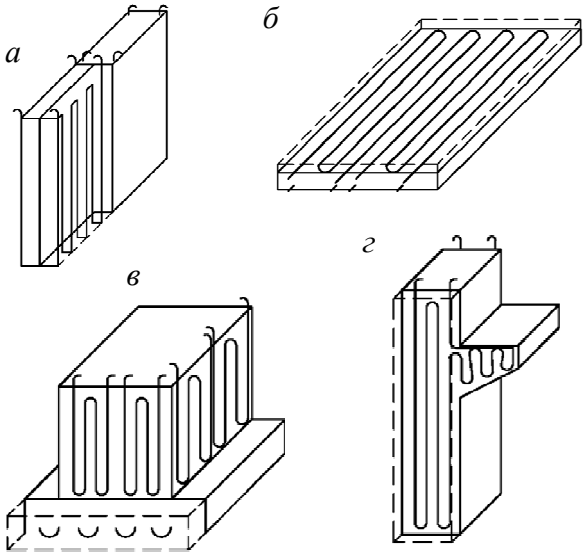


Рис. П.4.4. Навивка нагревательных проводов в типовых конструкциях: *а* – в стенах; *б* – в перекрытиях; *в* – в столбчатых фундаментах; *г* – в колоннах

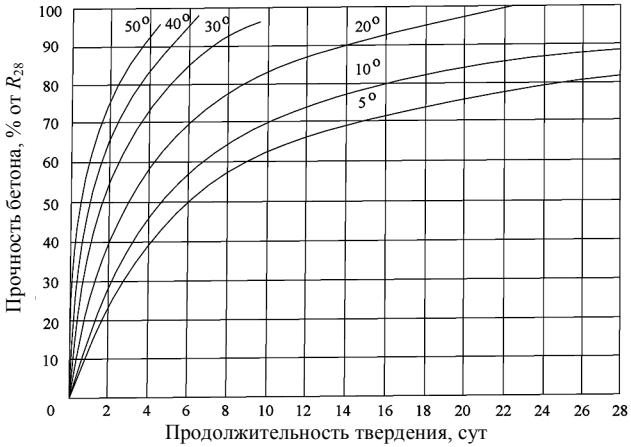


Рис. П.4.5. Прочность бетона в зависимости от температуры и продолжительности выдерживания

Таблица П.4.10

Термохимические характеристики цементов

Вид	Марка	Q_{max}, ккал/кг, при t °С				B, $10^{-2}\cdot r^{-1}$, при t °С			
		20	40	60	80	20	40	60	80
БТЦ	600	110	100	90	80	6	11,5	18	83
Портландцемент	500	95	90	85	80	5	10,5	15	21
	400	80	75	70	65	4	10,2	14,5	20
	300	70	65	63	59	3	10,0	13,8	19,5
	200	60	58	54	50	2,5	9,0	13,0	19,0
ЩПЦ	300	60	58	54	50	2,0	8,0	13,0	18,5
	200	60	58	53	48	1,5	6,0	12,0	18,0

Примечание. 1 ккал/(кг·°С) = 4,2 кДж/(кг·°С).

Таблица П.4.11

Значение коэффициента α в зависимости от коэффициента *K* и скорости ветра

Величина K, ккал/(м^2·ч·°С)	Безветрие	Умеренный ветер	Сильный ветер
	Скорость ветра, м/с		
	до 0,2	0,2–6	более 6
До 2,5	1	1,2	1,3
Свыше 2,5	1	1,3	1,4

Примечание. 1 ккал/(м^2·ч·°С) = 1,16 Вт/(м^2·°С).

Таблица П.4.12

Коэффициент *K* для наиболее распространенных видов ограждения

Материалы	Толщина доски, см			
	0	2,5	4,0	5,0
Деревянная опалубка	–	4,6	3,8	3,6
Опалубка + толь и войлок (δ = 5 см)	–	2,1	1,78	1,56
Войлок (δ = 2 см)	–	1,38	1,23	1,12
Опалубка, опилки (δ = 5 см)	–	0,99	0,85	0,75
Опалубка, толь, камышит (δ = 5 см)	–	0,81	0,76	0,72
Опалубка, шлаковата (δ =3 см), опалубка	–	0,09	0,075	0,06

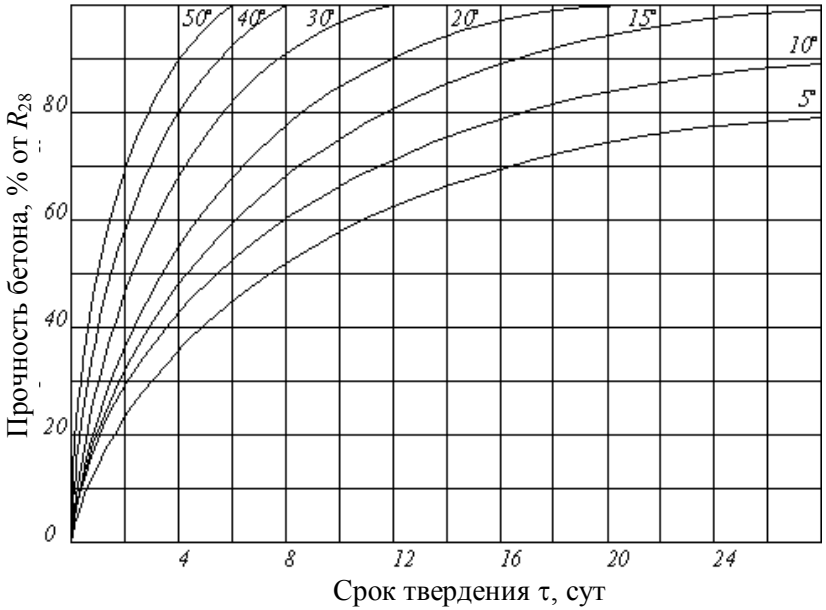


Рис. П.4.6. График нарастания прочности бетона на портландцементе М400, М500

Таблица П.4.13

Количество противоморозной добавки для бетона, подвергаемого электропрогреву

Температура остывания бетона до электропрогрева		Количество добавок в расчете на сухое вещество, % от массы цемента			
От	До				
0	–5	4	4	0 + 2	1 + 1,5
–6	–10	6	7	0 + 3	1,5 + 2
–11	–15	8	10	1 + 3	3 + 3,5
–16	–20	10	–	1,5 + 3,5	4,5 + 5,5

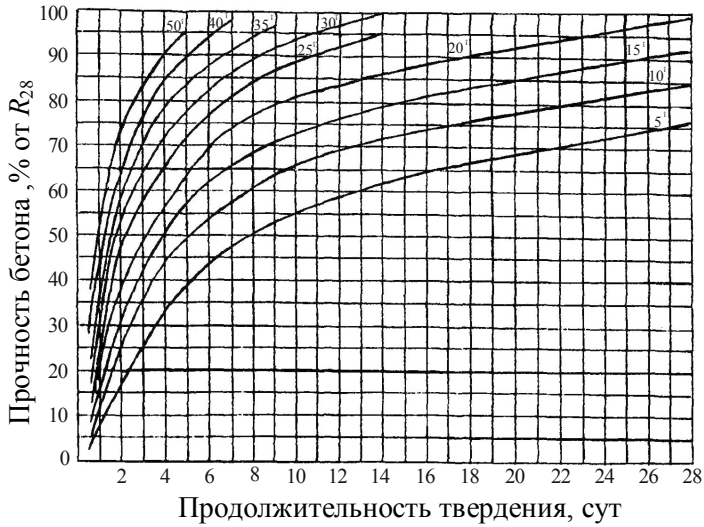


Рис. П.4.7. График нарастания прочности бетона класса В15–В22,5 на портландцементе М400 при температуре от +5 до +50 °С

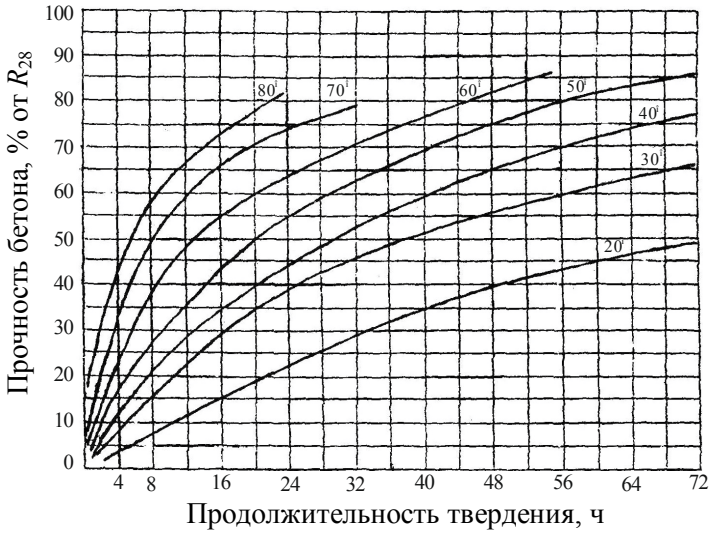


Рис. П.4.8. График нарастания прочности бетона класса В15–В22,5 на портландцементе М400 при температуре от +20 до +80 °С

Таблица П.4.14

Удельное электрическое сопротивление бетона на портландцементе различных заводов (расход цемента 400 кг/м^3, воды 185 л/м^3)

Завод-изготовитель цемента	Удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м	
	начальное	минимальное
Акмянский	8,9	6,5
Алексеевский	7,4	4,9
Авросиевский	4,8	3,5
Арарат	8,4	6,0
Белгородский	18,8	12,2
Большевик	12,4	8,6
Брянский	11,6	8,1
Воркутинский	8,7	6,2
Воскресенский	7,2	4,9
Гигант	10,1	6,0
Жигулевский	9,6	7,4
Каспский	6,6	5,0
Николаевский	6,2	4,0
Новоздолбуновский	11,6	9,4
Новотроицкий	12,1	6,7
Подольский	11,5	9,7
Первомайский	9,8	6,6
Ростовский	8,5	7,2
Серебряковский	14,0	9,9
Сенгилеевский	23,4	16,3
Сланцевский	3,0	2,0
Спасский	8,0	4,9
Старооскольский	16,0	7,0
Сухоложский	10,6	6,9
Ульяновский	7,4	4,8
Чернореченский	7,9	5,5

Примечание. Удельное электрическое сопротивление бетонов на шлакопортландцементах тех же заводов-изготовителей в 1,1–1,2 раза выше, чем бетонов на портландцементах.

Таблица П.4.15

Тепловыделение цементов различных видов и марок в зависимости от температуры и времени твердения

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение, Дж/кг							
		Время твердения, сут							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портланд-цемент М300	10	8,4	25,9	41,9	83,9	125,7	188,6	230,6	272,4
	20	25,2	41,9	75,4	125,7	167,6	230,5	251,4	283,3
	40	50,3	83,8	146,7	188,6	230,5	251,4	293,3	–
	60	83,8	146,7	188,6	230,5	272,4	298,3	–	–
Портланд-цемент М400	5	–	–	29,3	62,9	108,9	188,4	209,5	251,4
	10	12,6	25,2	50,3	104,8	146,7	209,5	251,4	293,3
	20	41,9	66,9	104,8	167,6	209,5	272,4	314,3	335,2
	40	83,7	133,9	188,6	230,5	272,4	314,3	335,2	–
	60	129,8	188,4	230,5	272,4	314,3	335,2	–	–
Портланд-цемент М500	5	12,6	25,2	41,9	88,8	125,7	188,6	230,5	272,4
	10	25,2	41,9	62,9	104,8	167,6	251,4	393,3	314,3
	20	41,9	83,8	125,7	188,6	251,4	293,3	335,2	377,1
	40	104,8	167,6	209,5	272,4	293,3	356,2	377,1	–
	60	188,6	230,5	272,4	314,3	356,2	377	–	–
БТЦ М600	10	33,5	50,3	75,4	125,7	167,6	372,4	335,2	377,1
	20	62,9	104,8	146,7	209,5	293,3	335,2	377,1	419
	40	117,3	188,6	230,5	293,3	335,2	377,1	419	–
	60	209,5	251,4	293,3	335,2	377,1	419	–	–
ШПЦ М300	10	–	25,2	33,5	62,9	104,8	167,6	209,5	230,5
	20	–	33,5	62,9	125,7	146,7	209,5	251,4	272,4
	40	41,9	75,4	117,3	167,6	209,5	251,4	272,4	–
	60	62,9	104,8	146,7	209,5	230,5	272,4	–	–

Таблица П.4.16

Ориентировочное уменьшение величины удельного электрического сопротивления бетона в зависимости от вида и количества применяемых добавок

Наименование добавки	Количество добавок, % от веса воды затворения					
	0	0,5	1	1,5	2	3
Хлористый кальций $CaCl_2$	1	0,85	0,70	0,60	0,50	0,40
Хлористый натрий NaCl	1	0,80	0,60	0,50	0,45	0,35
Хлористое железо $FeCl_3$	1	0,88	0,77	0,69	0,62	0,53
Азотистокислый натрий (нитрит натрия) $NaNO_2$	1	0,84	0,69	0,58	0,49	0,39
Азотистокислый кальций (нитрит кальция) $Ca(NO_3)_2$	1	0,86	0,72	0,63	0,54	0,48