

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Строительные материалы и технология строительства»

ТЕХНОЛОГИЯ МОНОЛИТНОГО И ПРИОБЪЕКТНОГО
БЕТОНИРОВАНИЯ

Учебно-методическое пособие
для курсового проектирования, лабораторных
и практических занятий студентов специальности
1-70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2020

УДК 693.547.34(075.8)

ББК 38.626я7

Т38

Авторы:

Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович,

П. В. Рябчиков, Н. Н. Калиновская

Рецензенты:

зав. кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения»

ГУВПО «Белорусско-российский университет»,

д-р техн. наук, проф. *С. Д. Семенюк*;

директор Государственного предприятия «Институт жилища –

НИПТИС им. С. С. Атаева»,

д-р техн. наук, профессор *В. М. Пилипенко*

Т38 Технология монолитного и приобъектного бетонирования: учебно-методическое пособие для курсового проектирования, лабораторных и практических занятий студентов специальности 1-70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций» / Э. И. Батяновский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – 133 с.

ISBN 978-985-583-041-3.

В учебно-методическом пособии изложены задачи, решаемые студентами дневной и заочной форм обучения при выполнении практических и лабораторных занятий, а также при курсовом проектировании по учебной дисциплине «Технология монолитного и приобъектного бетонирования»; цель выполнения и основные теоретические положения разделов курса, отражаемых тематикой практических, лабораторных занятий и курсового проектирования; методическая последовательность выполнения, правила оформления результатов выполняемых работ.

Пособие предназначено для студентов специальности 1-70 01 01 «Производство строительных изделий и конструкций» и других строительных специальностей вузов, оно может быть полезным для инженерно-технических работников проектных и строительных организаций

УДК 693.547.34(075.8)

ББК 38.626я7

ISBN 978-985-583-041-3

© Белорусский национальный
технический университет, 2020

Введение

Производство бетонных работ в зимний период требует соблюдения ряда обязательных условий, связанных с необходимостью поддержания в бетонной смеси и твердеющем бетоне положительной температуры. Это наиболее сложный период для ведения бетонных работ, характеризующийся ростом энергетических затрат на их осуществление. Сведение к минимуму энергоемкости процесса бетонирования непосредственно связано с умением предварительно рассчитать и смоделировать наиболее рациональные условия ведения работ и параметры режимов транспортирования, укладки и твердения бетона. Для решения этих задач в процессе выполнения практических и лабораторных занятий, курсового (дипломного) проектирования по направлению дисциплины «Технология монолитного и приобъектного бетонирования» предназначено настоящее пособие.

Целью выполнения практических занятий является закрепление студентами учебного материала по данной дисциплине и приобретение ими навыков ведения технологических расчетов. В частности студенты осваивают практические расчеты по обеспечению транспортирования бетонных смесей в зимний период; созданию надлежащего температурного режима при различных видах (вариантах) твердения бетона для обеспечения роста его прочности и достижения расчетных физико-технических характеристик; по оценке применимости или выбору опалубок по критериям прочности и жесткости; режимам предварительного электроразогрева бетона на объекте перед укладкой в опалубку. Приобретенные навыки ведения расчетов студенты затем используют в процессе самостоятельной работы при курсовом проектировании по данному предмету и дипломном проектировании по соответствующей тематике.

При выполнении лабораторных работ целью является закрепление теоретических положений и приобретение студентами практических навыков по направлениям: определение физико-технических характеристик составляющих бетона; расчет состава бетона для перекачивания (подачи) нагнетательными методами; расчет трубопровода (бетоновода) для нагнетания бетона или раствора; регулирование свойств бетонной смеси и бетона химическими добавками; оценка технологических свойств бетонной смеси и физико-технических характеристик бетона. Овладение указанными навыками в сочета-

нии с приобретенными при выполнении заданий практических занятий по данной дисциплине обеспечит студенту требуемый уровень профессиональной подготовки для решения практических задач, сопровождающих строительство с применением монолитного цементного бетона.

Цель выполнения курсовой работы заключается в углубленном самостоятельном изучении и осмыслении студентом положений теоретического, практического и лабораторного курсов по изучаемой дисциплине, а также по курсам: «Общее бетоноведение», «Арматура и арматурные работы», «Бортоснастка и опалубочные работы», и применении приобретенных знаний в их практическом применении к разрабатываемому проекту.

Сущность проекта – технологическое обеспечение бетонных работ, включая задачи расчета состава бетона; приготовления, транспортирования, дополнительной обработки смеси на объекте; применения химических модификаторов свойств смеси и бетона; подачи и укладки смеси в опалубку; режимы твердения и контроль качества бетона, а также элементы расчета опалубки, ведения опалубочных и арматурных работ.

При выполнении курсовой работы следует учитывать, что решения технологических задач многовариантны, поэтому студент-проектировщик обязан обосновать выбор принятых в проекте решений соответствующим расчетом или сопоставлением их возможных вариантов. Предпочтение при этом следует отдавать технологическим и организационным приемам (технологическому или транспортному оборудованию, опалубкам и т. д.), обеспечивающим заданные физико-технические характеристики бетона (конструкции) при наименьших экономических затратах.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕДЕНИЯ БЕТОННЫХ РАБОТ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

1. Настоящие правила выполняются в период производства бетонных работ при ожидаемой среднесуточной температуре наружного воздуха ниже 5 °С и минимальной суточной температуре ниже 0 °С в соответствии с требованиями ТКП45-5.03-21-2006(02250).

Настоящее пособие содержит информацию по различным приемам зимнего бетонирования, применяемым в строительстве.

2. Выбор способа выдерживания бетона при зимнем бетонировании монолитных конструкций следует производить в соответствии с рекомендуемыми данными табл. 1.1.

Таблица 1.1

Вид конструкций	Минимальная температура воздуха, °С до	Способ бетонирования
1	2	3
1. Массивные бетонные и железобетонные фундаменты, блоки и плиты с модулем поверхности до 3	-15 -25	Термос Термос с применением ускорителей твердения бетона. Термос с применением противоморозных добавок*
2. Фундаменты под конструкции зданий и оборудования, массивные стены и т. п. с модулем поверхности 3...6	-15 -25	Термос, в том числе с применением противоморозных добавок и ускорителей твердения. Обогрев в греющей опалубке. Предварительный разогрев бетонной смеси. Периферийный электропрогрев
3. Колонны, балки, прогоны, элементы рамных конструкций, свайные ростверки, стены и перекрытия с модулем поверхности 6...10	-15 -25	Термос с применением противоморозных добавок*, обогрев в греющей опалубке, греющими проводами с применением ускорителей. Предварительный разогрев бетонной смеси, индукционный нагрев. См. п. 4

1	2	3
4. Полы, перегородки, плиты перекрытий, тонкостенные конструкции с модулем поверхности 10...20	-25	Обогрев в греющей опалубке, греющими проводами и термоактивными гибкими покрытиями (ТАГП) с применением противоморозных добавок и ускорителей твердения

* Противоморозные добавки, как правило, следует применять в комплексе с пластифицирующими.

3. Состояние основания, на которое укладывается бетонная смесь, а также температура основания и способ укладки должны исключать возможность замерзания смеси в зоне контакта с основанием. При выдерживании бетона в конструкции методом термоса, при предварительном разогреве бетонной смеси, а также при применении бетона с противоморозными добавками допускается укладывать смесь на неотогретое непучинистое основание (подготовку) или старый бетон, если по расчету в зоне контакта на протяжении расчетного периода выдерживания бетона не произойдет его замерзания. При невозможности соблюдения данного условия основание отогревают на глубину промерзания либо на 300 мм. Пучинистые основания отогревают во всех случаях на глубину промерзания, либо на 500 мм. При температуре воздуха ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ бетонирование густоармированных конструкций с арматурой диаметром больше 24 мм, арматурой из жестких прокатных профилей или с крупными металлическими закладными частями следует выполнять с предварительным отогревом металла до положительной температуры или местным вибрированием смеси в приарматурной и опалубочной зонах, за исключением случаев укладки предварительно разогретых бетонных смесей (при температуре смеси выше $45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Продолжительность вибрирования бетонной смеси должна быть увеличена не менее чем на 25 % по сравнению с летними условиями.

4. Перед укладкой бетонной (растворной) смеси поверхности полостей стыков сборных железобетонных элементов должны быть очищены от снега и наледи. Неопалубленные поверхности конст-

рукций следует укрывать паро- и теплоизоляционными материалами непосредственно по окончании бетонирования.

Выпуски арматуры забетонированных конструкций должны быть открыты или утеплены на высоту (длину) не менее чем 0,5 м.

5. Контроль прочности бетона следует осуществлять, как правило, испытанием образцов, изготовленных у места укладки бетонной смеси и твердевших в условиях, одинаковых с условиями твердения конструкции. Образцы, хранившиеся на морозе, перед испытанием надлежит выдерживать 2–4 ч при температуре 15–20 °С.

Допускается контроль прочности производить неразрушающими методами, а также по температуре бетона в процессе его выдерживания.

6. Требования к производству работ при отрицательных температурах воздуха установлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Параметр	Величина параметра	Контроль (метод, объем, вид регистрации)
1	2	3
<p>1. Прочность бетона монолитных и сборно-монолитных конструкций к моменту замерзания (критическая прочность):</p> <p>1.1. Для бетонов без противоморозных добавок:</p> <p>– конструкций, эксплуатирующихся внутри зданий, фундаментов под оборудование, не подвергающихся динамическим воздействиям, подземных конструкций;</p> <p>– конструкций, подвергающихся атмосферным воздействиям в процессе эксплуатации, для класса:</p> <p>С 8/10</p> <p>С 12/15...С 20/25</p> <p>С 25/30 и выше</p>	<p>Не менее 5 МПа</p> <p>Не менее, % проектной прочности:</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p>	<p>Измерительный по ГОСТ 18105, журнал работ</p>

Продолжение табл. 1.2

1	2	3
<p>– конструкций, подвергающихся по окончании выдерживания переменному замораживанию и оттаиванию в водонасыщенном состоянии или к бетону которых предъявляют требования по водонепроницаемости более W4;</p> <p>– в преднапряженных конструкциях.</p> <p>1.2. Для бетона с противоморозными добавками</p>	<p>70</p> <p>80</p> <p>К моменту охлаждения бетона до температуры, на которую рассчитано количество добавок, не менее 20 % проектной прочности</p>	
<p>2. Загружение конструкций расчетной нагрузкой допускается после достижения бетоном прочности</p>	<p>Не менее 100 % проектной</p>	
<p>3. Температура воды и бетонной смеси на выходе из смесителя, приготовленной:</p> <p>– на портландцементе, шлакопортландцементе, пуццолановом портландцементе марок ниже М600</p> <p>– на быстротвердеющем портландцементе и портландцементе марки М600 и выше</p> <p>– на глиноземистом портландцементе</p>	<p>Воды не более 70 °С, смеси не более 35 °С</p> <p>Воды не более 60 °С, смеси не более 30 °С</p> <p>Воды не более 40 °С, смеси не более 25 °С</p>	<p>Измерительный, 2 раза в смену, журнал работ</p>

Продолжение табл. 1.2

1	2	3
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
5. Температура в процессе выдерживания и тепловой обработки для бетона на: – портландцементе – шлакопортландцементе	Определяется расчетом, но не выше, °С: 80 90	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
6. Скорость подъема температуры при тепловой обработке бетона: – для конструкций с модулем поверхности: до 4 от 5 до 10 свыше 10 и скользящих опалубок – для стыков	Не более, °С/ч 5 10 15 20	Измерительный, через каждые 2 ч, журнал работ
7. Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки для конструкций с модулем поверхности: до 4 от 5 до 10 свыше 10	Определяется расчетом Не более 5 °С/ч Не более 10 °С/ч	Измерительный, журнал работ

1	2	3
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: от 2 до 5 свыше 5	Не более 20, 30, 40 °С Не более 30, 40, 50 °С	Измерительный, журнал работ

7. Температурный режим твердения бетона, а также температуру бетона конечную (к началу снятия опалубки) контролируют 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. 1.2 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 на паронепроницаемое укрытие с равнозначным коэффициентом теплопередачи, постепенно охлаждают бетон в соответствии с требованиями п. 7, табл. 1.2.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

2.1. Расчет опалубки по критериям прочности, жесткости и на опрокидывание

Производят поверочный расчет опалубки по критериям прочности, жесткости и на опрокидывание для разрабатываемого варианта возведения (устройства) монолитной конструкции; приводят эскизы расчетной схемы опалубки и расстояний свободного пролета палубы.

Методика поверочного расчета палубы опалубки

Максимальное удельное боковое давление бетонной смеси в статическом состоянии на опалубку

$$P_{\max}^{\text{уд.ст.}} = K_p \rho_{\text{б.с.}} g h_{\max}, \text{ Па}, \quad (2.1)$$

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

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

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

$$h_{\max} = \tau_{\text{сх}} V_{\text{бет}}, \text{ м}, \quad (2.2)$$

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

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

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

Для литой бетонной смеси, т. е. при максимальной величине бокового давления, K_p принимают по табл. 2.1.

Таблица 2.1

Вид материала	Значения h_{\max} , м						
	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8
Тяжелый бетон	0,99	0,98	0,97	0,93	0,86	0,76	0,64
Керамзитобетон	0,98	0,965	0,95	0,91	0,84	0,73	0,60

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

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

а при подаче смеси нагнетанием:

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

Расчет величины свободного пролета палубы по критерию прочности, осуществляют по формуле

$$l_{\text{пр}} = 1,3b_{\text{п}} \cdot \sqrt{R/P_{\max}^{\text{уд}}}, \text{ см,} \quad (2.3)$$

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

R – нормативное сопротивление материала, из которого выполнена палуба опалубки (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Вид материала палубы	Ст.3	Доска сосновая (ель)	Фанера	
			Рядовая	Высокопрочная
Значения R , МПа	210	18	22	50
Модуль упругости E , МПа	$21 \cdot 10^4$	10^4	$0,85 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$

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

$$l_{ж} = 1,71b_{п} \cdot \sqrt[3]{E/(P_{max}^{уд} \cdot 200)}, \text{ см}, \quad (2.4)$$

$$l_{ж} = 1,71b_{п} \cdot \sqrt[3]{E/(P_{max}^{уд} \cdot 400)}, \text{ см}, \quad (2.5)$$

где $b_{п}$ – толщина палубы, см;

E – модуль упругости материала палубы, МПа;

200, 400 – показатель прогиба.

Зависимость (2.4) относится к допускаемым наибольшим прогибам: $l = 1/200$; ее применяют к опалубкам для неотделяемых поверхностей.

Опалубки, предназначенные для возведения (устройства) отделяемых поверхностей (например, внутренних поверхностей стен зданий), рассчитывают по зависимости (2.5).

Выбор межосевого расстояния ребер жесткости палубы.

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

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

Расчет опалубки на устойчивость (опрокидывание).

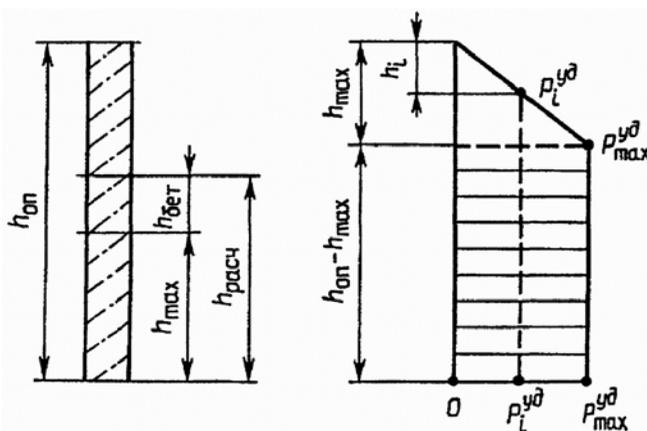


Рис. 2.1. Расчетная схема элемента опалубки при $h_{max} < b_{п}$

Расчетное усилие опрокидывания:

$$N_{\text{расч}} = P_{\text{max}}^{\text{уд}} \cdot b_{\text{зах}} \cdot h_{\text{расч}}, \text{ Н}, \quad (2.6)$$

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

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

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

$$h_{\text{расч}} = h_{\text{max}} + h_{\text{бет}}, \quad (2.7)$$

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

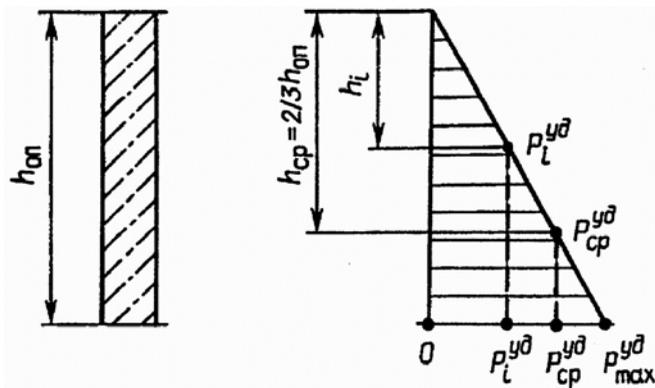


Рис. 2.2. Расчетная схема элемента опалубки при $h_{\text{max}} > b_{\text{п}}$

Расчетное усилие опрокидывания:

$$N_{\text{расч}} = P_{\text{ср}}^{\text{уд}} \cdot b_{\text{зах}} \cdot h_{\text{оп}}, \text{ Н}, \quad (2.8)$$

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

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

$$P_i^{уд} = K_{pi} \cdot \rho_{б.с.} \cdot g \cdot h_i, \text{ Па.} \quad (2.9)$$

Среднее расчетное удельное давление для опалубки высотой $h_{ср}$ из зависимости (2.9) с учетом динамических нагрузок (поправочный коэффициент принят: $K_d = 1,2$, для подачи бетонной смеси свободным падением, $K_d = 1,5$ для нагнетания) будет равно:

$$P_{ср}^{уд} = K_d \cdot K_{р.ср.} \cdot \rho_{б.с.} \cdot g \cdot h_{ср}, \text{ Па,} \quad (2.10)$$

где $K_{р.ср.}$ – коэффициент бокового давления для $h_{ср}$ (табл. 2.1);

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

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

2.2. Расчет температурного режима транспортирования и укладки бетонной смеси в зимний период

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

$$t_{см} = \frac{t_{б.н.} - t_{н.в.} \sum_{i=1}^n \Delta t_i}{1 - \sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \text{ } ^\circ\text{C,} \quad (2.11)$$

где $t_{б.н.}$ – температура бетонной смеси нормативная ($^\circ\text{C}$), 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;

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

$t_{0.н.} \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$ – в случаях подачи бетонной смеси в опалубку нагнетательными способами на момент ее выгрузки в приемное устройство нагнетающей установки;

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

$\sum_{i=1}^n \Delta t_i$, доли 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-, теплоизоляции поверхности забетонированной конструкции или до перегрузки смеси из транспортного средства в бункер для разогрева перед укладкой в опалубку, если используется предварительный разогрев бетона.

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

$$\Delta t_i = \Delta t'_i \cdot \tau_i, \text{ доли ед.,} \quad (2.12)$$

где $\Delta t'_i$ – относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения i -й операции за 1 минуту при разнице температур смеси и наружного воздуха в 1 $^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \cdot \text{мин}$), значения которого приведены в табл. 2.3;

τ_i – продолжительность i -й операции в минутах.

Для операции подачи бетонной смеси к месту укладки в опалубку значение $\Delta t'_i$ применяют в размерности: $^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \cdot \text{м}$, длины бетоновода или расстояния транспортирования; при выполнении финишных работ (отделка, гидро- и теплоизоляция и пр.) размерность $\Delta t'_i$ – в $^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2$.

Таблица 2.3

№ п/п	Наименование и условия выполнения операций	$\Delta t'_i$ °С/°С · мин
1	Загрузка (погрузка или перегрузка) смеси 1 раз	0,032
2	Транспортирование смеси: – самосвалами: до 2 м ³ до 3,2 м ³ – автобетоновозом с теплоизоляцией кузова (до 3,2 м ³) – автобадьевозом (до 1,6 м ³) – автобетономесителями: до 2,5 м ³ до 3,5 м ³ до 5 м ³ более 5 м ³ – то же в зимнем исполнении	 0,003 0,0025 0,00022 0,0009 0,0024 0,0019 0,0014 0,001 0,0004
3	Подача смеси к месту укладки в опалубку: – нагнетательные методы, по бетоноводу на 1 м длины без утепления с утеплением – в поворотных (неповоротных) бункерах (бадьях) кра- ном на высоту h , м (на каждый метр) – шахтным подъемником в утепленной шахте высотой h , м, на каждый метр	 0,003 0,001 0,0022 0,001
4	Укладка и уплотнение бетона в конструкцию с мини- мальным размером или толщиной слоя бетона, в м: 0,06 0,10 0,15 0,2 0,3 0,4 0,5 ≥ 0,6	 0,03 0,018 0,012 0,009 0,007 0,006 0,004 0,003
5	Отделка (заглаживание) и гидротеплоизоляция поверх- ности, на 1 м ² ; установка электродов после укладки бе- тона, за 1 мин	0,001
6	Подключение электродов, греющих проводов, намотка провода индуктора и его подключение после гидро-, теплоизоляции бетона, за 1 мин	0,0004

Методика расчета температуры бетонной смеси на выходе из смесителя

2.2.1. Разрабатывают пооперационный график ведения работ (операций) технологического цикла доставки бетонной смеси на объект и укладки в опалубку в форме табл. 2.4.

Таблица 2.4

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

В графы табл. 2.4 заносят названия операций в их технологической последовательности и известные исходные данные, которые затем дополняют справочными характеристиками принимаемого для выполнения работ оборудования (механизмов) и расчетными данными о продолжительности отдельных операций технологического цикла транспортирования и укладки бетонной смеси.

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

2.2.2.1. Время приготовления и загрузки бетонной смеси:

$$\tau_{пр} = V_{бет} / П_{мин}, \text{ мин}, \quad (2.13)$$

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

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

$$П_{мин} = V_{см} \cdot \beta \cdot n / 60, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (2.14)$$

где $V_{см}$ – объем смесителя на БСУ, m^3 ;

β – коэффициент выхода бетона, значение которого определяют при расчете состава бетона или принимают по табл. 2.5;

n – нормируемое (ОНТП-07-85) количество замесов бетоносмесителя в час с учетом конкретных условий приготовления бетона, принимают по табл. 2.5.

Таблица 2.5

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Норма по ОНТП-07-85, количество замесов
1	2	3	4
1	Расчетное количество замесов в час для приготовления на плотных заполнителях тяжелых бетонных и растворных смесей с автоматизированным дозированием составляющих: – бетонные смеси, изготавливаемые в смесителях принудительного действия (жесткие и подвижные); – бетонные смеси, изготавливаемые в смесителях гравитационного действия: а) при объеме готового замеса бетонной смеси 500 л и менее: – подвижностью 1–4 см – подвижностью 5–9 см – подвижностью 10 см и более б) при объеме готового замеса бетонной смеси более 500 л: – подвижностью 1–4 см – подвижностью 5–9 см – подвижностью 10 см и более – растворные смеси	замес –“- –“- –“- –“- –“- –“- –“-	35 25 27 30 20 22 25 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 – от 1400 до 1700 кг/м ³ – от 1000 до 1400 кг/м ³ – 1000 кг/м ³ и менее	замес –“- –“- –“-	20 17 15 13

1	2	3	4
3	Коэффициент (β) выхода смесей в плотном теле: – бетонных тяжелых и легких (только для конструкционного бетона) – легких (для конструкционно-теплоизоляционного бетона) – растворных	– – –	0,67 0,75 0,80

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

$$\tau_1 = \tau_{\text{выг}} \cdot n_{\text{зам}}, \text{ мин}, \quad (2.15)$$

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

$n_{\text{зам}}$ – количество замесов бетоносмесителя, необходимое для загрузки транспортного средства на 1 рейс, то есть: $n_{\text{зам}} = V_{\text{бет}}/V_{\text{см}} \cdot \beta$.

Время загрузки бетонной смеси в расчетах следует выделять из общих затрат времени на ее приготовление и выгрузку, так как при свободном падении через холодный воздух смесь наиболее интенсивно охлаждается (табл. 2.3; $\Delta t'_i = 0,032 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \cdot \text{мин}$).

Время, которое бетонная смесь будет накапливаться в транспортном средстве во время его нахождения на БСУ под погрузкой (за вычетом времени загрузки смеси), в расчетах следует суммировать со временем перевозки бетонной смеси для определения общих потерь ее температуры за этот период. Относительное снижение температуры бетонной смеси (t'_i) при этом принимают по п. 2 табл. 2.3. Таким же образом учитывают возможный период ожидания перед выгрузкой смеси на объекте.

2.2.2.3. Время транспортирования бетонной смеси:

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{L_{\text{тр}}}{V_{\text{сп}}} \cdot 60, \text{ мин}, \quad (2.16)$$

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

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

Суммарные затраты времени при погрузке, транспортированию и ожиданию выгрузки бетонной смеси определяют по зависимости

$$\tau_2 = \tau_{\text{пог}} + \tau_{\text{тр}} + \tau_{\text{ож}}, \text{ мин}, \quad (2.17)$$

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

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

$$\tau_3 = V_{\text{бет}} / V_{\text{выгр}}, \text{ мин}, \quad (2.18)$$

где $V_{\text{выгр}}$ – скорость выгрузки транспортных средств, может быть принята до 2,0 м³/мин, или определена синхронизированно, например, с производительностью используемого бетонососа.

2.2.2.5. Относительные потери температуры бетонной смесью при подаче ее в опалубку ($\Delta t_{\text{п}}$) определяют исходя из длины бетоновода (трубопровода), при использовании бетононасосов или пневмонагнетательных установок (агрегатов), либо с учетом расстояния (высоты) перемещения бункеров (бадней) кранами или подъемниками. Расчет ведут по зависимостям

$$\Delta t_4 = \Delta t'_{i\bar{o}} \cdot l_{\bar{o}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2.19)$$

$$\Delta t_4 = \Delta t'_{i\text{к}} \cdot H, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.20)$$

где $\Delta t'_{i\bar{o}}$ 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. 2.1 п. 3), $^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \cdot \text{м}$;

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

2.2.2.6. Время укладки и уплотнения бетона определяют по зависимости

$$\tau_5 = V_6 / \Pi, \text{ мин}, \quad (2.21)$$

где V_6 – объем (м^3) укладываемого в захватку (для массивов – в бетонируемый слой) бетона (при рекомендуемой высоте одновременно укладываемого слоя до 400 мм для смесей на заполнителях плотных горных пород и до 200 мм для смесей на пористых легких заполнителях и допустимой высоте слоя бетона не более $1,15 l_{\text{вibr.}}$, где $l_{\text{вibr.}}$ – длина вибровозбудителя глубинного вибратора);

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

Производительность определяют на основании необходимого времени вибрирования бетона, которое рассчитывают по формуле Ахвердова–Лукьянова (или иной, научно обоснованной зависимостью):

$$t_b = K_b \cdot \tau_0^6 (1 - V_{\text{р.с.}}), \text{ с}, \quad (2.22)$$

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

τ_0^6 – предельное напряжение сдвига бетонной смеси в Па, которое рассчитывают по данным подбора состава бетона. Его значение в расчетах может быть принято (при отсутствии расчетных данных) для бетонных смесей подвижностью марок П1–П4 в пределах 1500–500 Па соответственно.

$V_{\text{р.с.}}$ – объем (м^3) растворной составляющей в бетоне, равный

$$V_{\text{р.с.}} = 1 - V_{\text{щ}}^a \quad \text{или} \quad V_{\text{р.с.}} = 1 - \text{Щ} / \rho_{\text{щ}}^3,$$

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

При уплотнении укладываемого бетона с помощью навесных вибраторов производительность будет соответствовать объему слоя

бетона, отнесенному ко времени его распределения в опалубке и виброуплотнения.

Производительность работы с глубинным вибратором определяют по формуле

$$П = 2K_{исп} \cdot bRh \cdot \frac{60}{\tau_B + \tau_{пер}}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (2.23)$$

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

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

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

h – высота слоя уплотняемого бетона, м;

τ_B – минимально необходимое время вибрирования, мин;

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

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

2.2.2.7. 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

$$\Delta t_6 = \Delta t'_{\text{отд}} \cdot F + \Delta t'_{\text{у.э.}} \cdot \tau_{\text{у.э.}} + \Delta t'_{\text{под}} \cdot \tau_{\text{под}}, \quad (2.24)$$

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 гидро-, теплоизоляции открытой поверхности бетона, ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2$), и операции по установке электродов (табл. 2.3 п. 5), а также при выполнении операций после гидро-, теплоизоляции неопалубленной поверхности бетона (табл. 2.3 п. 6), $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}$;

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

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

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

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i \approx \Delta t'_1 \cdot \tau_1 + \Delta t'_2 \cdot \tau_2 + \Delta t'_3 \cdot \tau_3 + \Delta t_4 + \Delta t'_5 \cdot \tau_5 + \Delta t_6 \quad (2.25)$$

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

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i \approx \Delta t'_1 \cdot \tau_1 + \Delta t'_2 \cdot \tau_2 + \Delta t'_3 \cdot \tau_3, \quad (2.26)$$

где $\Delta t'_1$, $\Delta t'_2$, $\Delta t'_3$ и $\Delta t'_5$ – относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения операций по ее загрузке, транспортированию, выгрузке в бункер (бадью, приемное устройство) и укладке в опалубку соответственно (табл. 2.3), $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}$;

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

Δt_4 и Δt_6 – относительные потери температуры бетонной смеси при подаче ее в опалубку (п. 2.2.2.5) и при выполнении финишных работ (п. 2.2.2.7).

2.2.4. Определяют требуемую температуру бетонной смеси на выходе из смесителя по формуле (2.11) на основании полученного значения $\sum_{i=1}^n \Delta t_i$, принятой величине температуры бетона к началу прогрева или предварительного разогрева его перед укладкой в опалубку ($t_{\text{б.н.}}$), с учетом фактической (или расчетной) температуры наружного воздуха ($t_{\text{н.в.}}$).

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

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

2.3. Расчет температурного режима твердения бетона по методу горячего термоса

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

Определяющими параметрами для расчета режима термосного выдерживания бетона являются: критическая прочность бетона ($f_{\text{см, крит}}$, % от проектной); температура наружного воздуха ($t_{\text{н.в.}}$, °С); скорость ветра ($V_{\text{в}}$, м/с); температура бетона начальная ($t_{\text{б.н.}}$, °С); температура разогрева бетона ($t_{\text{раз}}$, °С); температура бетона средняя – за период твердения ($t_{\text{ср}}$, °С); температура бетона конечная, то есть к моменту распалубки ($t_{\text{б.к.}}$, °С); модуль теплоотдающей поверхности конструкции (например, при отогретом основании) или общий

($M_{п}, м^{-1}$); затраты теплоты на нагрев арматуры опалубки и основания, если не производят их отогрева перед укладкой бетона ($Q_{ар}, Q_{оп}, Q_{осн}, кДж$); коэффициент теплопередачи опалубки, неопалубленных поверхностей конструкции ($K_{т}, Вт/м^2 \cdot ^\circ C$); значение тепловыделения (экзотермии) цемента ($\mathcal{E}, кДж/кг$) и его содержание в $1 м^3$ бетона ($\Pi, кг$); время термосного выдерживания или естественного остывания бетона в опалубке ($\tau_{выд}, ч$).

Последовательность расчета режима термосного твердения бетона

2.3.1. Устанавливают расчетное значение критической прочности бетона, которое должно соответствовать требованиям проектно-технической документации к распалубочной прочности бетона бетонизируемой конструкции, либо данным табл. 1.2.

2.3.2. Определяют значение средней температуры бетона за расчетный период твердения $\tau_{выд}$, которое обеспечивает достижение требуемой критической прочности бетона, по данным табл. 2.6 или по фактически установленным зависимостям кинетики роста прочности бетона от средней температуры твердения для конкретных условий ведения работ (по данным строительной лаборатории строящей организации или профильных научно-исследовательских учреждений).

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

Таблица 2.6

Бетон	Возраст, сут.	Средняя температура бетона, $^\circ C$					
		0	5	10	20	30	40
Класс C12/15...C20/25 на ПЦ М400	1	5	9	12	23	35	45
	2	12	19	25	40	55	65
	3	18	27	37	50	65	77
	5	28	38	50	65	80	90
	7	35	48	58	75	90	100
	14	50	62	72	90	100	–
	28	65	77	85	100	–	–

Бетон	Возраст, сут.	Средняя температура бетона, °С					
		0	5	10	20	30	40
Класс С25/30 на ПЦ М500	1	8	12	18	28	40	55
	2	16	22	32	50	63	75
	3	22	32	45	60	74	85
	5	32	45	58	74	85	96
	7	40	55	66	82	92	100
	14	57	70	80	92	100	–
	28	70	80	90	100	–	–
Класс С30/37; С35/45 на ПЦ М600	1	8	13	21	32	45	59
	2	17	25	36	52	65	75
	3	23	35	45	62	75	85
	5	34	47	58	75	83	90
	7	42	57	68	85	90	100
	14	58	73	82	95	100	–
	28	71	83	92	100	–	–
Класс С12/15...С20/25 на ШПЦ М400	1	3	6	10	16	30	40
	2	8	12	18	30	40	60
	3	13	18	25	40	55	70
	5	20	27	35	55	65	85
	7	25	34	43	65	70	100
	14	35	50	60	80	96	–
	28	45	65	80	100	–	–
Аглопорито- бетон класса С12/15 на ПЦ М400	1	3	6	10	24	48	61
	2	11	13	26	50	65	76
	3	20	24	40	62	75	86
	7	37	45	53	80	91	97
	28	67	73	82	100	–	–
	Керамзитобетон класса С12/15 на ПЦ М400	1	3	5	10	25	50
2		9	14	24	50	63	75
3		18	23	37	63	73	85
7		35	48	58	80	91	97
28		65	79	63	100	–	–

2.3.3. Приведенные в табл. 2.6 среднестатистические данные нарастания прочности бетона классов С12/15–С35/45 могут быть использованы в расчетах, относящихся к бетону, полученному из низкопластичных смесей марок П1 и П2 (осадка стандартного конуса

в диапазоне 1–9 см по СТБ 1035-96) и приготовленных на цементе с содержанием C_3A не более 6 %, а также полученному из смесей марок по подвижности ПЗ–П5 (ОК от 10 до 21 см и более), если повышение удобоукладываемости смеси достигнуто за счет использования в бетоне исходного состава пластифицирующих добавок первой и второй групп по пособию П1-99 к СНиП 3.09.01 при одновременном снижении начального водосодержания в бетоне не менее, чем на 5 %.

В случае применения в бетоне добавок-ускорителей твердения: $CaCl_2$; Na_2SO_4 ; ПВК и других по П1-99 к СНиП 3.02.01, а также цемента, содержащего $C_3A \geq 7 \%$ или $C_3S + C_3A \geq 60 \%$, нарастание прочности бетона по табл. 2.6 принимают с поправочными коэффициентами, приведенными в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Возраст бетона, сут.	1	2	3	5	7	14	28
Значение коэффициента, учитывающего влияние добавок-ускорителей твердения	1,6	1,4	1,3	1,2	1,15	1,1	1,05
Значение коэффициента при использовании цемента, содержащего $C_3A \geq 7 \%$	1,2	1,15	1,1	1,08	1,07	1,06	1,05

В остальных случаях данные табл. 2.6 могут быть использованы для расчета ориентировочного режима твердения бетона по методу термоса с обязательной проверкой в строительной лаборатории его основных параметров: $t_{раз}$, ($t_{нач}$); $t_{б.к.}$, $t_{ср}$; $\tau_{ост}$ и прочности бетона к окончанию периода твердения, для конкретных условий ведения бетонных работ.

2.3.4. Рассчитывают температуру предварительного разогрева $t_{раз}$ бетонной смеси, которая обеспечивает принятую по п. 2.3.2 величину $t_{ср}$ за планируемый период твердения бетона $\tau_{ост}$, с учетом потерь температуры при укладке смеси в опалубку и конечной температуры бетона к моменту распалубки, по зависимости

$$t_{\text{раз}} = \frac{(t_{\text{ср}} - t_{\text{б.к.}}) \cdot (1,03 + 0,181M_{\text{п}})}{1 - 0,006 \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{б.к.}})} + t_{\text{укл}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.27)$$

где $M_{\text{п}}$ – модуль теплоотдающей поверхности бетонируемой конструкции, определяемый по п. 2.3.5;

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

$t_{\text{укл}}$ – потери температуры в $^\circ\text{C}$ при укладке бетонной смеси в опалубку, определяемые по п. 2.3.6.

2.3.5. Модуль теплоотдающей поверхности бетонируемой конструкции определяют, как отношение теплоотдающей в процессе твердения бетона площади поверхности конструкции ($F_{\text{т}}$, м^2) к объему бетона V , м^3 :

$$M_{\text{п}} = \frac{F_{\text{т}}}{V}, \text{ м}^{-1}. \quad (2.28)$$

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

В случае укладки бетона на неотогретое основание по формуле (2.28) определяют общий модуль бетонируемой конструкции, а тепловые потери бетона на нагрев основания учитывают по методике п. 2.3.7.

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

$$t_{\text{укл}} = \frac{|t_{\text{н.в.}}| \cdot \sum_{i=1}^n \Delta t_i}{1 - \sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.29)$$

где $|t_{\text{н.в.}}|$ – абсолютное значение температуры наружного воздуха, $^\circ\text{C}$;

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

Δt_i – потери температуры смеси при выполнении i -й операции технологического цикла в течение времени τ_i , определяемые по формуле (2.12) и данным табл. 2.3.

Продолжительность выполнения отдельных операций τ_i , мин, например, выгрузки бетонной смеси из транспортного средства или специализированного устройства для ее предварительного разогрева, подачи к месту укладки нагнетательными или иными способами, укладки в опалубку с уплотнением, заглаживания и гидро-, теплоизоляции поверхности свежееотформованного бетона и другими финишными работами, определяют на основании соответствующих норм времени или нормативов на выполнение этих работ и технических характеристик применяемого оборудования, по методике пп. 2.2.2.4–2.2.2.7 (п. 2.2).

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

$$t_{\text{раз}}' = \frac{C_b \cdot \rho_b \cdot V_b \cdot t_{\text{раз}} - C_{\text{ст}} \cdot m_{\text{ст}} \cdot V_b \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{н.в.}}) - Q_{\text{он}} - Q_{\text{осн}}}{C_b \cdot \rho_b \cdot V_b + C_{\text{ст}} \cdot m_{\text{ст}} \cdot V_b + \sum_{i=1}^n C_i \cdot F_i \cdot \delta_i \cdot \rho_i + C_{\text{осн}} \cdot \rho_{\text{осн}} \cdot V_{\text{осн}}}, \quad (2.30)$$

где C_b , $C_{\text{ст}}$, C_i , $C_{\text{осн}}$ – удельная теплоемкость свежееуложенного бетона ($C_b = 1,05$ кДж/(кг · °С)), стали, i -го слоя многослойной опалубки и материала основания, кДж/(кг · °С), по табл. 2.8;

ρ_b , V_b – средняя плотность бетона в кг/м³ и объем бетона, м³, в конструкции;

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

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

$Q_{\text{он}}$ – тепловые затраты на нагрев опалубки, кДж, по формуле

$$Q_{\text{он}} = (t_{\text{ср}} - t_{\text{н.в.}}) \sum_{i=1}^n C_i \cdot F_i \cdot \delta_i \cdot \rho_i, \quad \text{кДж}; \quad (2.31)$$

$Q_{\text{осн}}$ – тепловые затраты на отопление основания, по формуле

$$Q_{\text{осн}} = C_{\text{осн}} \cdot \rho_{\text{осн}} \cdot V_{\text{осн}} \cdot (t_{\text{от}} - t_{\text{н.в.}}), \text{ кДж}, \quad (2.32)$$

где $\rho_{\text{осн}}$ – средняя плотность материала основания, кг/м^3 , принимаемая по фактическим данным или из табл. 2.8;

$t_{\text{от}}$ – температура отопления основания, $t_{\text{от}} \geq 5 \text{ }^\circ\text{C}$;

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

$$V_{\text{осн}} = F_{\text{осн}} \cdot h_{\text{осн}}, \text{ м}^3, \quad (2.33)$$

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

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

Таблица 2.8

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

Продолжение табл. 2.8

№ п/п	Материал	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м ²	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии λ_0 , Вт/(м · °С)	Расчетная величина коэффициента теплопроводности λ_0 , Вт/(м · °С)	Удельная теплоемкость в сухом состоянии C_0 , кДж/(кг · °С)
8	Вата минеральная ($W_m = 5\%$)	100	0,04	0,49	0,76
		150	0,049	0,055	0,76
9	Плиты мягкие, полужесткие и жесткие минераловатные на синтетическом связующем ($W_m = 5\%$)	100	0,046	0,052	0,76
		175	0,051	0,06	0,76
10	Плиты мягкие и полужесткие минераловатные на битумном связующем ($W_m = 5\%$)	100	0,046	0,052	0,92
		200	0,058	0,067	0,92
		300	0,069	0,081	0,92
11	Маты минераловатные прошивные, МРТУ 7-19-68	100	0,044	0,048	0,76
		200	0,53	0,06	0,76
12	Маты минераловатные, рулонированные, на синтетическом связующем, ТУ 36-917-67 ММСС СССР ($W_m = 5\%$)	50	0,039	0,46	0,75
		75	0,043	0,049	0,76
13	Маты и полосы из стеклянного волокна ($W_m = 5\%$)	175	0,049	0,56	0,84
14	Хвойные породы (поперек волокон) ($W_m = 20\%$)	500	0,093	0,17	2,52
15	Лиственные породы (поперек волокон)	700	0,104	0,23	2,52
16	Фанера клеевая ($W_m = 13\%$)	600	0,116	0,17	2,52
17	Плиты древесноволокнистые и древесностружечные ($W_m = 12\%$)	1000	0,15	0,29	2,1
		600	0,104	0,16	2,1
		400	0,081	0,14	2,1
		200	0,058	0,08	2,1
18	Опилки	250	0,069	0,24	2,5
19	Оргалит	300	0,064	0,16	2,2
20	Пенопласт плиточный ($W_m = 10\%$)	74	0,041	0,043	1,34

№ п/п	Материал	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м ²	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии λ_0 , Вт/(м · °С)	Расчетная величина коэффициента теплопроводности λ_0 , Вт/(м · °С)	Удельная теплоемкость в сухом состоянии C_0 , кДж/(кг · °С)
21	Пенопласт плиточный ($W_m = 10\%$)	100	0,041	0,043	1,34
22	Пенопласт плиточный ($W_m = 5\%$)	150	0,46	0,49	1,34
		200	0,58	0,6	1,34
23	Мипора ($W_m = 30\%$)	15	0,041	0,052	1,34
24	Пенопласт плиточный ПХВ-1 ($W_m = 10\%$)	100	0,046	0,05	1,26
		125	0,058	0,62	1,26
25	Пенопласт плиточный ($W_m = 10\%$)	75	0,041	0,044	1,26
		125	0,046	0,05	1,26
26	Картон строительный многослойный «Энсонит»	650	0,12	0,17	1,34
27	Рубероид, пергамин кровельный, толь кровельный	600	0,17	0,17	1,47
28	Сталь	7800	58	–	0,48
29	Снег рыхлый, сухой	300	0,29	–	2,1
30	Лед	900	2,32	–	1,8
31	Песок (сухой)	1600–1800	1,98–2,44	1,98–2,44	0,84
32	Песчаное и гравелистое основание (мерзлое) при $W_m = 5–25\%$ при $W_m = 5–20\%$ при $W_m = 5–10\%$	1600	1,1–2,73	1,1–2,73	1,05–1,47
		1800	1,51–2,84	1,51–2,84	1,05–1,34
		2000	2,14–2,9	2,14–2,9	1,05–1,13
33	Супеси пылеватые (мерзлые) при $W_m = 5–30\%$ при $W_m = 5–20\%$	1600	0,87–1,97	0,87–1,97	1,05–1,55
		1800	0,99–1,97	0,99–1,97	1,05–1,34
34	Суглинки и глины (мерзлые) при $W_m = 5–30\%$ при $W_m = 5–20\%$	1600	0,64–1,86	0,64–1,86	1,05–1,55
		1800	0,75–1,8	0,75–1,8	1,05–1,34
35	Бетон (тяжелый) мерзлый	2400	1,6	1,9	1,05

Примечание. W_m – влажность материала по массе, соответствующая нормальным и влажностным условиям эксплуатации. Данные пунктов № 31–35 приведены для расчета затрат теплоты на отопление оснований. Промежуточные значения величин определяют интерполяцией.

2.3.8. Уточняют значение средней температуры бетона за период твердения, с учетом потерь температуры на нагрев арматуры, опалубки и отогрев основания, по зависимости

$$t_{\text{ср}}' = t_{\text{б.к.}} + \frac{t'_{\text{раз}} - t_{\text{б.к.}}}{1,03 + 0,181M_{\text{п}} + 0,006(t'_{\text{раз}} - t_{\text{б.к.}})}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.34)$$

По значению $t'_{\text{раз}}$ и данным табл. 2.6 и 2.7 (в случае применения добавок ускорителей твердения) оценивают изменение времени выдержки бетона в опалубке. Если понижение средней температуры при твердении бетона превышает 5 %, рекомендуется поднять температуру предварительного разогрева бетонной смеси до значения, определяемого по зависимости:

$$t_{\text{ув}} = t_{\text{раз}} + (t_{\text{раз}} - t'_{\text{раз}}), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.35)$$

2.3.9. Уточняют время остывания бетона в опалубке по формуле Скрамтаева–Миронова, в которой экзотермию (тепловыделение) цемента учитывают только в варианте холодного термоса, т. е. без предварительного разогрева бетонной смеси или прогрева бетона:

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{C_{\text{б}}\rho_{\text{б}} \cdot (t_{\text{раз}} - t_{\text{б.к.}}) + \text{Ц} \cdot \text{Э}}{3,6 \cdot K_{\text{т}} \cdot M_{\text{п}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{н.в.}})}, \text{ ч}, \quad (2.36)$$

где $t_{\text{раз}}$ и $t_{\text{ср}}$ – температура разогрева и средняя за период твердения в $^\circ\text{C}$, либо их скорректированные значения по пп. 2.5.3.7 и 2.5.3.8, если температуру разогрева смеси не увеличивали;

$C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость бетонной смеси, в расчетах принимается равной 1,05 кДж/(кг · $^\circ\text{C}$);

$\rho_{\text{б}}$ – средняя плотность бетона, кг/м³, принимаемая в соответствии с расчетом состава бетона или для тяжелого бетона – 2400 кг/см³;

Ц – содержание цемента в 1 м³ бетона, кг;

Э – тепловыделение 1 кг цемента при твердении бетона, кДж/кг, по данным табл. 2.9;

K_T – коэффициент теплопередачи используемой опалубки, Вт/(м² · °С) (табл. 2.10);

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

Должно соблюдаться условие $\tau_{ост} \geq \tau_{выд}$, то есть время остывания бетона, определенное по формуле (2.36), должно быть не менее планируемого периода выдержки бетона в опалубке, обеспечивающего для конкретных условий ведения работ достижение $f_{cm,кр}$ бетона.

Таблица 2.9

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение цемента*, кДж/кг, за время твердения, сут.							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портландцемент марки 400	5	–	–	29	63	109	188	209	251
	10	12	25	50	105	146	209	251	293
	20	42	67	105	167	209	272	314	335
	40	84	134	188	230	272	314	335	–
	60	130	188	230	272	314	335	–	–
Портландцемент марок 500 и 600	5	12	25	42	125	89	188	230	272
	10	25	42	63	105	167	251	293	314
	20	42	84	125	188	251	292	335	377
	40	105	167	209	272	293	356	377	–
	60	188	230	272	314	356	372	–	–
Шлакопортландцемент марки 300	5	–	12	25	42	63	126	161	188
	10	–	25	33	63	105	167	209	230
	20	–	33	62	125	147	209	251	272
	40	42	75	117	167	209	251	272	–
	60	63	105	147	207	230	272	–	–

* При применении в бетоне химических ускорителей твердения (1–1,5 % от массы цемента) вводят поправочный коэффициент: 1,3; 1,2; 1,15; 1,1 для 1, 2, 3 и 7 сут. соответственно.

2.3.10. Коэффициент теплопередачи опалубки бетонируемой конструкции, если его значения различаются для отдельных участков

опалубки и укрытия неопалубленных поверхностей, определяют по формуле

$$K_T = \frac{F_1 \cdot K_{T1} + F_2 \cdot K_{T2} + \dots + F_n \cdot K_{Tn}}{F_1 + F_2 + \dots + F_n}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}), \quad (2.37)$$

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

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

2.3.11. Уточняют соответствие полученных значений $\tau_{\text{ост(выд)}}$, $t_{\text{раз}}$, $t_{\text{ср}}$, обеспечению требуемой критической прочности бетона по условию $f_{cm, \text{факт}} \geq f_{cm, \text{кр}}$.

При этом используют данные табл. 2.6 и 2.7, либо фактические данные о кинетике роста прочности бетона строительной (профильной научно-исследовательской) лаборатории.

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

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

По формуле (2.38) определяют значение K'_T , которое обеспечивает в конкретных условиях ведения работ требуемую продолжительность остывания $\tau_{\text{ост}}$ и достижение $f_{cm, \text{кр}}$ бетона.

$$K'_T = \frac{C_b \cdot \rho_b (t_{\text{раз}} - t_{b.k.})}{3,6 M_{II} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{н.в.}) \cdot \tau_{\text{ост}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}). \quad (2.38)$$

В табл. 2.10 приведены данные о коэффициентах теплопередачи опалубок различной конструкции в зависимости от ее особенностей и скорости ветра.

Таблица 2.10

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

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

Из табл. 2.11 по заданному (принятому на основе метеопрогноза) значению скорости ветра принимают величину α_k – коэффициента теплопередачи у наружной поверхности опалубки (Вт/м² · °С).

Таблица 2.11

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

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

$$\delta_{\text{из}} = \lambda_{\text{из}} \left[\frac{1}{K'_T} - \left(\frac{1}{\alpha_k} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) \right], \text{ м}, \quad (2.39)$$

где $\lambda_{\text{из}}$, λ_i – расчетный коэффициент теплопроводности утеплителя, Вт/(м² · °С), и остальных слоев опалубки соответственно (табл. 2.8);

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

2.3.13. При предварительном разогреве бетонной смеси перед укладкой определяют затраты электрической энергии по методике п. 2.6.

2.3.14. В случае необходимости определяют коэффициент теплопередачи K'_T временного укрытия или опалубки (по фактическим данным ее палубы, утеплителя, защитного экрана), решив формулу (2.39) относительно K'_T :

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

2.4. Расчет параметров режима электродного прогрева бетона

2.4.1. Общие положения.

Сущность электропрогрева или электродного прогрева бетона, обладающего электрическим сопротивлением, заключается в пропускании через него переменного тока, в результате чего в объеме бетона выделяется теплота.

Бетон, как и бетонная смесь, обладает ионной проводимостью: проводящей фазой является вода с растворенными в ней (диссоциированными) ионами клинкерных минералов и веществ-электролитов. Удельное электрическое сопротивление бетонов на плотных заполнителях зависит от водорастворимых соединений в цементе, расхода цемента и воды на 1 м³ бетона. Оно составляет 4–20 Ом · м

для бетона на заполнителях из плотных горных пород, на пористых заполнителях – 6–25 Ом·м. С повышением температуры бетона удельное электрическое сопротивление уменьшается и через 3–5 ч достигает соответственно 3,5–13 Ом·м, в конце прогрева оно достигает 20–50 Ом·м.

Сильные электролиты, применяемые в качестве добавок в бетоны (ускоряющие твердение, противоморозные), как правило, дополнительно снижают его удельное электрическое сопротивление в 2 и более раз. При электрическом расчете электропрогрева в качестве расчетной величины используют полусумму значений начального и минимального удельного сопротивления бетона конкретного состава на определенном цементе. Приблизительно допускается принять значение расчетного удельного электрического сопротивления бетона на плотных заполнителях равным 8 Ом·м и на пористых – 10 Ом·м.

2.4.1.1. Для подведения напряжения к бетону применяются стальные электроды, основные типы которых представлены в табл. 2.12 и на рис. 2.3.

Обычно применяемое расстояние между электродами находится в пределах $b \sim 150\text{--}400$ мм. Оно уточняется и, при необходимости, корректируется расчетом величины удельной мощности $P_{уд}$ (Вт/м³), которую обеспечивает принятая схема их размещения. При этом должно соблюдаться условие: $P_{уд}$ не менее, чем $P_{под}$, где $P_{под}$ – максимальная мощность, необходимая при подъеме температуры прогреваемого бетона для конкретных условий ведения работ. Ее значение определяют по п. 2.4.2.

Таблица 2.12

Электроды и их назначение	Описание, способ установки	Область применения
Пластинчатые для сквозного прогрева	Стальная палуба щитов, кровельная сталь, закрепленная на деревянной палубе щитов; размеры соответствуют размерам щитов, расположение электродов на противоположных поверхностях конструкции	Конструкция толщиной до 300 мм (балки, прогоны, стены, перегородки, тоннели и т. п.)

Электроды и их назначение	Описание, способ установки	Область применения
Полосовые 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.)
С односторонним расположением	Расположены на одной плоскости конструкции	Конструкция толщиной до 300 мм (бетонные подготовки, полы, покрытия площадок, перекрытия и т. п.)
С двухсторонним расположением для сквозного прогрева	Размещены на двух противоположных плоскостях конструкции	Конструкции толщиной 150–500 мм (стены и т. п.)
С расположением на всех опалубочных плоскостях конструкций	Размещены на всех опалубочных щитах, при необходимости – на накладных	Конструкции толщиной 400 мм и более любых типов
Стержневые для сквозного прогрева	Круглая сталь диаметром 4–10 мм; электроды устанавливают (забивают) в бетон отдельно или в виде плоских электродных групп	Конструкции любых размеров и типов
Струнные для сквозного прогрева	Круглая сталь диаметром 4–16 мм; электроды устанавливают по оси конструкции или параллельно оси	Конструкции, длина которых значительно превышает размеры сечения (балки, прогоны, колонны и т. п.)

Удельная мощность $P_{уд}$ рассчитывается для схем расстановки электродов, приведенных на рис. 2.1, по следующим формулам

$$R_{уд} = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{B^2 \cdot R_6}, \text{ кВт/м}^3, \quad (2.40)$$

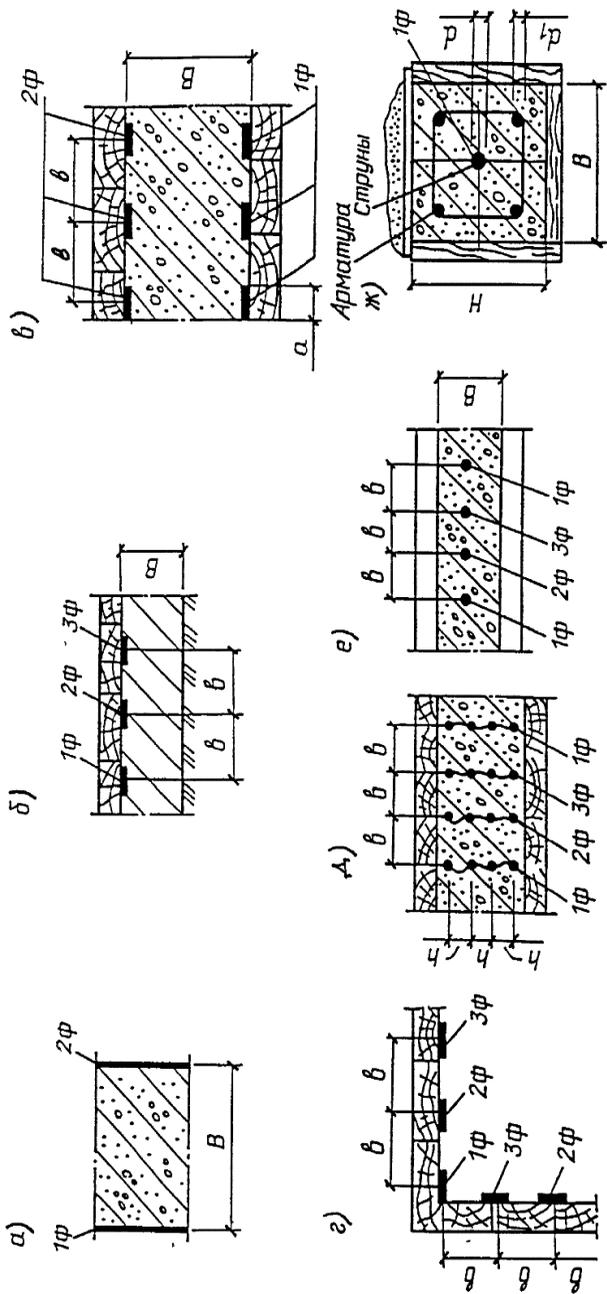


Рис. 2.3. Схема размещения электродов:

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

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

$$P_{уд} = \frac{1,57U^2 \cdot 10^{-3}}{R_6 \cdot \epsilon \cdot B \left(z \cdot \ln \frac{4B}{\pi a} + \frac{\pi \epsilon}{2B} \right)}, \text{ кВт/м}^3, \quad (2.41)$$

$$P_{уд} = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{R_6 \cdot B^2 \left(1 + \frac{a\epsilon}{\pi B} \cdot \ln \frac{\epsilon}{2a} \right)}, \text{ кВт/м}^3, \quad (2.42)$$

$$P_{уд} = \frac{3,14 \cdot U^2 \cdot 10^{-3}}{R_6 \cdot \epsilon \cdot h \left(z \cdot \ln \frac{h}{\pi d} + \frac{\pi \epsilon}{h} \right)}, \text{ кВт/м}^3, \quad (2.43)$$

$$P_{уд} = \frac{3,14 \cdot U^2 \cdot 10^{-3}}{R_6 \cdot B \cdot \epsilon \cdot \left(z \cdot \ln \frac{\epsilon}{\pi d} + \frac{\pi \epsilon}{B} \right)}, \text{ кВт/м}^3, \quad (2.44)$$

$$P_{уд} = \frac{6,28 \cdot U^2 \cdot 10^{-3}}{R_6 \cdot B^2 \ln \frac{2\epsilon}{d} \sqrt[4]{\frac{\epsilon}{2d_1}}}, \text{ кВт/м}^3, \quad (2.45)$$

где U – напряжение на электродах, В;

ϵ – расстояние между электродами, м;

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

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

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

a – ширина полосовых электродов, м;

d – диаметр стержневых и струнных электродов, м;

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

При схеме размещения стержневых электродов в шахматном порядке с шагом ϵ расчет $P_{уд}$ ведут по формуле (2.44) при $B = \epsilon$, м.

При схеме (2.45) для струнных электродов расчет $P_{уд}$ осуществляется при использовании арматуры в качестве электрода, подклю-

ченного к фазе Ф2. Если арматура не используется в качестве электрода, то расчет $P_{уд}$ ведут по той же формуле при d и d_1 – диаметрах струн, подключенных к разным фазам.

2.4.1.2. Использование арматуры в качестве электродов допускается при напряжении не более 85 В во избежание пересушивания пристержневых зон бетона и уменьшения его прочности и качества сцепления с арматурой. Рекомендуется использовать арматуру в качестве нулевой фазы, подключая ее к нулевому проводу. Если арматура не используется в качестве электрода, занулять или заземлять ее не рекомендуется во избежание неравномерности температурного поля и возрастания электрической мощности по сравнению с ее расчетным значением.

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

2.4.1.3. Для питания электропрогрева и других способов электрообработки применяют комплектные трансформаторные подстанции либо трехфазные понижающие трансформаторы, важнейшие характеристики некоторых из них приведены в табл. 2.13.

Таблица 2.13

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

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

Заданный температурный режим электротермообработки бетона поддерживают за счет изменения напряжения на электродах, переключая ступени вторичного напряжения понижающего трансформатора. С целью более точного выдерживания заданного температурного режима электротермообработки бетона, повышения его качества, снижения трудовых и энергетических затрат рекомендуется применять автоматическое регулирование напряжения в процессе тепловой обработки. При ручном режиме управления прогревом начальное напряжение, как правило, 85 В и более. Через 2–3 ч подъема температуры бетона (в зависимости от консистенции, температуры смеси, вида цемента и, особенно, наличия добавок-электролитов) его рекомендуется снижать, а затем через 2–5 ч прогрева снова повышать, вплоть до 100–120 В.

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

2.4.1.4. При электродном прогреве бетона с добавками ускорителями твердения в утепленных опалубках наиболее рационален режим, включающий нагрев бетона до температуры 40–60 °С (меньшее значение – для портландцемента 1-й группы эффективности при пропаривании, большее – для шлакопортландцемента), с последующим его термостатированием до снятия опалубки. В неутепленных опалубках этот режим прогрева может быть реализован в конструкциях с $M_n \leq 5 \text{ м}^{-1}$ при температуре наружного воздуха до –10 °С, либо $M_n \sim 8\text{--}10 \text{ м}^{-1}$ для $t_{н.в.} \leq -5 \text{ °С}$, если требуемая проч-

ность бетона к моменту распалубки через 12–14 ч после начала подвода энергии не превышает 50 % от проектной. В других случаях требуется изотермический прогрев, продолжительность которого определяется строительной лабораторией. Во всех случаях применения энергосберегающих технологий электродного прогрева на основе использования добавок-ускорителей твердения бетона режимы его разогрева и подвода энергии должны устанавливаться строительной лабораторией (или профильной научно-исследовательской) для конкретных материалов и условий ведения работ.

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

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

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

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

При использовании арматуры в качестве электродов к сеткам или пространственным каркасам приваривают 2–3 арматурных вы-

пуска и подключают их к соответствующей фазе понижающего трансформатора. При подаче напряжений на электроды и в процессе электропрогрева необходимо следить за состоянием проводов и контактов, в случае их перегрева (обгорания) отключить напряжение и устранить неисправность.

2.4.2. Расчет параметров электропрогрева бетона.

2.4.2.1. Определяют распалубочную прочность бетона $f_{cm, расп}$, которая должна быть не ниже критической прочности бетона по табл. 1.2 и ее значения, требуемого по проектно-технической документации производства работ.

2.4.2.2. Определяют температуру прогрева бетона $t_{п}$ °С, с учетом следующих основных факторов: вида применяемого цемента, модуля поверхности, наличия и доли неопалубленной поверхности, эксплуатационных требований к бетону, значения прочности бетона к окончанию прогрева и времени выдержки конструкции в опалубке (необходимого по условиям производства работ по табл. 2.14).

Рекомендуемые значения $t_{п}$ соответствуют: до 60°С для бетона на шлакопортландцементе, до 50 °С – на портландцементе третьей группы эффективности при пропаривании, до 45 и 40 °С, соответственно, для портландцемента второй и первой групп эффективности и также до 40 °С при наличии повышенных требований к бетону по эксплуатационным характеристикам (водонепроницаемость, морозостойкость, истираемость и др.), для бетона конструкций транспортных коммуникаций, а также предназначенных для эксплуатации в агрессивных средах.

2.4.2.3. Рассчитывают время подъема температуры ($\tau_{под}$, ч), приняв скорость подъема температуры бетона (V_t , °С/ч; см. табл. 1.2) в соответствии с требованиями технической документации (задания), по зависимости

$$\tau_{под} = \frac{t_{п} - t_{б.н.}}{V_t}, \text{ ч}, \quad (2.46)$$

где $t_{б.н.}$ – температура бетона к началу прогрева, °С, которая должна быть не ниже 0 °С. В случае электропрогрева бетона без предварительного разогрева смеси на объекте принимают $t_{б.н.} = 2-5$ °С и учи-

тывают это значение при расчете температуры бетонной смеси на выходе из смесителя предприятия-изготовителя по п. 2 настоящих указаний.

При предварительном разогреве бетонной смеси на объекте, с последующим электропрогревом бетона, принятое значение $t_{б.н.}$ используют для расчета температуры разогрева с учетом потерь при ее укладке по формуле

$$t_{раз} = t_{б.н.} + t_{укл}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.47)$$

где $t_{укл}$ – потери температуры при укладке бетонной смеси в опалубку, определяемые по формуле (2.29).

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 $5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{ч}$.

2.4.2.4. Определяют время изотермического прогрева бетона $\tau_{из}$ до приобретения им требуемой для распалубки прочности $f_{cm, расп}$ при расчетной температуре прогрева $t_{п}$ по данным табл. 2.14 или фактическим данным строительной (профильной научно-исследовательской) лаборатории. В табл. 2.14 приведены среднестатистические данные о росте прочности бетона в процентах от проектной в зависимости от марки цемента и температуры изотермического прогрева.

Таблица 2.14

Бетон	Время прогрева, ч	Прочность бетона в % от проектной при температуре изотермического прогрева, $^\circ\text{C}$				
		40	50	60	70	80
Класс C12/15...C20/25 на ПЦ М400	8	18	30	38	50	60
	16	33	44	55	66	75
	24	45	55	65	74	80
	48	68	75	80	–	–
	72	77	85	89	–	–
Класс C25/30... C35/45 на ПЦ М500; М600	8	25	35	45	60	70
	16	48	55	60	70	80
	24	55	65	70	80	–
	48	75	85	90	–	–
	72	85	92	98	–	–

Бетон	Время прогрева, ч	Прочность бетона в % от проектной при температуре изотермического прогрева, °С				
		40	50	60	70	80
Класс С12/15...С20/25 на ШПЦ М400	8	16	20	30	40	50
	16	30	35	50	60	70
	24	40	50	65	74	83
	48	60	75	90	100	–
	72	70	90	–	–	–

Примечание. Промежуточные значения определяют интерполяцией.

В случае применения в бетоне добавок-ускорителей твердения нарастание прочности бетона по табл. 2.14 принимают с поправочным коэффициентом, приведенным в табл. 2.15.

Таблица 2.15

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 и растут энергозатраты.

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

При определении $\tau_{\text{ост}}$ возможны два варианта: а) требуется ускоренный оборот опалубки; б) по условиям ведения работ допускается продолжительное остывание бетона вместе с опалубкой.

2.4.2.6. По варианту а) принимают скорость остывания бетона (см. табл. 1.2) $V_{\text{ост}}$ (°С/ч) и определяют время остывания по зависимости

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{расп}}}{V_{\text{ост}}}, \text{ ч}, \quad (2.48)$$

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

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

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

$$t_{\text{расп}} = t_{\text{н.в.}} + \Delta t, \text{ °С}, \quad (2.49)$$

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

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

$$\Delta t = \varepsilon_{\text{доп}} \left(128 + \frac{\beta \cdot M_{\text{п}}}{3 + 10\sqrt{V_{\text{max}}}} \right), \text{ °С} \quad (2.50)$$

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

$$\Delta t = \varepsilon_{\text{доп}} \left[128 + \beta \cdot M_{\text{п}} \left(1,16 \cdot R_{\text{из}} + \frac{1}{3 + 10\sqrt{V_{\text{max}}}} \right) \right], \text{ °С}, \quad (2.51)$$

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

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

V_{max} – максимальная скорость ветра на момент распалубки (ожидаемая по метеопрогнозу или не менее 7 м/с).

2.4.2.7. Для варианта б) рассчитывают время остывания бетона в опалубке по формуле (2.36) до температуры $t_{б.к.}$.

При этом в формулу (2.36) вместо $t_{раз}$ подставляют величину температуры прогрева бетона $t_{п.}$, а также предварительно рассчитывают значение ожидаемой средней за период остывания бетона температуры ($t_{ср.}$) по формуле

$$t_{ср.} = t_{б.к.} + \frac{t_{п.} - t_{б.к.}}{1,03 + 0,181 \cdot M_{п.} + 0,006(t_{п.} - t_{б.к.})}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.52)$$

2.4.2.8. Определяют общую продолжительность выдерживания бетона в опалубке по формуле

$$\tau_{выд.}^{общ} = \tau_{под} + \left(\tau_{из} - \frac{\tau_{под}}{4} - \frac{\tau_{ост}}{2} \right) + \tau_{ост}, \text{ ч.} \quad (2.53)$$

В случае, если принят режим медленного остывания бетона в опалубке (п. 2.4.2.7) после изотермического прогрева и второе слагаемое формулы (2.53) приобретает отрицательный знак или превращается в ноль, 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 разогреть бетон до температуры $t_{п.}$ и выдержки его в опалубке расчетное время $\tau_{ост}$, при общей продолжительности выдерживания бетона в опалубке:

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

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

$$\tau'_{из} = \tau_{из} - \frac{\tau_{под}}{4} - \frac{\tau_{ост}}{2}, \text{ ч.} \quad (2.54)$$

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

2.4.2.9. Определяют требуемую мощность на подъеме температуры по формуле

$$P_{\text{под}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot V_t}{3600} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{\text{оп}i} \cdot \rho_{\text{оп}i} \cdot \delta_{\text{оп}i} \cdot M_{\text{п}}}{3600} \cdot \frac{V_t}{2} + \frac{K_{\text{т}} \cdot M_{\text{п}} \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н.в.}})}{1000} - 0,8, \text{ кВт/м}^3, \quad (2.55)$$

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

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

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

V_t – скорость подъема температуры, °С/ч;

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

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

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

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

2.4.2.10. Определяют схему размещения электродов и удельную мощность ($P_{\text{уд}}$, кВт/м³), которую обеспечивает принимаемая схема по соответствующей формуле (2.40)–(2.45).

Должно соблюдаться условие, согласно которому $P_{\text{уд}} \geq P_{\text{под}}$, что подтверждает возможность принятой схемы размещения электродов обеспечить заданный режим разогрева бетона при планируемом вторичном напряжении на электродах, например, $U = 85$ В.

Если $P_{\text{уд}} < P_{\text{под}}$ рассчитывают значение удельной мощности с большим вторичным напряжением, в пределах, обеспечиваемых специализированным оборудованием (см. табл. 2.13), но не более 121 В. При необходимости уменьшают расстояние между электродами или изменяют схему их расстановки и способ прогрева.

2.4.2.11. Определяют требуемую мощность для поддержания температуры при прогреве по формуле

$$P_{\text{п}} = \frac{K_{\text{т}} \cdot M_{\text{п}} \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{н.в.}})}{1000}, \text{ кВт/м}^3. \quad (2.56)$$

2.4.2.12. Рассчитывают затраты электрической энергии на прогрев бетона захватки объемом $V_{\text{б}}$ (м^3) по формуле

$$P = P_{\text{под}} \cdot V_{\text{б}} \cdot \tau_{\text{под}} + P_{\text{п}} \cdot V_{\text{б}} \cdot \left(\tau_{\text{выд}} - \frac{\tau_{\text{под}}}{4} - \frac{\tau_{\text{ост}}}{2} \right), \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (2.57)$$

2.4.2.13. Выбирают станцию прогрева или определяют возможность применения имеющейся по критериям: $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}}$, $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{расч}}$, при $P_{\text{ном}}$ (кВА) и $I_{\text{ном}}$ (А), соответственно – мощность станции прогрева (понижающего трансформатора) и обеспечиваемая ей сила тока. Они должны быть не менее требуемой расчетной мощности $P_{\text{расч}}$ (кВА) и силы тока $I_{\text{расч}}$ (А) для прогрева бетона захватки объемом $V_{\text{б}}$, м^3 .

Расчетную мощность определяют по формуле

$$P_{\text{расч}} = \frac{P_{\text{под}} \cdot V_{\text{б}}}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot K_{\text{перегр}}}, \text{ кВА}, \quad (2.58)$$

где $P_{\text{под}}$ – мощность, затрачиваемая при подъеме температуры, кВт/м^3 , рассчитанная по формуле (2.55);

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

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

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

По формуле (2.58) можно посчитать объем бетона захватки, который может быть подключен к станции (трансформатору) с известной $P_{\text{ном}}$ (кВА), подставив ее величину вместо $P_{\text{расч}}$.

Расчетное значение требуемой силы тока на прогрев бетона захватки объемом $V_{\text{б}}$, м^3 , определяют по формуле

$$I_{\text{расч}} = \frac{1000P_{\text{под}} \cdot K \cdot V_6}{U}, \text{ А}, \quad (2.59)$$

где $P_{\text{под}}$ – мощность, затрачиваемая при подъеме температуры, кВт/м³ (по формуле (2.55));

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

V_6 – объем бетона захватки, м³;

U – напряжение на электродах, В.

2.5. Расчет параметров режима обогрева бетона греющими проводами

2.5.1. Общие положения.

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

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

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

Термоустойчивость последней ограничивает допускаемую температуру разогрева провода и, соответственно, температуру обогрева бетона (табл. 2.16).

Технические характеристики греющих (нагревательных) проводов

Марка	Технические условия или ГОСТ на изготовление	Количество и номинальный диаметр жилы, мм	Материал жилы	Материал изоляции	Номинальный диаметр провода, мм	Максимальная рабочая температура на воздухе при 20 °С	Электрическое сопротивление жилы при 20 °С, Ом/м
ПОСХВ	ТУ 16-505.524-73	1 × 1,1	Сталь	Поливинилхлоридный пластикат (ПВХ)	2,9	80	0,145
ПОСХП ПОСХВТ	ТУ 16-505.524-73	1 × 1,1 1 × 1,4	Сталь Сталь	Полиэтилен Модифицированный полиэтилен	3,4 2,3	60 105	0,145 0,100
ПНВСВ	ТУ 16-705.526-83	1 × 1,2	Сталь	ПВХ, лавсановая или фторопластовая лента, металлическая оплетка, трубка ПВХ	5,8	80	0,140
ПНСВ	ТУ 16.К71-013-88	1 × 1,2	Сталь	Поливинилхлоридный пластикат (ПВХ) или пропилен	2,8	80	0,140

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

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

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

2.5.2. Расчет режима обогрева бетона, длины и шага размещения проводов.

2.5.2.1. Определяют распалубочную прочность бетона, которая должна быть не ниже критической по действующим нормативам и по проектно-технической документации производства работ.

Дальнейший расчет режима обогрева бетона осуществляют с учетом следующих изменений.

Для обогрева бетона греющими проводами марки ПОСХП (материал изоляции – полиэтилен) допускаемая температура соответствует $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, рекомендуемая – до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, для других марок проводов по табл. 2.16 – до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Учитывая, что обогрев бетона греющими проводами инициирует миграцию влаги в объеме бетона и ее испарение, рекомендуемые значения температуры соответствуют:

– до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для конструкций со значительными площадями неопалубленных поверхностей (полы, перекрытия и т. п.), при наличии повышенных требований к бетону по эксплуатационным характеристикам (морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглоще-

ние, истираемость и др.), а также при обогреве периферийных слоев бетона массивных конструкций;

- 50 °С для разнообразных балок, ригелей, прогонов и т. п.;
- до 60 °С для колонн, стоек, опор и т. п.;
- до 70 °С для стеновых конструкций и т. п.

2.5.2.2. Определяют удельную электрическую мощность нагревателей $P_{уд}$, Вт, которая обеспечит требуемую мощность на подъеме температуры бетона $P_{под}$ по зависимости

$$P_{уд} = \frac{P_{под}}{F}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.60)$$

где $P_{под}$ – мощность, требуемая на подъеме температуры, Вт (формула (2.55));

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

2.5.2.3. Определяют расчетное расстояние e между витками провода (шаг витков) по зависимости

$$e = \frac{1}{\left(\frac{P_{уд}}{P} + 1 \right)}, \text{ м}, \quad (2.61)$$

где P – оптимальная линейная (погонная) электрическая нагрузка на провод (Вт/м); в расчетах ее назначают не более 35 Вт/м для железобетонных конструкций и не более 40 Вт/м для неармируемых конструкций, с учетом данных табл. 2.17 и допускаемой температуры нагрева провода по п. 2.5.2.1.

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

Таблица 2.17

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

2.5.2.3. Определяют рекомендуемую длину отдельного нагревателя l , м, по формуле

$$l = \sqrt{\frac{U^2}{P \cdot R_t}}, \text{ м}, \quad (2.62)$$

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

P – оптимальная погонная нагрузка, Вт/м;

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

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot t), \text{ Ом/м}, \quad (2.63)$$

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

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

Значения сопротивления нагретой жилы, в зависимости от принятого в расчете (или имеющегося в наличии) диаметра провода (сечения) и величины погонной электрической нагрузки приведены в табл. 2.18.

Таблица 2.18

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

2.5.2.4. Определяют общую требуемую длину греющего провода при шаге витков ν с учетом геометрических размеров конструкции в плоскостях расположения проводов, схемы их расположения и подключения к питающей сети.

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

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

При необходимости по зависимостям (2.61) и (2.62) и известным l , ν и U подбирают провод с соответствующим диаметром жилы.

2.5.2.5. Определяют требуемую мощность для поддержания температуры при изотермическом прогреве бетона по формуле (2.56), а затем по формуле (2.57) рассчитывают затраты электрической энергии на прогрев бетона захватки объемом V_6 (м^3) по установленному режиму (времени) подъема температуры и изотермической выдержки.

2.6. Расчет режима предварительного электронагрева бетонной смеси

2.6.1. Общие сведения.

Сущность способа заключается в быстром разогреве бетонной смеси вне опалубки путем пропуска через нее электрического

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

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

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

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

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

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

2.6.2. Электрооборудование для разогрева бетонной смеси.

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

Бункер (бадья) для электроразогрева состоит из корпуса, выполненного, как правило, из листовой стали толщиной не менее 4 мм, 3–6 пластинчатых электродов, токоподключающего устройства и затвора выгрузочного отверстия.

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

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

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

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

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

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

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

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

2.6.3. Расчет электрических и конструктивных параметров установок для электроразогрева бетонных смесей.

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

$$P = \frac{C \cdot \rho (t_p - t_{тр}) \cdot 1,16K \cdot 60V_6}{10^3 \cdot 4,18K_{эп} \tau_p}, \text{ кВт}, \quad (2.64)$$

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

ρ – объемная масса бетонной смеси, кг/м³;

t_p – конечная температура разогрева бетонной смеси, °С;

$t_{тр}$ – температура после транспортирования бетонной смеси (в расчетах соответствует значению $t_{6.н.}$ формулы (2.11)), °С;

V_6 – объем одновременно разогреваемой порции бетонной смеси, м³;

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

$K_{эп}$ – коэффициент использования электроэнергии при разогреве, равный 0,9;

τ_p – время разогрева бетонной смеси, мин.

Расстояние (при необходимости) между электродами B в метрах рассчитывается по формуле

$$B = 31,62 \cdot 10^{-3} U \sqrt{\frac{V_6}{R_{6.с.} \cdot P_{\max}}}, \text{ м}, \quad (2.65)$$

где U – напряжение на электродах, В;

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

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

Далее, варьируя продолжительностью разогрева смеси в пределах, указанных в п. 2.6.1, и напряжением на электродах: 380 или 220 В, можно подобрать требуемое расстояние между электродами, необходимое для равномерной загрузки фаз трансформатора.

Зная расстояние между электродами, определяют площадь одного электрода по формуле

$$S > \frac{V_6^2}{nB}, \text{ м}^2, \quad (2.66)$$

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

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

Размеры электродов вычисляются по формулам

$$H_{\text{эл}} = H - h_{\text{н}} - h_{\text{в}}, \text{ м}, \quad (2.67)$$

$$l_{\text{эл}} = \frac{S}{h_{\text{эл}}}, \text{ м}, \quad (2.68)$$

где H – высота бункера или кузова автосамосвала, м;

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

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

Максимальная электрическая мощность для разогрева бетонной смеси определяется по формуле

$$P_{\text{max}} = \frac{10^{-3} \cdot U^2 \cdot V_6}{B^2 \cdot R_{\text{min}}}, \text{ кВт}, \quad (2.69)$$

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

По величине P_{\max} определяется расчетная мощность потребного трансформатора

$$P_{\text{расч}} = \frac{P_{\max}}{\eta \cdot \cos\varphi \cdot K_{\text{к.п.}}}, \text{ кВт}, \quad (2.70)$$

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

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

Выбор типа трансформатора производится по расчетной мощности, соблюдая условие

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}}, \quad (2.71)$$

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

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

$$I_{\text{л}} = \frac{U \cdot V_6}{\sqrt{3R_{\min} \cdot B_{\text{эл}}^2}}, \text{ А}. \quad (2.72)$$

Затраты электрической энергии на разогрев порции бетонной смеси объемом V_6 (м³) определяют по формуле

$$P_{\text{н.р.}} = \frac{0,001K \cdot U^2 \cdot V_6 \tau_{\text{раз}}}{R_{\text{б.с.}} \cdot B^2 \cdot 60}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (2.73)$$

где U – напряжение тока (380 или 220 В);

V_6 – объем разогреваемого бетона, м³;

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

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

B – расстояние между электродами, м;

K – поправочный коэффициент, зависящий от разницы температур после и до разогрева бетонной смеси, дол. ед., принимаемый по табл. 2.19.

Таблица 2.19

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

Примечание. Промежуточные значения определяют интерполяцией.

Библиографический список

1. Бетонные работы при отрицательных температурах воздуха. Правила производства: ТКП45-5.03-21-2006(02250)
2. Хаютин, Ю. Г. Монолитный бетон / Ю. Г. Хаютин. – М.: Стройиздат, 1991. – 573 с.
3. Технология и методы зимнего монолитного бетонирования: учебное пособие / Э. И. Батяновский [и др.]. – Минск: БНТУ, 2005. – 238 с.
4. Справочник строителя. Бетонные и железобетонные работы / ред. В. Д. Топчия. – М.: Стройиздат, 1987. – 316 с.
5. Зимнее бетонирование и тепловая обработка бетона / С. А. Миронов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1975. – 248 с.
6. Совалов, И. Г. Бетонные и железобетонные работы / И. Г. Совалов, Я. Г. Могилевский, В. И. Остромогольский. – М.: Стройиздат, 1988. – 335 с.
7. Евдокимов, Н. И. Технология монолитного бетона и железобетона / Н. И. Евдокимов, А. Ф. Мацкевич, В. С. Сытник. – М.: Высшая школа, 1980. – 334 с.
8. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 213 с.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ

3.1. Определение физико-технических характеристик составляющих бетона

Цель работы: установление необходимых для расчета состава бетона характеристик цемента, крупного и мелкого заполнителей, воды, химических добавок.

3.1.1. Цемент. В соответствии с положениями ГОСТ 310.1-6 определяют необходимые для расчета состава бетона характеристики цемента, приведенные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики цемента

Активность (марка) $R_{ц}$, МПа	Коэффициент нормальной густоты $K_{нг}$, доли ед.	Плотность $\rho_{ц}$, кг/м ³	Плотность в рыхло-насыпном состоянии $\rho_{ц}^0$, кг/м ³

3.1.2. Мелкий заполнитель (песок). В соответствии с положениями ГОСТ 8736-93 определяют необходимые для расчета состава бетона стандартные характеристики песка и дополнительные его характеристики, приведенные в табл. 3.2.

Удельную поверхность ($S_{уд.п.}$), общую водопотребность ($B_{п}^{общ}$) и адсорбционную водопотребность ($B_{п}^{ад}$) песка рассчитывают по методике [1], используя следующие формулы и данные табл. 3.3.

$$S_{\text{уд.п.}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{ин}} \cdot S_{\text{ин}}^{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{т}; \quad (3.1)$$

$$B_{\text{п}}^{\text{общ}} = 0,1 \sum_{i=1}^n P_{\text{ин}} \cdot B_{\text{ин}}^{\text{общ}}, \text{ л/т}; \quad (3.2)$$

$$B_{\text{п}}^{\text{ад}} = 0,1 \sum_{i=1}^n P_{\text{ин}} \cdot B_{\text{ин}}^{\text{ад}}, \text{ л/т}, \quad (3.3)$$

где $P_{\text{ин}}$ – содержание в песке (%) i -й фракции (частный остаток этой фракции на соответствующем сите);

$S_{\text{ин}}^{\text{уд}}$, $S_{\text{уд.п.}}$, $B_{\text{ин}}^{\text{общ}}$, $B_{\text{ин}}^{\text{ад}}$ – удельная поверхность, удельное общее водопоглощение и удельное адсорбционное водопоглощение i -й фракции песка, принимаемые по данным табл. 3.3 [1].

Таблица 3.3

Физические свойства крупного и мелкого заполнителей
из плотных горных пород

Вид заполнителя	Размер фракции, мм	Удельная поверхность i -й фракции $S_i^{\text{уд}}$	Водопоглощение по массе, %		
			общее $B_i^{\text{общ}}$	поверхностью (адсорбцион- ное) $B_i^{\text{ад}}$	порами $B_i^{\text{пор}}$
Щебень гранитный	20...40	1,35	0,77	0,27	0,5
	10...20	2,7	0,92	0,5	0,42
	5...10	5,4	1,21	0,81	0,4
Щебень известняковый	20...40	1,41	1,38	0,283	1,1
	10...20	2,82	1,5	0,565	0,95
	5...10	5,4	1,6	0,8	0,8
Гравий	20...40	1,16	1,24	0,24	1,0
	10...20	2,31	1,38	0,48	0,9
	5...10	4,38	1,46	0,66	0,88
Песок (природный)	2,5...5	9,4	1,914	0,374	1,54
	1,25...2,5	20,2	2,07	0,81	1,26
	0,63...1,25	37,0	2,3	1,48	0,82
	0,315...0,63	72,0	3,46	2,88	0,58
	0,14...0,315	141,0	6,0	5,65	0,35
	0,14...0,088	293,0	12,01	17,7	0,31

3.1.3. Крупный заполнитель (щебень, гравий, щебень из гравия).

В соответствии с положениями ГОСТ 8263-93 определяют необходимые для расчета состава бетона стандартные характеристики крупного заполнителя и дополнительные его характеристики, приведенные в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Характеристики крупного заполнителя

Плотность, кг/м ³			Зерновой состав* (частные остатки в % на сите)					Удельная поверхность крупного заполнителя $S_{щ(г)}^{уд}$, м ² /т	Удельная общая водопотребность $B_{щ(г)}^{общ}$, л/т	Удельная адсорбционная водопотребность $B_{щ(г)}^{ад}$, л/т
в рыхлом состоянии $\rho_{щ(г)}^0$	в виброуплотненном состоянии $\rho_{щ(г)}^в$	зерен крупного заполнителя $\rho_{щ(г)}^з$	< 5	5–10	10–20	20–40	> 40			

* Номера сит (размеры ячеек) – по фактическим данным к расчету конкретного состава бетона.

Удельную поверхность ($S_{щ(г)}^{уд}$), удельную общую ($B_{щ(г)}^{общ}$) и адсорбционную ($B_{щ(г)}^{ад}$) водопотребность рассчитывают по методике [1], используя следующие формулы:

$$S_{щ(г)}^{уд} = \sum_{i=1}^n P_{iщ(г)} \cdot S_{iщ(г)}^{уд}, \text{ м}^2/\text{т}; \quad (3.4)$$

$$B_{щ(г)}^{общ} = 0,1 \sum_{i=1}^n P_{iщ(г)} \cdot B_{iщ(г)}^{общ}, \text{ л/т}; \quad (3.5)$$

$$B_{щ(г)}^{ад} = 0,1 \sum_{i=1}^n P_{iщ(г)} \cdot B_{iщ(г)}^{ад}, \text{ л/т}, \quad (3.6)$$

где $P_{iщ(г)}$ – содержание в крупном заполнителе (%) i -й фракции (частный остаток этой фракции на соответствующем сите);

$S_{щ(г)}^{уд}$, $S_{iщ(г)}^{уд}$, $B_{iщ(г)}^{общ}$ и $B_{iщ(г)}^{ад}$ – удельная поверхность, удельное общее водопоглощение и удельное адсорбционное водопоглощение i -й фракции крупного заполнителя, принимаемые по данным табл. 3.3 [1].

3.1.4. *Вода для бетона. Технические требования.* В соответствии с СТБ 1114-98 к воде для приготовления бетонных и растворных смесей, поливки бетона и промывки заполнителей предъявляются следующие требования.

3.1.4.1. Вода не должна содержать химических соединений и примесей в количестве, которое может влиять на сроки схватывания цементного теста, скорость твердения, прочность, морозостойкость и водонепроницаемость бетона, коррозию арматуры в пределах, превышающих нормы, указанные в п. 3.1.4.4.

3.1.4.2. Для приготовления бетонных и растворных смесей, поливки бетона и промывки заполнителей не допускается применение сточной, болотной и торфяной воды.

3.1.4.3. Содержание в воде растворимых солей, сульфатов, хлоридов и взвешенных частиц в зависимости от ее назначения не должно превышать величин, указанных в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Наименование воды	Предельное содержание, мг/л			
	Растворимых солей	Сульфат ионов (SO_4^{-2})	Хлорид ионов (Cl^{-1})	Взвешенных частиц
1. Для затворения бетонной смеси при изготовлении предварительно напряженных железобетонных конструкций и нагнетаемого раствора	3000	2000	600	200
2. Для затворения бетонной смеси при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций с ненапрягаемой арматурой, а также строительных штукатурных растворов и растворов для армированной каменной кладки	5000	2000	2000	200

Окончание табл. 3.5

Наименование воды	Предельное содержание, мг/л			
	Растворимых солей	Сульфат ионов (SO_4^{-2})	Хлорид ионов (Cl^{-1})	Взвешенных частиц
3. Для затворения бетонной смеси при изготовлении бетонных неармированных конструкций, к которым не предъявляются требования по ограничению образования высолов, а также строительных растворов для неармированной каменной кладки	10000	2000	4500	300
4. Для промывки заполнителей, включая мокрую сортировку и охлаждение заполнителей	5000	2700	2000	500
5. Для поливки рабочих швов при перерывах в бетонировании конструкций, поверхностей стыков, подлежащих омоноличиванию, и поверхностей водосбросных конструкций, а также для трубного охлаждения массива бетона	3000	2000	600	200
6. Для поливки наружных поверхностей бетонных и железобетонных конструкций	5000	2700	2000	500
7. Для поливки наружных поверхностей бетонных конструкций (исключая поверхности водосбросных сооружений), если на поверхности может быть допущено появление выцветов и высолов	35000	2700	20000	500

Примечание. Вода для затворения бетонной смеси с применением глиноземистого и гипсоглиноземистого цементов должна удовлетворять требованиям пункта 1 настоящей таблицы.

3.1.4.4. Вода, удовлетворяющая требованиям таблицы, в которой содержится нитратов, сульфидов, сахара, полифосфатов и цинка, каждого более чем, соответственно, 500, 100, 100, 100 мг/л, признается пригодной, если сроки схватывания цементного теста изменяются не более чем на 25 %, прочность бетона после 7 и 28 дней

нормально-влажностного твердения, а также морозостойкость и водонепроницаемость снижаются не более чем на 10 %, а арматурная сталь в бетоне находится в устойчивом пассивном состоянии.

3.1.4.5. Общее содержание в воде ионов (Na^+) и калия (K^+) в составе растворимых солей должно быть не более 1000 мг/л.

3.1.4.6. Допускается к применению вода при наличии на поверхности следов нефтепродуктов, масел и жиров.

3.1.4.7. Водородный показатель воды (рН) должен быть не менее 4 и не более 12,5.

3.1.4.8. Окисляемость воды должна быть не более 15 мг/л.

3.1.4.9. Допускается к применению вода при интенсивности запаха не более 2 баллов.

3.1.4.10. Окраска воды должна находиться в пределах от бесцветной до желтоватой с цветностью не выше 70° по ГОСТ 3351. Если к бетону предъявляются требования технической эстетики, цветность воды не должна превышать 30°.

Допускается в отдельных случаях использование воды с цветностью более 70°. При этом ее пригодность должна быть установлена определением физико-технических свойств бетонной смеси и бетона, указанных в п. 3.1.4.4.

3.1.4.11. Вода, содержащая пенообразующие вещества, пригодна для применения при стойкости пены не более 2 мин. Допускается применение воды с устойчивостью пены, равной 2 и более минут при условии определения пригодности воды сравнительными испытаниями физико-технических свойств бетонной смеси и бетона, указанных в 3.1.4.4.

3.1.4.12. В местах водозабора (при первичном контроле качества воды) содержание грубодисперсных примесей в воде должно быть не более 4 % по объему.

3.1.5. *Химические добавки в бетон.* Применение химических добавок с целью модификации технологических свойств бетонных смесей и физико-технических характеристик затвердевшего бетона осуществляется на территории Беларуси в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

- СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии;
- СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции;
- Пособие ПП-99 к СНиП 3.09.01-85 Применение добавок в бетоне.

Информация о правилах применения химических добавок в бетон с различным целевым назначением приведена в Пособии П1-99 к СНиП 3.09.01-85.

3.2. Расчет состава тяжелого бетона, транспортируемого по трубам методом нагнетания

Цель работы: приобретение навыков расчета состава бетона для подачи его нагнетательными методами.

Общие требования и рекомендации. Методика расчета состава бетона базируется на основных положениях метода расчета его состава с учетом структурных и технологических особенностей данного материала, разработанного профессором И. Н. Ахвердовым [1].

Рекомендуемые характеристики бетонной смеси и материалов:

- удобоукладываемость (формуемость) смеси: 4–16 см, при оптимальной $OK_{opt} \sim 6-8$ см;
- крупность максимального зерна заполнителя должны быть не более $1/3$ внутреннего диаметра бетоновода;
- рекомендуемое содержание лещадных зерен в крупном заполнителе до 10 %;
- рекомендуемое объемное содержание крупного заполнителя из плотных горных пород в 1 м^3 бетонной смеси приведено в табл. 3.6;
- рекомендуется применять пески с $M_k \sim 1,6-1,8$ (мелкозернистые) при содержании (частных остатках) фракции $< 0,14\text{ мм} \sim 3-7\%$ и суммарно фракции $0,14-0,315\text{ мм} \sim 15-20\%$;
- допускается применение пластифицирующих химических добавок, не вызывающих расслоение бетонной смеси;
- рекомендуется введение химических и минеральных добавок, снижающих расслоение бетонной смеси.

Таблица 3.6

Объемное содержание крупного заполнителя

Крупность заполнителя, мм	Модуль крупности песка M_k , доли ед.					
	1,4	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8
До 10	0,55	0,52	0,48	0,45	0,42	0,4
До 20	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54
До 40	0,76	0,74	0,72	0,70	0,67	0,65

Методика расчета состава бетона

3.2.1. *Определяют расчетную прочность бетона на сжатие** (f_c) по заданному значению нормативной гарантированной прочности (классу бетона) из зависимости

$$f_{c,cube}^G = (1 - 1,64V_m) f_{c,28}, \text{ МПа}, \quad (3.7)$$

по формуле

$$f_{c,28} = \frac{f_{c,cube}^G}{1 - 1,64 \cdot V_m}, \text{ МПа}, \quad (3.8)$$

где V_m – коэффициент вариации прочности бетона; при отсутствии фактических данных значений V_m его принимают равным 0,135 (по ГОСТ 18105-86).

Тогда формула (3.8) имеет вид

$$f_{c,28} = \frac{f_{c,cube}^G}{0,7786}, \text{ МПа}. \quad (3.9)$$

3.2.2. *Определяют требуемую удобоукладываемость* (формуемость) бетонной смеси с учетом транспортирования и подачи ее в опалубку по зависимости

$$OK_{тр} = OK_{укл} \cdot K_{тр} \cdot K_{п}, \text{ см}, \quad (3.10)$$

где $OK_{укл}$ – формуемость бетонной смеси, требуемая по условиям укладки (подачи) в опалубку;

$K_{тр}$ – коэффициент, учитывающий условия транспортирования и особенности состава бетона и свойств цемента (табл. 3.7);

$K_{п}$ – коэффициент, учитывающий условия подачи бетонной смеси в опалубку (табл. 3.8).

* Здесь и далее в тексте – прочность бетона на сжатие, если нет конкретизации вида разрушающего воздействия на бетон (растяжение, срез и пр.)

Таблица 3.7

Значения коэффициента $K_{тр}$ для бетона на плотных заполнителях

Бетонная смесь	ОК ₀ , см	Продолжительность транспортирования, мин					
		60		90		120	
		при температуре смеси, °С					
		10–20	25–30	10–20	25–30	10–20	25–30
Без добавок	6–12	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1,03}$	$\frac{1,03}{1,08}$	$\frac{1,08}{1,1}$	$\frac{1,12}{1,25}$	$\frac{1,2}{1,25}$
С добавкой «С-3» и другими суперпластификаторами	6–12	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,03}{1,05}$	$\frac{1,05}{1,1}$	$\frac{1,1}{1,15}$	$\frac{1,15}{1,25}$	$\frac{1,25}{-}$
То же	≥ 21	$\frac{1,05}{1,08}$	$\frac{1,1}{1,15}$	$\frac{1,15}{1,2}$	$\frac{1,25}{1,3}$	$\frac{1,25}{-}$	$\frac{-}{-}$

Примечание. Над чертой даны значения коэффициентов для портландцемента марок 400–500 с содержанием С₃А до 5 %, под чертой – с содержанием С₃А 6–8 % при расходе цемента 320–420 кг/м³.

Таблица 3.8

Значения коэффициента K_n для бетона на плотных заполнителях

Бетонная смесь	ОК ₀ , см	Подача по схеме «кран-бадья» и др.		Подача нагнетанием при давлении перекачивания, МПа			
				до 1		свыше 1	
		Температура воздуха, °С					
		до 20	свыше 20	до 20	свыше 20	до 20	свыше 20
Без добавок	6–12	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,03}{1,05}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,03}{1,08}$	$\frac{1,08}{1,12}$	$\frac{1,1}{1,15}$
С добавкой «С-3» и другими суперпластификаторами	6–12	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,05}{1,1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,05}{1,1}$	$\frac{1,1}{1,15}$	$\frac{1,2}{1,25}$
	≥ 21	$\frac{1,05}{1,1}$	$\frac{1,1}{1,15}$	$\frac{1,05}{1,08}$	$\frac{1,1}{1,15}$	$\frac{1,1}{1,15}$	$\frac{1,2}{1,25}$

Примечание. По табл. 3.7.

3.2.3. *Определение оптимального соотношения мелкого и крупного заполнителей и пустотности их смеси.*

3.2.3.1. По данным табл. 3.6 и характеристикам песка определяют объемное содержание щебня в 1 м³ смеси заполнителей ($V_{щ}$), предварительно рассчитав модуль крупности песка по зависимости

$$M_k = \sum_{i=1}^n A_i / 100, \quad (3.11)$$

где A_i – полные остатки (в %) на ситах стандартного набора ($A_{0,14}-A_{2,5}$) без учета фракции менее 0,14 мм.

3.2.3.2. Рассчитывают содержание щебня по массе:

$$\text{Щ} = V_o \cdot \rho_{щ}^B, \text{ кг}, \quad (3.12)$$

где $\rho_{щ}^B$ – средняя плотность щебня в виброуплотненном состоянии, кг/м³.

3.2.3.3. Определяют содержание песка в смеси заполнителей по объему:

$$V_{п} = 1 - \frac{\text{Щ}}{\rho_{щ}^3}, \text{ м}^3, \quad (3.13)$$

а затем по массе:

$$\text{П} = V_{п} \cdot \rho_{п}^B, \text{ кг}, \quad (3.14)$$

где $\rho_{щ}^3$ – плотность зерен щебня, кг/м³;

$\rho_{п}^B$ – средняя плотность песка в виброуплотненном состоянии, кг/м³.

3.2.3.4. Рассчитывают пустотность смеси заполнителей из зависимости

$$\text{П}_{см} = V_{п} \cdot \text{П}_{п}^B, \text{ м}^3, \quad (3.15)$$

где $\text{П}_{п}^B$ – пустотность песка в виброуплотненном состоянии (доли ед.).

3.2.4. Определяют суммарную поверхность заполнителей $S_{см}$ при значениях расхода щебня (Щ) и песка (П), выраженных в тоннах,

$$S_{см} = S_{уд.п} \cdot П + S_{уд.щ} \cdot Щ, м^2. \quad (3.16)$$

3.2.5. Определяют объем цементного теста по формуле

$$V_T = \frac{П_{см} + \delta \cdot S_{см}}{1 + \delta \cdot S_{см}}, м^3, \quad (3.17)$$

где δ – усредненная толщина слоя цементного теста на поверхности зерен заполнителей, м (табл. 3.9).

Таблица 3.9

Значения δ для бетонных смесей подвижностью ОК ~ 4–16 см, перекачиваемых по трубам

S смеси, м ²	< 6000	8000	10000	12000	> 12000
Значения δ , м·10 ⁻⁶	22–46	20–44	18–42	16–40	14–38

Примечание. Промежуточные значения δ определяют интерполяцией.

3.2.6. Определяют величину выхода бетона (V_6) по объему с учетом «раздвижки» зерен заполнителя пленкой цементного теста по зависимости

$$V_6 = 1 + \delta \cdot S_{см}, м^3. \quad (3.18)$$

3.2.7. Уточнение содержания заполнителей в бетонной смеси.

3.2.7.1. Содержание (расход) щебня и песка по массе:

$$Щ' = \frac{Щ}{V_6}, кг, \quad (3.19)$$

$$П' = \frac{П}{V_6}, кг. \quad (3.20)$$

3.2.7.2. Содержание (расход) щебня и песка по объему:

$$V'_{\text{щ}} = \frac{\Pi'_{\text{в}}}{\rho_{\text{щ}}}, \text{ м}^3, \quad (3.21)$$

$$V'_{\text{п}} = \frac{\Pi'_{\text{в}}}{\rho_{\text{п}}}, \text{ м}^3. \quad (3.22)$$

3.2.8. Определение водопотребности заполнителей.

3.2.8.1. Общую водопотребность заполнителей (V_3) щебня и песка рассчитывают по формуле

$$V_3 = V_{\text{общ.щ}}^{\text{уд}} \cdot \Pi' + V_{\text{общ.п}}^{\text{уд}} \cdot \Pi', \text{ л}, \quad (3.23)$$

где $V_{\text{общ.щ}}^{\text{уд}}$ и $V_{\text{общ.п}}^{\text{уд}}$ – удельная водопотребность щебня и песка (л/т), соответственно, определенные в лабораторной работе № 1;

Π' и Π' – уточненное содержание щебня и песка в тоннах.

3.2.8.2. Адсорбционную водопотребность ($V_{\text{ад}}$) щебня и песка рассчитывают по формуле

$$V_{\text{ад}} = V_{\text{ад.щ}}^{\text{уд}} \cdot \Pi' + V_{\text{ад.п}}^{\text{уд}} \cdot \Pi', \text{ л}, \quad (3.24)$$

где $V_{\text{ад.щ}}^{\text{уд}}$ и $V_{\text{ад.п}}^{\text{уд}}$ – удельная адсорбционная водопотребность щебня и песка (л/т), соответственно, определенные в лабораторной работе № 1.

3.2.9. Определяют водоцементное отношение бетона по формуле

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_6 = \frac{\alpha \cdot K_3 \cdot R_{\text{ц}}}{f_{\text{с},28}} + \beta, \quad (3.25)$$

где $\alpha = 0,28$ и $\beta = 0,105$ – коэффициенты для бетона, перекачиваемого под давлением бетононасосами (пневмонагнетателями);

K_3 – коэффициент качества крупного заполнителя, равный для щебня гранитного $K_3 = 1,1$; для гравия – 1,0; для щебня из гравия – 1,05;

$R_{\text{ц}}$ – активность цемента, МПа;

$f_{\text{с},28}$ – расчетная прочность бетона, МПа.

3.2.10. Определяют расход цемента по формуле

$$\Pi = \frac{1000 \cdot V_T}{\frac{1000}{\rho_{\Pi}} + (B/\Pi)_{\delta}}, \text{ кг}, \quad (3.26)$$

где ρ_{Π} – плотность цемента, (кг/м³);

3.2.11. Определяют относительное водосодержание цементного теста (для расчета величины осадки стандартного конуса) по формуле

$$X' = \frac{(B/\Pi)_{\delta} - \frac{B_{ад}}{\Pi}}{K_{нт}}, \quad (3.27)$$

где $K_{нт}$ – коэффициент нормальной густоты цемента, доли ед.

3.2.12. Определяют расчетное значение осадки стандартного конуса из выражения

$$OK = 20 \cdot \frac{V'_{\Pi}}{V'_{\Pi} + V'_{\Pi\Pi}} \cdot \rho_{см} \cdot V_T \frac{X' - 0,876}{0,774}, \text{ см}, \quad (3.28)$$

где $\rho_{см}$ – средняя плотность бетонной смеси, т/м³.

3.2.13. Определяют уточненный выход бетона из зависимости

$$V_{\delta} = \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{\Pi'}{\rho_{\Pi}^3} + \frac{\Pi\Pi'}{\rho_{\Pi\Pi}^3} + \frac{\Pi \cdot (B/\Pi)_{\delta}}{1000}, \text{ м}^3. \quad (3.29)$$

3.2.14. Определяют расчетные значения расхода материалов на 1 м³ бетона с учетом выхода бетона

$$\Pi_1 = \Pi/V_{\delta}, \text{ кг}; \quad (3.30)$$

$$\Pi_1 = \Pi'/V_{\delta}, \text{ кг}; \quad (3.31)$$

$$\Pi_1 = \Pi\Pi'/V_{\delta}, \text{ кг}; \quad (3.32)$$

$$B_1 = \Pi_1 \cdot (B/\Pi)_{\delta}/V_{\delta}, \text{ кг}. \quad (3.33)$$

3.2.15. *Определяют расчетную величину средней плотности бетонной смеси*

$$\rho_{\text{см.расч}} = \Pi_1 + \Pi_1 + \Pi_1 + B_1, \text{ кг/м}^3. \quad (3.34)$$

3.2.16. *Готовят пробный замес бетона расчетного состава, используя который устанавливают фактические значения осадки конуса, а также среднюю плотность бетонной смеси в виброуплотненном состоянии ($\rho_{\text{см.факт}}$), изготавливают образцы бетона для контроля его прочности.*

3.2.17. *Корректируют состав бетона по значению фактической средней плотности бетонной смеси.*

3.2.17.1. *Фактический расход цемента и других составляющих*

$$\Pi_{\phi} = \frac{\rho_{\text{см.факт}}}{\frac{\Pi_1}{\Pi_1} + \frac{\Pi_1}{\Pi_1} + \frac{\Pi_1}{\Pi_1} + \frac{B_1}{\Pi_1}}, \text{ кг}; \quad (3.35)$$

$$\Pi_{\phi} = \Pi_{\phi} \cdot \frac{\Pi_1}{\Pi_1}, \text{ кг}; \quad (3.36)$$

$$\Pi_{\phi} = \Pi_{\phi} \cdot \frac{\Pi_1}{\Pi_1}, \text{ кг}; \quad (3.37)$$

$$B_{\phi} = \Pi_{\phi} \cdot \frac{B_1}{\Pi_1}, \text{ кг}. \quad (3.38)$$

3.2.17.2. *Фактический состав бетона (соотношение твердофазных составляющих в весовых частях, если расход цемента равен одной весовой части)*

$$\frac{\Pi_{\phi}}{\Pi_{\phi}} : \frac{\Pi_{\phi}}{\Pi_{\phi}} : \frac{\Pi_{\phi}}{\Pi_{\phi}} = 1 : A : B. \quad (3.39)$$

3.2.17.3. Рабочий состав бетона (с учетом влажности заполнителей)

$$\Pi_p = \Pi_\phi, \text{ кг}; \quad (3.40)$$

$$\Pi_p = \Pi_\phi + \frac{\Pi_\phi \cdot W_p}{100}, \text{ кг}; \quad (3.41)$$

$$\Pi_{щ} = \Pi_\phi + \frac{\Pi_\phi \cdot W_{щ}}{100}, \text{ кг}; \quad (3.42)$$

$$B_p = B_\phi - \left(\frac{\Pi_\phi \cdot W_p + \Pi_\phi \cdot W_{щ}}{100} \right), \text{ л}, \quad (3.43)$$

где W_p и $W_{щ}$ – влажность песка и щебня, %.

3.2.18. *Определяют коэффициент выхода бетона β по формуле*

$$\beta = \frac{1}{\frac{\Pi_{щ}}{\rho_{щ}^0} + \frac{\Pi_p}{\rho_{вл.п}^0} + \frac{\Pi_p}{\rho_{ц}^0}}, \text{ доли ед.}, \quad (3.44)$$

где $\rho_{щ}^0$, $\rho_{вл.п}^0$, $\rho_{ц}^0$ – средняя плотность щебня, влажного песка и цемента (принимается в расчетах равной: $\rho_{ц}^0 \sim 1,3 \text{ т/м}^3$) в рыхло-насыпном состоянии, т/м^3 .

3.2.19. *Определяют расход материалов на замес смесителя объемом $V_{см}$ (в м^3) из выражений*

$$\Pi_3 = \beta \cdot \Pi_\phi \cdot V_{см}, \text{ кг}; \quad (3.45)$$

$$\Pi_3 = \beta \cdot \Pi_p \cdot V_{см}, \text{ кг}; \quad (3.46)$$

$$\Pi_{щ3} = \beta \cdot \Pi_\phi \cdot V_{см}, \text{ кг}; \quad (3.47)$$

$$B_3 = \beta \cdot B_p \cdot V_{см}, \text{ кг}. \quad (3.48)$$

3.2.20. *Определяют объем бетона 1-го замеса бетоносмесителя*

$$V_{\text{зам}} = \beta \cdot V_{\text{см}}. \quad (3.49)$$

3.3. Влияние химических добавок на свойства бетонной смеси и бетона

Цель работы: практическое освоение студентами навыков и стандартных методик приготовления и испытаний бетонной смеси и бетона, закрепление знаний о модификации их свойств химическими добавками.

Общие методические указания. На основании расчета состава бетона, выполненного в лабораторной работе № 2 (п. 3.2), готовят четыре замеса для определения свойств смеси и бетона.

Замес № 1 соответствует расчетному составу бетона.

Замес № 2 готовят с введением добавки суперпластификатора.

Замес № 3 готовят с введением добавки суперпластификатора, с уменьшением начального водосодержания бетона, сохраняя осадку конуса на исходном уровне.

Замес № 4 готовят с введением ускорителя твердения.

После определения формуемости и фактической средней плотности полученной бетонной смеси каждого замеса изготавливают образцы бетона для контроля его физико-технических свойств.

Анализируют результаты определения свойств бетонной смеси и испытаний свойств бетона.

Методика выполнения работы

Свойства бетонной смеси.

Среднюю (фактическую) плотность бетонной смеси, удобоукладываемость (формуемость) определяют в соответствии с положениями СТБ 1545-2005, в части определения осадки стандартного конуса.

Полученные данные сводят в табл. 3.10, анализируют их, оценивают влияние химических добавок на формовочные свойства смеси непосредственно после ее приготовления и на изменение их во времени.

Таблица 3.10

Влияние добавок на свойства бетонной смеси

№ за- меса (соста- ва бе- тона)	Наличие добавок		Средняя (факти- ческая) плот- ность смеси ($\rho_{см}$) в уплотненном состоянии, кг/м ³	Осадка конуса, см, через время, мин						
	плас- тифи- катор	ускори- тель твер- дения		0	15	30	45	60	90	120
1	–	–								
	+	–								
3*	+	–								
4	–	+								

* При снижении начального водосодержания на ... % (... л воды).

Данные о средней (фактической) плотности бетонной смеси используют для корректировки расхода составляющих бетона, определенного в работе № 2, и окончания проектирования его состава (определение рабочего состава бетона, коэффициентов выхода бетона и объема замеса), в частности, для состава бетона замеса № 3, приготовленного с уменьшенным количеством воды затворения.

Физико-технические свойства бетона.

Используя образцы бетона составов № 1–4 по табл. 3.10 определяют среднюю плотность бетона в состоянии естественной влажности по ГОСТ 12730.1-78, и прочность на сжатие по ГОСТ 10180-2012 в возрасте 3, 7 и 28 суток нормально-влажностного твердения. Данные испытаний сводят в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Влияние добавок на свойства бетона

№ со- става бето- на	Вид добавки	Масса образ- ца, г	Размеры образца, а × в × с, мм	Объем образ- ца, л	Средняя плотность бетона $\rho_{б}$, кг/м ³	Прочность на сжатие (МПа) в возрасте, сут.			
						–	3	7	28
1	–					1			
2	0,6 % СП					2			
3*	0,6 % СП					3			
4	1 % СН					ср.			

* При снижении начального водосодержания на ... % (... л воды).

Анализируют полученные результаты, формулируют выводы, оформляют их в виде заключения о влиянии примененных добавок на формовочные свойства бетонной смеси, среднюю плотность и прочность бетона.

3.4. Расчет трубопровода (бетоновода) при подаче бетонной смеси нагнетательными методами

Цель работы: практическое освоение студентами навыков расчета необходимого (рабочего) давления, обеспечивающего нормальные условия транспортирования бетонной смеси с учетом конкретных условий ведения работ: определенный состав и консистенция бетонной смеси, конфигурация и внутренний диаметр бетоновода, его длина и высота подъема смеси и пр., а также проверки труб бетоновода на прочность.

Общие методические указания. Для осуществления расчетов используют данные о материалах и составе бетона, полученные в лабораторных работах № 1 и № 2 (пп. 3.1 и 3.2).

В соответствии с заданием на лабораторную работу, либо (после согласования с преподавателем) по заданию на курсовую работу по данной дисциплине разрабатывают и приводят в отчете графическую схему бетоновода, обеспечивающую подачу бетонной смеси от места ее приема на объекте к месту укладки в опалубку.

На основании принятой схемы осуществляют расчет бетоновода по следующей методике, с учетом разработок И. Н. Ахвердова [2].

Методика расчета бетоновода

3.4.1. Рассчитывают значение предельного напряжения сдвига бетонной смеси τ_0^{δ} , используя для этого данные расчета состава бетона

$$\tau_0^{\delta} = \frac{1 - X' \cdot K_{\text{нг}}}{X' \cdot K_{\text{нг}}} \cdot r^2 \cdot g(\rho_{\text{см}}^3 - \rho_{\text{ц.г.}}) \cdot \frac{V'_{\text{п}} + V'_{\text{щ}}(1 - \Pi_{\text{щ}}^3)}{V_{\text{ц.г.}} + V'_{\text{п}}(1 - \Pi_{\text{п}}^3)} \times \\ \times \frac{V_{\text{ц.г.}}}{S_{\text{см}}} \cdot 10^4, \text{ Па (Н/м}^2\text{)}, \quad (3.50)$$

где $r = \frac{V'_п}{V'_п + V'_щ}$ – относительное содержание песка в суммарном

объеме заполнителей (доли ед.);

$g = 9,806 \text{ м/с}^2$, ускорение свободного падения;

$\rho_{см}^3$ – средняя плотность зерен смеси заполнителей; для кварцевого песка и гранитного щебня примерно соответствует 2670 кг/м^3 ;

$\rho_{ц.г.}$ – средняя плотность цементного геля; в расчетах допускается принимать примерно равной: $1850, 1950, 2050 \text{ кг/м}^3$, для смесей с ОК = 6–10 см, до 5 см и жестких соответственно.

Прочие обозначения соответствуют принятым в расчете состава бетона.

3.4.2. *Определяют расчетный диаметр бетоновода из выражения*

$$D_{вн} = \sqrt{\frac{4Q}{3600 \cdot \pi \cdot V}}, \text{ м}, \quad (3.51)$$

где Q – расчетная (принятая) подача бетона (расход) на 1 час, $\text{м}^3/\text{час}$;

V – рекомендуемая скорость движения смеси в бетоновode 1–5 м/с, в зависимости от принятой производительности подачи бетона.

Принимают бетоновод, внутренний диаметр которого обеспечивает условия по формуле (3.51) и соответствует данным табл. 3.12 при соблюдении соотношения $D_{вн} \geq 3d$ наибольшего зерна крупного заполнителя.

Таблица 3.12

Значения ϕ_i *

Диаметр бетоновода, м	$a_i = 30^\circ$				$a_i = 60^\circ$				$a_i = 90^\circ$			
	При R_i , м											
	2,0	1,5	1,0	0,5	2,0	1,5	1,0	0,5	2,0	1,5	1,0	0,5
0,080	14,4	28,8	43,2	57,6	32,4	64,8	97,2	129,6	55,5	111,0	166,5	222,0
0,100	10,8	21,6	32,4	43,3	24,2	48,4	72,6	96,8	41,6	83,2	124,7	166,4
0,125	9,0	18,0	27,0	36,0	20,2	40,4	60,6	80,8	35,0	70,0	105,0	140,0
0,150	7,2	14,4	21,7	28,9	16,1	32,2	48,4	64,4	27,7	55,4	83,1	110,8

* Для переходных конусов ($l_{кон} \sim 1 \text{ м}$) к диаметрам бетоноводов: 0,08; 0,100; 0,125 и 0,150 м, значения ϕ_i равны: 220; 200; 180 и 160 (для поворотного переходного конуса эти значения ϕ_i умножают на 1,5).

3.4.3. Определяют расчетные потери давления в бетоноводе

$$P_{\text{расч}} = \frac{2l_{\text{пр}} \cdot \tau_0^6}{a_m \cdot R_{\text{вн}}} + H \cdot \rho_{\text{б.с.}} \cdot g + \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \tau_0^6, \text{ Па}, \quad (3.52)$$

где $a_m = 1,4$ – для смесей с ОК = 6–10 см, учитывает влияние сил инерции;

$l_{\text{пр}}$ – длина прямолинейных участков бетоновода, включая величину H , (м), определяемая геометрически по принятой схеме бетоновода или по зависимости

$$l_{\text{пр}} = l_{\text{общ}} - l_{\text{кон}} - \sum_{i=1}^n m_i \cdot \pi \cdot \frac{a_i}{180} \cdot R_i, \text{ м}, \quad (3.53)$$

где $l_{\text{кон}}$ – длина переходного конуса (в расчетах допускается принять ≈ 1 м);

m_i – количество поворотов бетоновода радиусом R_i , м;

a_i – угол поворота бетоновода в градусах;

$R_{\text{вн}}$ – внутренний радиус бетоновода, м;

H – высота подъема смеси, м;

$\rho_{\text{б.с.}}$ – средняя плотность смеси, кг/м³;

$g = 9,806$, м/с²;

$\pi = 3,14$ доли ед.;

φ_i – коэффициенты местного сопротивления отдельных участков бетоновода, приведенные в табл. 3.12.

3.4.4. Определяют рабочее давление подачи бетонной смеси

$$P = K_c \cdot P_{\text{расч}}, \text{ МПа}, \quad (3.54)$$

где K_c – коэффициент, учитывающий влияние случайных факторов (табл. 3.13).

Таблица 3.13

Значения K_c

Общая длина бетоновода, м	до 100	до 150	до 200	до 250	300 и более
Значения K_c	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55

3.4.5. *Расчет труб бетоновода на прочность.* Требуемая толщина стенок труб при рабочем давлении P составит

$$\delta = \frac{P \cdot D_{\text{вн}}}{(2 \cdot G_{\text{доп}} \cdot K + P) \cdot 10^{-3}} + \Delta\delta, \text{ мм}, \quad (3.55)$$

где $G_{\text{доп}}$ – допускаемое напряжение на растяжение, МПа; для Ст3 принимают $G_{\text{доп}} = 140$ МПа для диапазона температуры от 5 до 100 °С;

K – коэффициент качества труб, равный 1,0; 0,85 и 0,7 для труб бесшовных, сварных с контролем качества сварки и без него соответственно;

$\Delta\delta$ – увеличение толщины стен труб с учетом абразивного износа и коррозии, мм; $\Delta\delta = 1\text{--}2$ мм при $P \leq 16$ МПа и $2\text{--}5$ мм при $P > 16$ МПа, с меньшими значениями для легированной стали.

Допускаемое давление в бетоноводе с учетом износа труб

$$P_{\text{доп}} = \frac{2 \cdot (\delta - \Delta\delta) \cdot K \cdot \delta_{\text{доп}}}{D_{\text{нар}} - (\delta - \Delta\delta)}, \text{ МПа}, \quad (3.56)$$

где $D_{\text{нар}}$ – наружный диаметр труб бетоновода, м.

Должно соблюдаться условие $P_{\text{доп}} \geq P$, т. е. превышать рабочее давление подачи.

По формуле (3.56) возможна оценка способности труб выдержать рабочее давление путем расчета $P_{\text{доп}}$ по фактическому значению δ .

При пневмоподаче бетонной смеси дополнительно рассчитывают расход воздуха и производительность компрессора по справочным (лекционным) материалам.

3.5. Контроль прочности бетона разрушающим и неразрушающими методами

Цель работы: закрепление навыков определения прочностных характеристик бетона путем испытаний изготовленных образцов разрушающим методом и приобретение навыков контроля прочности бетона монолитных конструкций неразрушающими методами.

Общие методические указания. Определение прочности бетона на сжатие разрушающим методом осуществляют в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012, путем испытаний контрольных образцов бетона ранее рассчитанных составов (лабораторные работы № 2 или (и) № 3). Одновременно, до начала нагружения образцов бетона, снимают показания для расчета его прочности механическими неразрушающими методами по СТБ 2264-2012, а также для ее определения ультразвуковым методом.

Полученные данные обрабатывают в соответствии со стандартными методиками, анализируют, сопоставляя значения прочности бетона, установленные различными методами контроля.

По заданию преподавателя рассчитывают коэффициент вариации прочности бетона по ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 18105-2010, и устанавливают класс бетона.

Анализируют полученные результаты, формулируют выводы, оформляют их в виде заключения о точности определения прочности бетона различными методами контроля.

Методическое обеспечение работы

А. Общие правила определения прочности бетона разрушающим методом.

3.5.1.1. Общие правила подготовки к испытаниям образцов. В помещении для испытания образцов следует поддерживать температуру воздуха в пределах 20 ± 5 °С и относительную влажность воздуха не менее 55 %. В этих условиях образцы должны быть выдержаны до испытания в распалубленном виде в течение 24 ч, если они твердели в воде, и в течение 4 ч, если они твердели в воздушно-влажностных условиях или в условиях тепловой обработки.

Образцы, предназначенные для испытаний для определения передаточной или распалубочной прочности бетона на сжатие в горячем состоянии, а также образцы, предназначенные для определения прочности на растяжение после водного твердения, следует испытывать без предварительной выдержки.

3.5.1.2. Перед испытанием образцы подвергают визуальному осмотру, устанавливая наличие дефектов в виде околос ребер, раковин и инородных включений. Образцы, имеющие трещины, околы ребер глубиной более 10 мм, раковины диаметром более 10 мм и

глубиной более 5 мм (кроме бетона крупнопористой структуры), а также следы расслоения и недоуплотнения бетонной смеси, испытанию не подлежат. Наплывы бетона на ребрах опорных граней образцов должны быть удалены напильником или абразивным камнем. Результаты осмотра записывают в журнал испытаний. В случае необходимости фиксируют схему расположения дефектов.

3.5.1.3. На образцах выбирают и отмечают грани, к которым должны быть приложены усилия в процессе нагружения.

Опорные грани отформованных образцов-кубов, предназначенных для испытания на сжатие, выбирают так, чтобы сжимающая сила при испытании была направлена параллельно слоям укладки бетонной смеси в формы.

3.5.1.4. Линейные размеры образцов измеряют с погрешностью не более 1 %. Результаты измерений линейных размеров образцов записывают в журнал испытаний.

3.5.1.5. Отклонения от прямолинейности образующей образцов-цилиндров определяют с помощью поверочных плиты или линейки и щупом путем установления наибольшего зазора между боковой поверхностью образца и поверхностью плиты ($\leq 0,1$ мм на 100 мм длины).

3.5.1.6. Отклонения от перпендикулярности смежных граней образцов-кубов и призм, а также опорных и боковых поверхностей цилиндров определяют по методике ГОСТ 10180-2012 (≤ 1 мм).

3.5.1.7. Отклонения от плоскостности опорных поверхностей образцов определяют по методике ГОСТ 10180-2012 ($\leq 0,1$ мм).

3.5.1.8. Если опорные грани образцов-кубов или цилиндров не удовлетворяют означенным требованиям, то они должны быть выравнены. Для выравнивания опорных граней применяют шлифование или нанесение слоя быстротвердеющего материала толщиной не более 3 мм и прочностью к моменту испытания не менее половины ожидаемой прочности бетона образца.

3.5.1.9. Перед испытанием образцы взвешивают с целью определения их средней плотности по ГОСТ-12730.1. Отклонения ее значений для образцов серии не должно превышать 50 кг/м^3 .

3.5.2. *Общие правила проведения испытаний образцов.*

3.5.2.1. Все образцы одной серии должны быть испытаны в расчетном возрасте в течение не более 1 ч.

3.5.2.2. Перед установкой образца на пресс или испытательную машину удаляют частицы бетона, оставшиеся от предыдущего испытания на опорных плитах пресса.

3.5.2.3. Шкалу силоизмерителя испытательной машины, пресса или испытательной установки выбирают из условия, что ожидаемое значение разрушающей нагрузки должно быть в интервале 20–80 % максимальной нагрузки, допускаемой выбранной шкалой.

3.5.2.4. Нагружение образцов производят непрерывно со скоростью, обеспечивающей повышение расчетного напряжения в образце до его полного разрушения в пределах $0,6 \pm 0,2$ МПа/с при испытаниях на сжатие и в пределах $0,05 \pm 0,01$ МПа/с при испытаниях на растяжение. При этом время нагружения одного образца должно быть не менее 30 с.

3.5.2.5. Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимают за разрушающую нагрузку и записывают его в журнал испытаний.

3.5.2.6. Разрушенный образец необходимо подвергнуть визуальному осмотру и отметить в журнале испытаний:

- характер разрушения;
- наличие крупных (объемом более 1 см^3) раковин и каверн внутри образца;
- наличие зерен заполнителя размером более $1,5 d_{\max}$, комков глины, следов расслоения.

Результаты испытаний образцов, имеющих перечисленные дефекты структуры и характер разрушения, учитывать не следует.

3.5.3. *Определение прочности бетона на сжатие.*

3.5.3.1. При испытании на сжатие образцы-кубы и цилиндры устанавливают одной из выбранных граней на нижнюю опорную плиту пресса (или испытательной машины) центрально относительно его продольной оси, используя риски, нанесенные на плиту пресса, дополнительные стальные плиты или специальное центрирующее устройство.

Между плитами пресса и опытными поверхностями образца допускается прокладывать дополнительные стальные опорные плиты.

3.5.3.2. Образцы-половинки призм при испытании на сжатие помещают между двумя дополнительными стальными плитами. Дополнительные плиты центрируют относительно оси пресса, используя риски, нанесенные на плиту пресса, и дополнительные стальные плиты, или специальное центрирующее устройство.

3.5.3.3. После установки образца на опорные плиты пресса (дополнительные стальные плиты) совмещают верхнюю плиту пресса с верхней опорной гранью образца (дополнительной стальной плитой) так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Далее начинают нагружение.

3.5.3.4. В случае разрушения образца по одной из дефектных схем ГОСТ 10180-2012 при определении средней прочности серии этот результат не учитывают.

3.5.4. *Обработка результатов.*

3.5.4.1. Прочность бетона на сжатие, МПа, следует вычислять с точностью 0,1 МПа для каждого образца по формуле

$$f_c = \alpha \cdot \frac{F}{A}, \quad (3.57)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н;

A – площадь поперечного сечения, мм²;

α – масштабный коэффициент.

3.5.4.2. Значения масштабных коэффициентов α для образцов-кубов и образцов-цилиндров определяют или принимают по данным ГОСТ 10180-2012.

Для образцов-кубов с ребром (при определении призмной прочности на образцах в виде «квадратных» призм – сторона) размером: 70; 100; 150; 200 и 300 мм, соответственно: 0,85; 0,95; 1,00; 1,05 и 1,10, доли ед.

Для образцов-цилиндров с размерами (диаметр × высота) – 100 × 200; 150 × 300; 200 × 400 и 300 × 600 мм, соответственно: 1,16; 1,20; 1,24 и 1,28.

3.5.4.3. Прочность бетона в серии образцов определяют как среднее арифметическое значение в серии:

– из 2-х образцов – по двум образцам;

– из 3-х образцов – по двум наибольшим;

– из 4-х образцов – по трем наибольшим;

– из 6-ти образцов – по четырем наибольшим по прочности образцам.

При отбраковке дефектных образцов прочность бетона в серии образцов определяют по всем оставшимся, если их не менее двух.

Результаты испытаний серии из двух образцов при отбраковке одного не учитывают.

3.5.5. Определение среднего внутрисерийного коэффициента вариации прочности бетона.

Средний внутрисерийный коэффициент вариации прочности бетона V_S , %, определяют по результатам испытания любых последовательных 30 серий образцов бетона одного класса. Для этого определяют размах W_S , в каждой серии, а также средний размах W_S , МПа, и среднюю прочность f_{cS} , МПа, по всем 30 сериям по формулам:

$$W_{Sj} = f_{ci,max} - f_{ci,min}; \quad (3.58)$$

$$W_S = \sum_{l=1}^{30} W_{Sj} / 30; \quad (3.59)$$

$$f_{cS} = \sum_{l=1}^{30} f_{Sj} / 30; \quad (3.60)$$

$$V_S = \frac{W_S}{dR_S}, \quad (3.61)$$

где $f_{ci,max}$ и $f_{ci,min}$ – максимальное и минимальное значение прочности бетона в каждой серии образцов, МПа;

f_{sj} , W_{Sj} – средняя прочность и размах прочности бетона в каждой серии образцов, МПа;

d – коэффициент, принимаемый в зависимости от числа образцов n в серии:

$$\text{при } n = 2 \quad d = 1,13;$$

$$n = 3 \quad d = 1,69;$$

$$n = 4 \quad d = 2,06;$$

$$n = 6 \quad d = 2,50.$$

Б. Общие правила определения прочности бетона неразрушающими методами.

3.5.6. Основные правила контроля прочности бетона в конструкциях.

3.5.6.1. При контроле неразрушающими методами для определения отпускной или передаточной прочности бетона сборных конструкций от партии отбирают 10 %, но не менее трех конструкций.

Для определения прочности бетона монолитных конструкций неразрушающими методами в промежуточном возрасте контролируют не менее одной конструкции из объема бетона, уложенного в течение каждых суток (или часть конструкции в случае, когда ее бетонирование производится более 1 суток).

3.5.6.2. На каждой сборной конструкции, отобранной для определения прочности бетона неразрушающими методами, назначают не менее двух, а для монолитной – не менее четырех контролируемых участков.

Число и расположение контролируемых участков должно указываться проектной организацией в рабочих чертежах конструкций в зависимости от геометрических размеров, назначения и технологии их изготовления и быть не менее:

- для линейных конструкций – одного участка на 4 м длины;
- для плоских конструкций, за исключением монолитных конструкций сплошных стен, – одного участка на 4 м² площади;
- для монолитных конструкций сплошных стен – одного участка на 8 м² площади.

При отсутствии указаний в рабочих чертежах контролируемые участки устанавливаются изготовителем по согласованию с проектной или научно-исследовательской организацией.

Число измерений, выполняемых на каждом контролируемом участке, принимают по действующим стандартам на методы неразрушающего контроля.

3.5.7. Дополнительные требования к контролю прочности бетона неразрушающими методами.

3.5.7.1. За единичное значение при неразрушающем контроле принимают:

- при контроле конструкций плоских и многпустотных плит перекрытий и покрытий, дорожных плит, панелей внутренних несущих стен, стеновых блоков, а также напорных и безнапорных труб – среднюю прочность бетона конструкции, вычисленную как среднее арифметическое значение прочности бетона контролируемых участков конструкции;

– во всех остальных случаях, включая монолитные и сборно-монолитные конструкции – среднюю прочность бетона контролируемого участка конструкции (или часть монолитной, сборно-монолитной конструкции).

3.5.7.2. Контроль прочности бетона неразрушающими методами (ультразвуковым, импульсным или механическими), в случае, когда за единичное значение принимается средняя прочность бетона конструкции, проводят с использованием градуировочной зависимости, предварительно установленной в соответствии с требованиями действующих государственных стандартов на эти методы.

3.5.7.3. Контроль прочности бетона неразрушающими методами, в случае, когда за единичное значение принимается средняя прочность бетона контролируемого участка (в основном для монолитных конструкций), проводят с использованием поправочного коэффициента K_{Π} в формуле для расчета значения среднего квадратичного отклонения (при определении коэффициента вариации прочности бетона).

Его определяют перед началом перехода на эти методы при каждом изменении номинального состава бетона, технологии изготовления конструкции, вида применяемых материалов, при каждом новом установлении градуировочной зависимости, но не реже одного раза в год.

Коэффициент K_{Π} вычисляют по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{V_o}{V_{\text{н.м.}}}, \quad (3.62)$$

где $V_{\text{н.м.}}$ – коэффициент вариации прочности бетона всех серий образцов, испытанных неразрушающими методами для установления градуировочной зависимости;

V_o – коэффициент вариации прочности бетона тех же образцов, испытанных нагружением для установления градуировочной зависимости.

Основные положения расчета поправочного коэффициента K_{Π} изложены в ГОСТ 18105-2010.

При выполнении настоящей лабораторной работы студенты принимают значение $K_{\Pi} \sim 1,0$, либо соответствующие установления, приведенные в стандарте или рекомендациях к применению используемого метода (прибора) неразрушающего контроля прочности бетона.

Испытания бетона и оформление результатов

3.5.8. Определение прочности бетона на сжатие разрушающим методом.

Для определения прочности бетона на сжатие используют образцы-кубы или образцы-цилиндры, изготовленные в процессе выполнения пунктов 3.2 и 3.3. Выполняют все необходимые действия и работы в соответствии с ранее изложенными методическими положениями по подготовке образцов к испытаниям и проведению испытаний. Их результаты записывают в журнал испытаний по следующей форме.

1. Вид бетона, проектный (расчетный) класс, формуемость (подвижность) бетонной смеси, из которой он изготовлен.
2. Номинальные размеры образцов.
3. Дата изготовления.
4. Дата испытания и возраст образцов в сут.

Таблица 3.12

Данные испытаний

№ п/п	Определения и характеристики	Номер образцов				Среднее значение
		1	2	3	...	
1	Масса образца, г					x
2	Размеры образца, мм					x
3	Средняя плотность бетона, кг/м ³					x
4	Площадь поперечного сечения образца, мм ²					x
5	Показания силоизмерителя, ед.*					x
6	Разрушающая нагрузка, н (кН)					x
7	Прочность бетона, МПа					
8	Прочность бетона, МПа, приведенная к базовому стандартному образцу (масштабный коэффициент α)	x	x	x	x	
9	Прочность бетона, МПа, приведенная к стандартному возрасту (28 сут)**	x	x	x	x	

* Форма записи – в зависимости от типа испытательной машины.

** В случае, если испытания проводят на образцах не 28-суточного возраста (в возрасте n , сут.), приводят формулу перерасчета: $f_{c,n} = f_{c,28} \cdot \lg n / \lg 28$.

Анализируют полученные данные, делают вывод о соответствии (или не соответствии) прочности бетона расчетному значению.

При отклонении прочности бетона от расчетной дают анализ возможных причин и намечают мероприятия по устранению установленно несоответствия.

3.5.9. Определение прочности бетона на сжатие неразрушающим методом.

Прочность бетона неразрушающим методом (принятым при выполнении работы) определяют на образцах до испытания их на сжатие, используя стандартные (рекомендуемые) тарировочные данные. Полученные результаты записывают в журнал испытаний с учетом данных стандарта или рекомендаций на применение метода по следующей форме:

1. Вид бетона, проектный (расчетный) класс и формуемость (подвижность) бетонной смеси, из которой он изготовлен.
2. Вид конструкции (образцов), размеры.
3. Число контролируемых участков.
4. Количество измерений на контролируемом участке.
5. Вид (тип) и характеристика метода (прибора) контроля.
6. Дата испытаний бетона и возраст в сут.

Таблица 3.13

Данные испытаний

№ п/п	Определения и характеристики	Показания прибора при измерении, ед. изм.				Прочность бетона, МПа				
		1	2	3	...	1	2	3	...	Средняя
1	Номер контролируемого участка									
	№ 1									
	№ 2									
	№ 3									
	...									
2	Средняя прочность бетона конструкции (контролируемого участка), МПа	–	–	–	–	–	–	–	–	
3	Прочность бетона, приведенная к стандартному возрасту (28 сут.), МПа	–	–	–	–	–	–	–	–	

№ п/п	Определения и характеристики	Показания прибора при измерении, ед. изм.				Прочность бетона, МПа				
		1	2	3	...	1	2	3	...	Средняя
4	Прочность бетона, установленная при испытании образцов разрушением, МПа	–	–	–	–	–	–	–	–	

Анализируют полученные результаты определения прочности бетона неразрушающим и разрушающим методами, делают соответствующие выводы: о соответствии полученных результатов испытаний; о возможном влиянии различных факторов на точность определений; о достоверности определения по стандартным тарифовочным графикам (данным) и др.

Библиографический список

1. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Ахвердов, И. Н. Теоретические основы бетоноведения / И. Н. Ахвердов. – Минск: Вышэйшая школа, 1991. – 263 с.
3. Цемент. Методы испытаний: ГОСТ 310.1-6-(76-85).
4. Песок для строительных работ: ГОСТ 8736-93.
5. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ: ГОСТ 8263-93.
6. Вода для бетонов и растворов. Технические требования: СТБ 1114-98.
7. Смеси бетонные. Методы испытаний: СТБ 1545-2005.
8. Бетоны. Метод определения плотности: ГОСТ 12730.1-78.
9. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-2012.
10. Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264-2012.
11. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-87.
12. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности: ГОСТ 18105-2010.

КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. Тематика курсового проектирования

Цель курсовой работы заключается в углубленном самостоятельном изучении и осмыслении студентом положений теоретического и лабораторного курсов по дисциплинам: «Технология монолитного и приобъектного бетонирования», «Общее бетоноведение», «Арматура и арматурные работы», «Бортоснастка и опалубочные работы» и др., и применении приобретенных знаний в их практическом приложении к разрабатываемому проекту.

Сущность проекта – технологическое обеспечение бетонных работ, включая задачи расчета состава бетона; приготовления, транспортирования, дополнительной обработки смеси на объекте; применения химических модификаторов свойств смеси и бетона; подачи и укладки смеси в опалубку; режимы твердения и контроль качества бетона, а также элементы расчета опалубки, ведения опалубочных и арматурных работ.

При выполнении курсовой работы следует учитывать, что решения технологических задач многовариантны, поэтому студент-проектировщик обязан обосновать выбор принятых в проекте решений соответствующим расчетом или сопоставлением их возможных вариантов. Предпочтение при этом следует отдавать технологическим и организационным приемам (технологическому или транспортному оборудованию, опалубкам и т. д.), обеспечивающим заданные физико-технические характеристики бетона (конструкции) при наименьших экономических затратах.

Темой курсовой работы является разработка технологической карты ведения бетонных работ при возведении (устройстве) элемента здания (сооружения) монолитным способом или изготовление сборной строительной конструкции непосредственно на объекте (приобъектном полигоне).

Тематика курсового проектирования включает разработку технологического обеспечения бетонирования различных элементов (конструкций) зданий и сооружений от фундаментов до перекрытий (покрытий), а также сборных конструкций, преимущественно большепролетных элементов перекрытий (покрытий), конструкций со

сложной конфигурацией (например, комплексных лестничных маршей), наружных навесных панелей и т. д.

Задания к разработке технологической карты бетонирования монолитным способом, как правило, предполагают ведение работ в зимний период как наиболее сложный вариант технологического обеспечения строительства.

Тематика работ по приобъектному изготовлению строительных конструкций, как правило, увязывается с работой в летний период, характеризующейся минимальными энергетическими затратами на обеспечение производственного процесса.

В задании на проектирование приводятся исходные данные: вид бетонизируемой конструкции (элемента), требования к бетону (конструкции), способ подачи смеси в опалубку, скорость бетонирования, особенности климатических условий ведения работ, расстояние транспортирования смеси, а также перечень подлежащих разработке вопросов пояснительной записки и графического материала.

2. Содержание и объем курсовой работы

Курсовая работа состоит из расчетно-пояснительной записки объемом 30–35 страниц рукописного текста, включающего графическую часть в виде чертежей (рисунков), выполняемых на листах формата А3, А4, которые приводят в конце пояснительной записки или по тексту соответствующего раздела.

Расчетно-пояснительная записка включает разделы: введение; характеристика условий ведения бетонных работ; вид конструкции или элемента здания (сооружения), требования к бетону; требования к материалам и их выбор (обоснование); расчет состава бетона (аналитический или на ЭВМ); расчет температурного режима транспортирования бетонной смеси; технология и оборудование для приготовления, транспортирования, приема на объекте, подачи и укладки в опалубку бетонной смеси (пооперационный график ведения работ); расчет температурного режима твердения бетона; расчет опалубки и опалубочные работы; арматура и арматурные работы; контроль качества ведения работ, прочностных и эксплуатационных характеристик бетона; список использованной литературы.

Графическая часть содержит эскизные план и виды строящегося объекта (строительной площадки), рабочий и опалубочный чертежи

бетонируемой конструкции (захватки), схемы армирования и арматурных элементов (сеток, каркасов), расчетные схемы (например, бетоновода), графики (например, роста прочности и прогресса бетона), эскизы элементов и расчетных схем опалубки.

При разработке тем по приобъектному изготовлению строительных конструкций графическая часть включает план компоновки полигона, рабочий и опалубочный чертежи конструкции, схемы арматурных элементов и армирования, графики режимов твердения (роста прочности) бетона.

3. Содержание расчетно-пояснительной записки

3.1. Введение

Дает общее представление о выполненной курсовой работе, о задачах, которые решал студент, выбранных путях их решения и полученных результатах, о примененных новшествах, нетрадиционных подходах, экономической эффективности, мероприятиях по повышению качества (долговечности) строительных конструкций (бетона) и т. д.

3.2. Характеристика условий ведения бетонных работ

Указывают объект работ, климатические условия их ведения, удаленность объекта от места приготовления бетонной смеси, условия ее приготовления и транспортирования, условия приема смеси на объекте, необходимость и наличие дополнительной переработки смеси, особенности примененной опалубки и армирования, способ подачи и укладки смеси в опалубку, общую характеристику режима твердения бетона, контроля качества смеси и бетона.

3.3. Вид конструкции, требования к бетону

3.3.1. Разрабатывают и приводят в разделе (или в конце записки) общий план (или план и вид (разрез) объекта застройки, рабочий и опалубочный чертежи конструкции (захватки), дают их описание (конструктивные особенности), обосновывают выбор типа опалубки или бортоснастки с учетом конструктивных особенностей бетонируемого элемента и других условий ведения работ.

3.3.2. Формируют требования к бетону: проектная прочность, требуемая формуемость смеси, (критическая прочность – для зимнего периода, распалубочная – летнего), вид заполнителей и наибольшая крупность, водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость, коррозионная стойкость (например, при наличии агрессивных реагентов в грунтовых водах), истираемость бетона (для полов, лестничных маршей и площадок и др.), темп твердения (роста прочности) бетона и планируемый период оборачиваемости опалубки и т. д.

3.4. Требования к материалам

Приводят требования к цементу, крупному и мелкому заполнителям и воде применительно к условиям ведения работ по п. 3.2 и 3.3.

Обосновывают (при необходимости) применение химических и минеральных добавок в бетон.

Выбирают необходимые материалы и дают краткое описание их свойств и характеристик, необходимых для расчета состава бетона.

При выборе материалов дают градацию: что рекомендуется к использованию, что допускается; при необходимости указывают, что применять запрещается по соответствующим соображениям (обоснованию).

3.5. Расчет состава бетона

Производят расчет состава бетона аналитическим методом (по п. 3.2) или на ЭВМ, учитывающей его структурные и технологические особенности, применительно к условиям бетонирования по разрабатываемому проекту.

Рассчитывают величину предельного напряжения сдвига τ_0^{δ} бетонной смеси, а на этой основе – минимально необходимую продолжительность виброуплотнения бетона $t_{\text{вibr}}$.

Принимают объем и тип смесителя для приготовления бетонной смеси, определяют объем бетона одного замеса и среднюю производительность бетоносмесительной установки ($\text{м}^3/\text{мин}$).

3.6. Расчет температурного режима транспортирования бетонной смеси

В случае ведения работ при положительной температуре обосновывают мероприятия и условия транспортирования бетонной смеси, предотвращающие потери ее формуемости.

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

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

где $t_{б.н.}$ – температура бетонной смеси нормативная ($^\circ\text{C}$), т. е. требуемый нижний предел температуры смеси по завершении укладки ее в опалубку либо выгрузки из транспортного средства в приемный бункер для подогрева перед подачей в опалубку;

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

$t_{б.н.} \geq 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ – при подаче бетонной смеси в опалубку нагнетательными способами;

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

$\sum_{i=1}^n \Delta t_i$ – доли 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-, теплоизоляции поверхности забетонированной конструкции (или до перегрузки смеси из транспортного средства в бункер для разогрева перед укладкой в опалубку, если используется предварительный разогрев бетона).

Потери температуры бетонной смеси на отдельной i -й операции технологического цикла доставки ее на объект и укладки в опалубку определяют по формуле

$$\Delta t_i = \Delta t'_i \cdot \tau_i, \text{ доли ед.}, \quad (2)$$

где $\Delta t'_i$ – относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения i -й операции за 1 минуту при разнице температур смеси и наружного воздуха в 1°C ($^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \cdot \text{мин}$), значения которого приведены в табл. 1;

τ_i – продолжительность i -й операции в минутах.

Таблица 1

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

№ п/п	Наименование и условия выполнения операций	$\Delta t'_i$, °C/°C · мин
4	Укладка и уплотнение бетона в конструкцию с минимальным размером или толщиной слоя бетона, м	0,06
		0,10
		0,15
		0,2
		0,3
		0,4
		0,5
		≥ 0,6
5	Отделка (заглаживание) и гидротеплоизоляция поверхности, на 1 м ² (°C/°C · 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, за 1 мин	0,0004

Методика расчета температуры бетонной смеси на выходе из смесителя

3.6.1. Разрабатывают пооперационный график ведения работ (операций) технологического цикла доставки бетонной смеси на объект и укладки в опалубку в форме табл. 2.

Таблица 2

Пооперационный график работ

№ п/п	Наименование операций	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. 2 заносят названия операций в их технологической последовательности и известные исходные данные, которые затем

дополняют справочными характеристиками принимаемого для выполнения работ оборудования (механизмов) и расчетными данными о продолжительности отдельных операций технологического цикла транспортирования и укладки бетонной смеси.

3.6.2. Определяют расчетную продолжительность операций технологического цикла и относительные потери температуры бетонной смесью по следующей схеме.

3.6.2.1. Время приготовления и загрузки бетонной смеси:

$$\tau_{\text{пр}} = V_{\text{бет}} / \Pi_{\text{мин}}, \text{ мин}, \quad (3)$$

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

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

$$\Pi_{\text{мин}} = V_{\text{см}} \cdot \beta \cdot n / 60, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (4)$$

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

β – коэффициент выхода бетона, значение которого определяют при расчете состава бетона или принимают по данным табл. 3;

n – нормируемое количество замесов бетоносмесителя в час с учетом конкретных условий приготовления бетона, принимают по табл. 3.

Таблица 3

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

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

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

$$\tau_1 = \tau_{\text{выг}} \cdot n_{\text{зам}}, \text{ МИН,} \quad (5)$$

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

$n_{\text{зам}}$ – количество замесов бетоносмесителя, необходимое для загрузки транспортного средства на 1 рейс, то есть: $n_{\text{зам}} = V_{\text{бет}}/V_{\text{см}} \cdot \beta$.

Время загрузки бетонной смеси в расчетах следует выделять из общих затрат времени на ее приготовление и выгрузку, так как при свободном падении через холодный воздух смесь наиболее интенсивно охлаждается (см. данные табл. 1).

Время, которое бетонная смесь будет накапливаться в транспортном средстве во время его нахождения на БСУ под погрузкой (за вычетом времени загрузки смеси), в расчетах следует суммировать со временем перевозки бетонной смеси для определения общих потерь ее температуры в этот период. Относительное снижение температуры бетонной смеси ($\Delta t'_i$) при этом принимают по п. 2 табл. 1. Таким же образом учитывают возможный период ожидания перед выгрузкой смеси на объекте.

3.6.2.3. Время транспортирования бетонной смеси:

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{L_{\text{тр}}}{V_{\text{сп}}} \cdot 60, \text{ мин}, \quad (6)$$

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

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

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

$$\tau_2 = \tau_{\text{пог}} + \tau_{\text{тр}} + \tau_{\text{ож}}, \text{ мин}, \quad (7)$$

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

3.6.2.4. Время выгрузки бетонной смеси в приемное устройство (бункер, бадью) на объекте:

$$\tau_3 = V_{\text{бет}}/V_{\text{выгр}}, \text{ мин}, \quad (8)$$

где $V_{\text{выгр}}$ – скорость выгрузки транспортных средств, принимаемая для автобетоносмесителей 0,25–1,0 м³/мин, для прочих транспортных средств рекомендуемые значения: 0,5–2,0 м³/мин.

3.6.2.5. Относительные потери температуры бетонной смесью при подаче ее в опалубку ($\Delta t_{\text{п}}$) определяют исходя из длины бетоновода (трубопровода), при использовании бетононасосов или пневмонагнетательных установок (агрегатов), либо с учетом расстояния (высоты) перемещения бункеров (бадей) кранами или подъемниками. Расчет ведут по зависимостям

$$\Delta t_4 = \Delta t'_{\text{юб}} \cdot l_6, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (9)$$

$$\Delta t_4 = \Delta t'_{\text{ик}} \cdot H, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (10)$$

где $\Delta t'_{\text{юб}}$ и $\Delta t'_{\text{ик}}$ – 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 (п. 3 табл. 1), $^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \cdot \text{м}$;

l_6 и H – длина бетоновода или расстояния (высота) подачи бункера (бадья) краном или подъемником, м.

3.6.2.6. Время укладки и уплотнения бетона определяют по зависимостям

$$\tau_5 = \frac{V_{\text{бет}} \cdot \tau_{\text{слоя}}}{n_{\text{слоев}}}, \text{ мин}, \quad (11)$$

$$\tau_{\text{слоя}} = V_{\text{слоя}} / \Pi, \text{ мин}, \quad (12)$$

где $V_{\text{бет}}$ – объем бетона в захватке (конструкции), м³;

$V_{\text{слоя}}$ – объем (м³) укладываемого слоя бетона, при рекомендуемой его высоте до 400 мм для смесей на заполнителях плотных горных пород и до 200 мм для смесей на пористых легких заполнителях (допускаемая высота слоя бетона – не более 1,25 $l_{\text{вibr}}$, где $l_{\text{вibr}}$ – длина вибровозбудителя глубинного вибратора);

$n_{\text{слоев}}$ – количество слоев укладки бетона в конструкцию (захватку);

Π – производительность, с которой укладывается в опалубку (захватку) бетон, м³/мин.

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

$$t_b = K_b \cdot \tau_0^{\delta} (1 - V_{p.c.}), \text{ с}, \quad (13)$$

где K_b – коэффициент, зависящий от параметров вибрирования; $K_b \sim 0,05; 0,02$ и $0,024$ при частоте колебаний $f \sim 50; 150$ и ≥ 200 Гц соответственно, доли ед.;

τ_0^{δ} – предельное напряжение сдвига бетонной смеси в Па, которое рассчитывают по данным подбора состава бетона (его ориентировочное значение для бетонных смесей подвижностью марок П1–П4 соответствует, примерно, 1500–500 Па);

$V_{p.c.}$ – объем (м³) растворной составляющей в бетоне, равный

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

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

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

Производительность работы с глубинным вибратором определяют по формуле

$$\Pi = 2K_{исп} \cdot bRh \cdot \frac{60}{\tau_b + \tau_{пер}}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (14)$$

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 $R \sim 0,5$ м;

h – высота слоя уплотняемого бетона, м;

$\tau_{\text{в}}$ – минимально необходимое время вибрирования, мин;

$\tau_{\text{пер}}$ – 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 два слоя. При большей 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.

3.6.2.7. 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

$$\Delta t_6 = \Delta t'_{\text{отд}} \cdot F + \Delta t'_{\text{у.э.}} \cdot \tau_{\text{у.э.}} + \Delta t'_{\text{под}} \cdot \tau_{\text{под}}, \quad (15)$$

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 гидро-, теплоизоляции открытой поверхности бетона, ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2$), и операции по установке электродов (табл. 1 п. 5), а также при выполнении операций после гидро-, теплоизоляции неопалубленной поверхности бетона (табл. 1 п. 6), $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}$;

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

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

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

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i \approx \Delta t'_1 \cdot \tau_1 + \Delta t'_2 \cdot \tau_2 + \Delta t'_3 \cdot \tau_3 + \Delta t_4 + \Delta t'_5 \cdot \tau_5 + \Delta t_6 \quad (16)$$

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

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i \approx \Delta t'_1 \cdot \tau_1 + \Delta t'_2 \cdot \tau_2 + \Delta t'_3 \cdot \tau_3, \quad (17)$$

где $\Delta t'_1, \Delta t'_2, \Delta t'_3$ и $\Delta t'_5$ – относительное снижение температуры смеси в процессе выполнения операций по ее загрузке, транспортированию, выгрузке в бункер (бадью, приемное устройство) и укладке бетонной смеси в опалубку соответственно (табл. 1), °C/°C · мин;

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

Δt_4 и Δt_6 – относительные потери температуры бетонной смеси при подаче ее в опалубку (п. 3.6.2.5) и при выполнении финишных работ (п. 3.6.2.7).

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

Обосновывают мероприятия по приданию бетонной смеси требуемой температуры и предотвращению снижения (потери) ее формуемости, если уровень разогрева превышает 25 °C при продолжительности

сти операций транспортирования и выгрузки на объекте более 20 мин, а также в случае применения цемента с содержанием $C_3A \geq 7\%$ или химических добавок, ускоряющих схватывание бетона.

Расчет для обоснования отказа от подогрева заполнителей в зимний период работ осуществляют, исходя из подогрева воды затворения до температуры не более $60\text{ }^\circ\text{C}$. Определяют количество теплоты, аккумулируемой водой при разогреве не более, чем до $60\text{ }^\circ\text{C}$ ($Q_{\text{воды}}$, кДж), и требуемое количество теплоты на разогрев твердофазных компонентов (цемента, мелкого и крупного заполнителей) по их расходам на 1 м^3 бетона, с учетом теплоемкости воды, цемента, песка и крупного заполнителя (используя данные курсов «Теплотехника» и «Тепловые установки»),

$$Q_{\text{т.ф.}}^{\Delta t} \approx Q_{\text{ц}}^{\Delta t} + Q_{\text{п}}^{\Delta t} + Q_{\text{щ}}^{\Delta t}, \text{ кДж,}$$

где Δt – перепад температур между наружным воздухом ($t_{\text{н.в.}}$, $^\circ\text{C}$) и расчетным значением температуры бетонной смеси на выходе из смесителя ($t_{\text{см}}$, $^\circ\text{C}$).

Должно соблюдаться условие: $Q_{\text{воды}} \geq Q_{\text{т.ф.}}^{\Delta t}$; если оно не соблюдается, требуется обязательный подогрев заполнителей, либо необходимо оговаривать условия применения в бетон противоморозных добавок.

3.7. Технология ведения бетонных работ и применяемое оборудование

Дают краткую характеристику организационно-технологической схемы выполнения отдельных операций технологического цикла, приводят технические характеристики выбранного оборудования (транспортных средств) в соответствии с данными табл. 2 (п. 3.6).

3.7.1. Приготовление и транспортирование смеси. Описывают принятый способ приготовления смеси, характеристики бетоносмесителей, условий загрузки смеси в транспортное средство; тип и технические характеристики выбранных транспортных средств, условия транспортирования: расстояние (время), качество дорог, наличие побуждения в пути следования, поправочный коэффициент изменения формуемости смеси и др.

3.7.2. Прием и подача смеси в опалубку. Отражают организацию приема смеси на объекте, наличие дополнительной обработки смеси (восстановление формуемости, введение химических добавок, разогрев), оценку формуемости смеси, изготовление контрольных образцов, способ подачи смеси в опалубку, применяемое оборудование (технические характеристики).

3.7.2.1. Разрабатывают и приводят в записке схему бетоновода.

3.7.2.2. Рассчитывают значение предельного напряжения сдвига бетонной смеси τ_0^6 по данным расчета состава бетона

$$\tau_0^6 = \frac{1 - X' \cdot K_{\text{нп}}}{X' \cdot K_{\text{нп}}} \cdot r^2 \cdot g(\rho_{\text{см}}^3 - \rho_{\text{ц.г.}}) \times$$

$$\times \frac{V'_{\text{п}} + V'_{\text{щ}}(1 - \Pi_{\text{щ}}^3)}{V'_{\text{ц.г.}} + V'_{\text{п}}(1 - \Pi_{\text{п}}^3)} \cdot \frac{V_{\text{ц.г.}}}{S_{\text{см}}} \cdot 10^4, \text{ Па (Н/м}^2\text{)}, \quad (18)$$

где $r = \frac{V'_{\text{п}}}{V'_{\text{п}} + V'_{\text{щ}}}$ – относительное содержание песка в суммарном объеме заполнителей (доли ед.);

$g = 9,806 \text{ м/с}^2$, ускорение свободного падения;

$\rho_{\text{см}}^3$ – средняя плотность зерен смеси заполнителей; для кварцевого песка и гранитного щебня примерно соответствует 2670 кг/м^3 ;

$\rho_{\text{ц.г.}}$ – средняя плотность цементного геля; в расчетах допускается принимать примерно равной: $1850, 1950, 2050 \text{ кг/м}^3$, для смесей с ОК = 6–10 см, до 5 см и жестких соответственно.

Прочие обозначения соответствуют принятым в расчете состава бетона.

3.7.2.3. Определяют расчетный диаметр бетоновода из выражения

$$D_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4Q}{3600 \cdot \pi \cdot V}}, \text{ м}, \quad (19)$$

где Q – расчетная (принятая) подача бетона (расход) на 1 час, $\text{м}^3/\text{час}$;

V – рекомендуемая расчетная скорость движения смеси в бетоноводе до $1,0\text{--}3,0 \text{ м/с}$, в зависимости от принятой производительности подачи бетона.

Принимают бетоновод, внутренний диаметр которого обеспечивает условия по формуле (19) и соответствует данным табл. 4 при соблюдении соотношения $D_{\text{вн}} \geq 3d$ наибольшего зерна крупного заполнителя.

Таблица 4

Значения φ_i *

Диаметр бетоновода, м	$a_i = 30^\circ$				$a_i = 60^\circ$				$a_i = 90^\circ$			
	При R_i , м											
	2,0	1,5	1,0	0,5	2,0	1,5	1,0	0,5	2,0	1,5	1,0	0,5
0,080	14,4	28,8	43,2	57,6	32,4	64,8	97,2	129,6	55,5	111,0	166,5	222,0
0,100	10,8	21,6	32,4	43,3	24,2	48,4	72,6	96,8	41,6	83,2	124,7	166,4
0,125	9,0	18,0	27,0	36,0	20,2	40,4	60,6	80,8	35,0	70,0	105,0	140,0
0,150	7,2	14,4	21,7	28,9	16,1	32,2	48,4	64,4	27,7	55,4	83,1	110,8

* Для переходных конусов ($l_{\text{кон}} \sim 1$ м) к диаметрам бетоноводов: 0,08; 0,100; 0,125 и 0,150 м, значения φ_i равны: 220; 200; 180 и 160 (для поворотного переходного конуса эти значения φ_i умножают на 1,5).

3.7.2.4. Определяют расчетные потери давления в бетоноводе

$$P_{\text{расч}} = \frac{2l_{\text{пр}} \cdot \tau_0^6}{a_m \cdot R_{\text{вн}}} + H \cdot \rho_{\text{б.с.}} \cdot g + \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \tau_0^6, \text{ Па}, \quad (20)$$

где $a_m = 1,4$ – для смесей с ОК = 6–10 см, учитывает влияние сил инерции;

$l_{\text{пр}}$ – длина прямолинейных участков бетоновода, включая величину H (м), определяемая геометрически по принятой схеме бетоновода или по зависимости

$$l_{\text{пр}} = l_{\text{общ}} - l_{\text{кон}} - \sum_{i=1}^n m_i \cdot \pi \cdot \frac{a_i}{180} \cdot R_i, \text{ м}, \quad (21)$$

где $l_{\text{кон}}$ – длина переходного конуса (в расчетах допускается принять ≈ 1 м);

m_i – количество поворотов бетоновода радиусом R_i , м;

a_i – угол поворота бетоновода в градусах;

$R_{\text{вн}}$ – внутренний радиус бетоновода, м;

H – высота подъема смеси, м;

$\rho_{\text{б.с.}}$ – средняя плотность смеси, кг/м³;

$g = 9,806$, м/с²;

$\pi = 3,14$ доли ед.;

φ_i – коэффициенты местного сопротивления отдельных участков бетоновода, приведенные в табл. 4.

Определяют рабочее давление подачи бетонной смеси

$$P = K_c \cdot P_{\text{расч}}, \text{ МПа}, \quad (22)$$

где K_c – коэффициент, учитывающий влияние случайных факторов (табл. 5).

Таблица 5

Значения K_c

Общая длина бетоновода, м	до 100	до 150	до 200	до 250	300 и более
Значения K_c	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55

3.7.2.5. Расчет труб бетоновода на прочность. Требуемая толщина стенок труб при рабочем давлении P составит

$$\delta = \frac{P \cdot D_{\text{вн}}}{(2 \cdot G_{\text{доп}} \cdot K + P) \cdot 10^{-3}} + \Delta\delta, \text{ мм}, \quad (23)$$

где $G_{\text{доп}}$ – допускаемое напряжение на растяжение, МПа; для Ст3 принимают $G_{\text{доп}} = 140$ МПа для диапазона температуры от 5 до 100 °С;

K – коэффициент качества труб, равный 1,0; 0,85 и 0,7 для труб бесшовных, сварных с контролем качества сварки и без него соответственно;

$\Delta\delta$ – увеличение толщины стен труб с учетом абразивного износа и коррозии, мм; $\Delta\delta = 1\text{--}2$ мм при $P \leq 16$ МПа и $2\text{--}5$ мм при $P > 16$ МПа, с меньшими значениями для легированной стали.

Допускаемое давление в бетоноводе с учетом износа труб

$$P_{\text{доп}} = \frac{2 \cdot (\delta - \Delta\delta) \cdot K \cdot \delta_{\text{доп}}}{D_{\text{нар}} - (\delta - \Delta\delta)}, \text{ МПа}, \quad (24)$$

где $D_{\text{нар}}$ – наружный диаметр труб бетоновода, м.

Должно соблюдаться условие $P_{\text{доп}} \geq P$.

По формуле (24) возможна оценка способности труб выдержать рабочее давление путем расчета $P_{\text{доп}}$ по фактическому значению δ .

При пневмоподаче бетонной смеси дополнительно рассчитывают расход воздуха и производительность компрессора по справочным (лекционным) материалам.

3.7.3. Укладка и уплотнение бетона. Приводят описание укладки бетона, последовательности подачи смеси в плане конструкции, толщины укладываемого слоя, способ и оборудование для уплотнения бетона, приемы отделки поверхности, гидро- и теплоизоляция бетона, контролируемые операции, приемы и методы контроля качества работ и бетона.

4. Расчет режима твердения бетона

Выбор режима твердения бетона обуславливается климатическими условиями ведения работ, видом (модулем поверхности) бетонируемой конструкции, требуемым темпом оборота опалубки и должен соответствовать минимальным экономическим затратам при обеспечении требуемых характеристик бетона и качества строительства.

В разделе рассмотрены основные методы твердения бетона, применяемые в строительной практике: естественное выдерживание и по методу «термоса», электродный прогрев, прогрев в термоактивной опалубке и обогрев греющими проводами. Студент вправе выбирать любой экономически обоснованный вариант из приведенных или иных методов (индукционный нагрев, инфракрасный обогрев и пр.). При этом следует учитывать, что использование химических ускорителей твердения бетона, в сочетании с низкотемпературным прогревом его указанными способами, способствует интенсификации роста прочности и ускорению оборачиваемости опалубки.

Последовательность расчетов по разделу изложена в его подпунктах, относящихся к различным способам выдерживания или твердения бетона. Во всех случаях вначале следует определить уровень критической (для зимнего периода работ) или распалубочной прочности бетона, а затем разрабатывать и рассчитывать температурный режим его твердения, исходя из необходимости обеспечения принятой прочности бетона с учетом конкретных условий ведения работ: вида конструкции (захватки) и величины модуля ее поверхности, типа применяемой опалубки и требуемого (или планируемого) периода ее оборачиваемости, температуры наружного воздуха и пр.

4.1. Естественное твердение бетона

Естественным условиям твердения бетона соответствует режим выдержки конструкции (захватки) в опалубке (бортоснастке) с гидроизоляцией (при необходимости – гидро-, теплоизоляцией) неопалубленных поверхностей до достижения бетоном заданной прочности без интенсификации его твердения за счет использования дополнительных искусственных источников тепловой энергии.

В разделе обосновывают правомерность выбора данного способа твердения, приводят графики роста прочности бетона (ориентируясь на данные табл. 6, справочных пособий, результаты научных исследований в этой области), показывают эффективность и выбирают к применению добавки-ускорители твердения, определяют мероприятия по использованию приемов гелиотермообработки, пленкообразующих покрытий и т. д.

Таблица 6

Прочность бетона при различной температуре твердения в % от 28-суточной (для нормально-влажностных условий)

Бетон	Возраст, сут.	Средняя температура бетона, °С				
		5	10	20	30	40
Класса С12/15...С20/25 на ПЦ М400	1	9	12	23	35	45
	2	19	25	40	55	65
	3	27	37	50	65	77
	5	38	50	65	80	90
	7	48	58	75	90	100
	14	62	72	90	100	–
	28	77	85	100	–	–

Бетон	Возраст, сут.	Средняя температура бетона, °С				
		5	10	20	30	40
Класса С25/30...С28/35 на ПЦ М500	1	12	18	28	40	55
	2	22	32	50	63	75
	3	32	45	60	74	85
	5	45	58	74	85	96
	7	55	66	82	92	100
	14	70	80	92	100	–
	28	80	90	100	–	–
Класса С30/37...С40/45 на ПЦ М600	1	13	21	32	45	59
	2	25	36	52	65	75
	3	35	45	62	75	85
	5	47	58	75	83	90
	7	57	68	85	90	100
	14	73	82	95	100	–
	28	83	92	100	–	–
Класса С12/15...С20/25 на ШПЦ М400	1	6	10	16	30	40
	2	12	18	30	40	60
	3	18	25	40	55	70
	5	27	35	55	65	85
	7	34	43	65	70	100
	14	50	60	80	96	–
	28	65	80	100	–	–
Аглопоритобетон класса В15 на ПЦ М400	1	6	10	24	48	61
	2	13	26	50	65	76
	3	24	40	62	75	86
	7	45	53	80	91	97
	28	73	82	100	–	–
Керамзитобетон класса В15 на ПЦ М400	1	5	10	25	56	61
	2	14	24	50	63	75
	3	23	37	63	73	85
	7	48	58	80	91	97
	28	79	83	100	–	–

Примечание. Для легкого бетона на пористых заполнителях данные табл. 6 допускается использовать как начальные для более высоких классов прочности, с последующей корректировкой (при необходимости) по фактическим данным строительной (или профильной) лаборатории предприятия (организации).

Разрабатывая график роста прочности бетона, на основании которого назначают продолжительность выдерживания его в опалубке (бортоснастке), учитывают, что:

1) данные табл. 6 соответствуют вяжущим с содержанием C_3A не более 6 %. В случае применения цементов с содержанием C_3A до 7 % и более вводят поправочный коэффициент 1,05 и 1,1 соответственно;

2) при введении 1–1,5 % от массы цемента ускорителей твердения: $CaCl_2$; NH_4Cl ; Na_2SO_4 и других – поправочный коэффициент составляет: 1,55; 1,60; 1,35; 1,25; 1,20; 1,10 и 1,105 для возраста: 1, 2, 3, 5, 7, 14 и 28 суток соответственно;

3) график роста прочности бетона при гелиотермообработке конструкции должен учитывать изменение температуры бетона в процессе выдерживания и рост тепловыделения цемента с ее повышением. Рекомендуется сочетать этот прием с твердением по методу термоса в период от снижения солнечной активности до распалубки конструкции (захватки). Для этого предусматривают и устраивают теплоизоляцию поверхности твердеющего бетона к началу снижения солнечной активности с целью уменьшения теплопотерь в окружающую среду. Необходимо рассчитать период остывания бетона до температуры среды по методике п. 4.2.3.

Разновидностью метода естественного твердения бетона для зимнего периода года является вариант с применением противоморозных добавок: хлористого кальция ($CaCl_2$), NH_4Cl , нитрита натрия ($NaNO_2$), нитрата кальция ($Ca(NO_3)_2$), поташа (K_2CO_3), мочевины ($CO(NH_2)_2$) и ряда других, а также сочетаний приведенных добавок. Следует учитывать возможные побочные эффекты от действия этих веществ в цементном бетоне: ускорение схватывания, коррозию стальной арматуры, снижение морозостойкости и др. Целесообразность применения «холодного» бетона с противоморозными добавками должна определяться в каждом конкретном случае. Рекомендуется использовать этот прием при устройстве отдельно стоящих массивных конструкций, выполняемых в несъемной опалубке (например, разного рода фундаментов под технологическое оборудование), т. к. твердение «холодного» бетона при минусовой температуре характеризуется медленным ростом прочности. Назначать дозировку добавок и режимы твердения бетона следует по соответствующим справочным данным с учетом погодных-климатических и организационно-технологических условий ведения работ.

Учитывая, что требуемая дозировка противоморозных добавок уже при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ наружного воздуха составляет $\geq 3\%$ от массы цемента, то есть значительно превышает возможности вяжущего связать эти вещества в нерастворимые соединения с продуктами его гидратации, данный прием зимнего бетонирования допускается применять в исключительных случаях и только по согласованию с руководителем проекта, а также то, что по действующим на территории Беларуси нормативам допускаемая дозировка химических добавок в бетон должна быть не более 5% от массы цемента.

4.2. Термосное твердение бетона

Обосновывают эффективность и необходимые условия для применения метода, рассчитывают параметры режима твердения: критическую прочность бетона, температуру разогрева смеси, продолжительность остывания бетона, затраты энергии на его разогрев, подбирают опалубку (по требуемому коэффициенту теплопередачи), необходимое оборудование для ведения работ.

4.2.1. Подготовка основания. Дают описание работ в соответствии с принятым способом отогрева основания, арматуры и опалубки, выполняют расчет энергетических затрат.

4.2.2. Расчет температуры разогрева бетонной смеси. Расчет начинают с определения средней температуры бетона ($t_{\text{ср}}$, $^{\circ}\text{C}$) за предполагаемый период его твердения в опалубке. То есть, определяют среднее значение температуры, которая обеспечивает за принятое (расчетное) время $\tau_{\text{выд}}$ достижение заданной прочности (например, $f_{\text{с.крит}} = 0,5 f_{\text{с.28}}$). Рекомендуемое значение $t_{\text{ср}} \sim 20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$; ее расчетное значение принимают, исходя из данных табл. 6, с учетом конкретных условий ведения работ и принятого времени выдерживания бетона в опалубке $\tau_{\text{выд}}$.

Необходимый уровень предварительного разогрева смеси для конкретных условий ведения работ определяют по зависимости

$$t_{\text{раз}} = \frac{(t_{\text{ср}} - t_{\text{б.к.}}) \cdot (1,03 + 0,181M_{\text{п}})}{[1 - 0,006 \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{б.к.}})] + t_{\text{укл}}}, \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (25)$$

где $M_{\text{п}}$ – модуль поверхности бетонируемой конструкции,

$$M_{\text{п}} = \frac{F}{V}, \text{ м}^{-1}$$

или отношение площади теплоотдающих поверхностей F конструкции к объему бетона V ;

$t_{\text{б.к.}}$ – значение температуры бетона к началу распалубки конструкции после выдержки $\tau_{\text{выд}}$ и достижения прочности бетона не менее $f_{\text{ст.крит}}$. Рекомендуемое значение $t_{\text{б.к.}} = 2\text{--}5$ °С при разнице температуры между бетоном и окружающей средой ≤ 30 °С для конструкций с модулем поверхности $M_{\text{п}} > 5$ и ≤ 20 °С при наличии требований к бетону по морозостойкости и водонепроницаемости или $M_{\text{п}} \leq 5$.

$t_{\text{укл}}$ – потери температуры бетонной смесью при подаче и укладке ее в опалубку, включая заглаживание и влаго-, теплоизоляцию поверхности конструкции,

$$t_{\text{укл}} = \frac{|t_{\text{н.в.}}| \sum_{i=1}^n \Delta t_i}{1 - \sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \text{ °С.} \quad (26)$$

Расчет $\sum_{i=1}^n \Delta t_i$ осуществляют по методике, изложенной в п. 3.6.

В случае, если не производят отогрева арматуры, опалубки и основания перед укладкой бетона, уточняют его температуру с учетом соответствующих потерь по зависимости

$$t_{\text{раз}}' = \frac{C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot V_{\text{б}} \cdot t_{\text{раз}} - C_{\text{ст}} \cdot m_{\text{ст}} \cdot V_{\text{б}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{н.в.}}) - Q_{\text{он}} - Q_{\text{осн}}}{C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot V_{\text{б}} + C_{\text{ст}} \cdot m_{\text{ст}} \cdot V_{\text{б}} + \sum_{i=1}^n C_i \cdot F_i \cdot \delta_i \cdot \rho_i + C_{\text{осн}} \cdot \rho_{\text{осн}} \cdot V_{\text{осн}}}, \text{ °С,} \quad (27)$$

где $C_{\text{б}}$, $C_{\text{ст}}$, C_i , $C_{\text{осн}}$ – удельная теплоемкость бетона, стали, i -го слоя многослойной опалубки и материала основания, кДж/(кг · °С), табл. 7;

ρ_b, V_b – плотность бетона ($\approx 2400 \text{ кг/м}^3$) и объем бетона, м^3 , в конструкции;

$m_{ст}$ – среднее содержание (расход) арматурной стали в кг на 1 м^3 бетона;

F_i, δ_i, ρ_i – площадь i -й части опалубки (теплоотдающей поверхности конструкции), м^2 ; толщина i -го слоя опалубки, м ; плотность i -го слоя опалубки, кг/м^3 ;

$Q_{оп}$ – тепловые затраты на нагрев опалубки, кДж , которые рассчитывают по формуле

$$Q_{оп} = (t_{ср} - t_{н.в.}) \sum_{i=1}^n C_i \cdot F_i \cdot \delta_i \cdot \rho_i, \text{ кДж}; \quad (28)$$

$Q_{осн}$ – тепловые затраты на отопление основания, по формуле

$$Q_{осн} = C_{осн} \cdot \rho_{осн} \cdot V_{осн} (t_{ср} - t_{н.в.}), \text{ кДж}, \quad (29)$$

где $\rho_{осн}$ – средняя плотность материала основания, кг/м^3 , принимаемая по фактическим данным или из табл. 7;

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

$$V_{осн} = F_{осн} \cdot h_{осн}, \text{ м}^3, \quad (30)$$

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

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

Уточняют значение средней температуры бетона при твердении по формуле

$$t'_{ср} = t_{б.к.} + \frac{t'_{раз} - t_{б.к.}}{1,03 + 0,181M_n + 0,006 \cdot (t'_{раз} - t_{б.к.})}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (31)$$

В последующих расчетах используют значение $t'_{раз}$ взамен $t_{раз}$, если при этом обеспечивается достижение $f_{ст.крит}$ за $\tau_{ост}$ (33). В про-

тивном случае увеличивают температуру предварительного разогрева до:

$$t_{ув} = t_{раз} + (t_{раз} - t'_{раз}), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (32)$$

или вводят ускорители твердения, увеличивают теплозащитные свойства опалубки (см. п. 1.4.2.4).

Таблица 7

Расчетные характеристики материалов

Вид материала	Средняя плотность, кг/м ³	Расчетный коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м · °С)	Удельная теплоемкость в сухом состоянии C_0 , кДж/(кг · °С)
Бетон тяжелый*	2400	1,86	0,84
Аглопоритобетон (шлакобетон)	1800	0,93	0,84
Керамзитобетон (конструкц.)	1600	0,75	0,84
Керамзитобетон (теплоизол.)	600	0,23	0,84
Железобетон	2500	2,03	0,84
Сталь	7800	58	0,84
Вата минеральная и изделия из нее	75–150	0,049–0,06	0,76
Дерево	500–700	0,17–0,23	2,52
Фанера	600	0,17	2,52
Опилки	250	0,24	2,5
Пенопласт	75	0,044	1,26
Рубероид	600	0,17	1,47
Плиты ДВП и ДСП	1000	0,29	2,1
Бетон тяжелый (мерзлый)**	2400	1,9	1,05
Песок**	1600–1800	1,98–2,44	0,84
Песчаное и гравелистое основание ($W_m = 5\text{--}25\%$) мерзлое**	1600	1,1–2,73	1,05–1,47

* Для всех видов бетонов принимать $C_0 = 1,05$ кДж/(кг · °С), как для влажного материала.

** Для расчета затрат тепла на отопев оснований.

4.2.3. Определение продолжительности остывания (выдержки) бетона. Рассчитывают время остывания бетона от $t_{\text{раз}}$ ($t'_{\text{раз}}$; $t_{\text{ув}}$) до $t_{\text{б.к.}}$ по формуле Скрамтаева–Миронова, т. е. без учета теплоты экзотермии цемента ($\text{Ц}/\text{Э} = 0$); экзотермию цемента в данной формуле учитывают, если не было предварительного разогрева бетона.

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot (t_{\text{раз}} - t_{\text{б.к.}}) + \text{Ц} \cdot \text{Э}}{3,6 \cdot K_{\text{T}} \cdot M_{\text{п}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{н.в.}})}, \text{ ч}, \quad (33)$$

где $t_{\text{раз}}$ и $t_{\text{ср}}$ – температура разогрева и средняя за период твердения в °С, либо их скорректированные значения по формулам (27) и (31), если температуру разогрева смеси не увеличивали;

$C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость бетонной смеси (свежеотформованного бетона), принимаемая равной 1,05 кДж/(кг · °С).

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

Ц – содержание цемента в 1 м³ бетона, кг;

Э – тепловыделение 1 кг цемента при твердении бетона, кДж/кг (см. табл. 8);

K_{T} – коэффициент теплопередачи опалубки, Вт/(см² · °С) (см. табл. 9);

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

В случае, если коэффициент теплопередачи опалубки бетонированной конструкции или укрытий неопалубленных поверхностей различаются между собой (например, K_{T1} , K_{T2} , ... K_{Tn}), то его среднее значение определяют по формуле

$$K_{\text{T}}^{\text{ср}} = \frac{F_1 \cdot K_{\text{T1}} + F_2 \cdot K_{\text{T2}} + \dots + F_n K_{\text{Tn}}}{F_1 + F_2 + \dots + F_n}, \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{°С}), \quad (34)$$

где F_1, F_2, \dots, F_n – площадь отдельных участков опалубки и неопалубленных поверхностей.

Таблица 8

Тепловыделение цемента*, кДж/кг

Вид и марка	Температура, °С	Тепловыделение цемента*, кДж/кг, за время твердения, сут.							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
Портландцемент марки 400 (класс 32,5)	5	–	–	29	63	109	188	209	251
	10	12	25	50	105	146	209	251	293
	20	42	67	105	167	209	272	314	335
	40	84	134	188	230	272	314	335	–
	60	130	188	230	272	314	335	–	–
Портландцемент марок 500 и 600 (класс 42,5)	5	12	25	42	125	89	188	230	272
	10	25	42	63	105	167	251	293	314
	20	42	84	125	188	251	292	335	377
	40	105	167	209	272	293	356	377	–
	60	188	230	272	314	356	372	–	–
Шлакопортландцемент марки 300	5	–	12	25	42	63	126	161	188
	10	–	25	33	63	105	167	209	230
	20	–	33	62	125	147	209	251	272
	40	42	75	117	167	209	251	272	–
	60	63	105	147	207	230	272	–	–

* При применении в бетоне химических ускорителей твердения (1–1,5 % от массы цемента) вводят поправочный коэффициент: 1,3; 1,2; 1,15; 1,1 для 1, 2, 3 и 7 суток соответственно.

Таблица 9

Коэффициенты теплопередачи опалубки и укрытий неопалубленных поверхностей

Конструкция ограждения, толщина материала	Скорость ветра, м/с				
	0	3	5	10	15
Доска, 25 мм	2,44	4,55	5,22	5,61	5,97
Доска, 40 мм	2,01	3,1	3,6	3,78	3,94
Сталь до 6 мм (или водостойкая фанера до 12 мм) + минераловатные плиты 50 мм + фанера толщиной 4 мм (или кровельная сталь)	1	1,18	1,28	1,31	1,33

Конструкция ограждения, толщина материала	Скорость ветра, м/с				
	0	3	5	10	15
Толь + опилки сухие, 100 мм	0,74	0,85	0,89	0,9	0,9
Толь + минеральная вата (минераловатные плиты), 50 мм	1,01	1,2	1,3	1,33	1,35
Доска 25 мм + пенопласт 30 мм + фанера 4 мм	0,67	0,75	0,8	0,815	0,83

4.2.4. Уточняют соответствие $t_{\text{ср}}$, $\tau_{\text{ост}}$ (выд), $t_{\text{раз}}$ ($t_{\text{раз}}$, $t_{\text{ув}}$) обеспечению условия $f_{\text{см.факт}} \geq f_{\text{см.крит}}$.

При необходимости корректируют расчет: используют более качественные материалы для бетона (например, цемент большей активности), опалубку с меньшим коэффициентом теплопередачи и др.

В случае, если требуется повысить теплозащитную функцию опалубки или подобрать опалубку с коэффициентом теплопередачи, соответствующим конкретным условиям работ, расчет осуществляют по следующей методике.

По формуле (33), решив ее относительно K_{T} , определяют значение K'_{T} , которое обеспечивает в данных условиях требуемую продолжительность остывания $\tau_{\text{ост}}$ и достижение $f_{\text{см.крит}}$ бетона. Для обеспечения значения K'_{T} рассчитывают требуемую толщину слоя утеплителя $\delta_{\text{из}}$. Для этого из табл. 10 по заданному (принятому) значению скорости ветра, принимают величину $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициента конвективной теплоотдачи наружной поверхности опалубки Вт/(см² · °С).

Таблица 10

Скорость ветра, м/с	0	5	10	15	20
Значения $\alpha_{\text{к}}$	3,5	21,5	33,2	43,0	52,5

Толщину слоя утеплителя (принятого по табл. 7) опалубки, обеспечивающего значение K'_{T} , рассчитывают по формуле

$$\delta_{\text{из}} = \lambda_{\text{из}} \left[\frac{1}{K'_{\text{T}}} - \left(\frac{1}{\alpha_{\text{к}}} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) \right], \text{ м}, \quad (35)$$

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

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

4.2.5. Расчет затрат электрической энергии на предварительный разогрев бетона объемом $V_б$.

$$P_{раз} = \frac{0,001K \cdot U^2 \cdot V_б \cdot \tau_{раз}}{R_{б.с.} \cdot B^2 \cdot 60}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (36)$$

где U – напряжение тока (380 или 220 В);

$V_б$ – объем разогретого бетона, м³;

$\tau_{раз}$ – время разогрева в мин (5–15 мин);

$R_{б.с.}$ – усредненное омическое сопротивление бетонной смеси: $R_{тяж.б.с.} = 8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $R_{лег.б.с.} = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (при введении солей (0,5–2 % и более) понижается примерно в 2–4 раза);

B – расстояние между электродами и стенками бункера, м. В расчетах опускается принять $B = 0,3 \text{ м}$;

K – поправочный коэффициент, зависящий от разницы температур после и до разогрева бетонной смеси, дол. ед. (табл. 11).

Таблица 11

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

4.3. Электродный прогрев бетона

Рассчитывают параметры прогрева бетона в соответствии с положениями п. 2.4.2, принимают и приводят (в виде соответствующих эскизов) в записке схему расстановки и подключения электродов, выбирают соответствующее оборудование, приводят правила безопасности производства работ.

Расчет времени подъема температуры осуществляют с учетом данных табл. 12.

Таблица 12

Значения $M_{п}$	≤ 4	4–6	6–10	> 10	Для стыков
Рекомендуемая $V_t, \text{ }^\circ\text{C/ч}$	5	8	10	15	20

Примечание. При наличии требований по морозостойкости и водонепроницаемости бетона $V_t \leq 5 \text{ }^\circ\text{C/ч}$.

4.4. Твердение бетона в термоактивной опалубке

Обосновывают целесообразность применения термоактивной опалубки, выбирают тип и дают эскизы основных элементов (устройств) принятого варианта, описывают порядок ведения работ. Разрабатывают (на базе данных табл. 6 или 2.14 и справочных данных) и приводят графики роста прочности бетона и температурного режима его прогрева.

Расчеты производят по п. 2.4.2 (формулы (2.46–2.59)), с учетом особенностей прогрева бетона в термоактивной опалубке:

– допускаемые значения t_n соответствуют до $90 \text{ }^\circ\text{C}$ для ШПЦ и ППЦ; до $80 \text{ }^\circ\text{C}$ – для ПЦ и до $70 \text{ }^\circ\text{C}$ при наличии требований по морозостойкости и водонепроницаемости бетона (до $40 \text{ }^\circ\text{C}$ при повышенных требованиях по F и W);

– рекомендуемая скорость подъема температуры составляет 15; 20; 25; $30 \text{ }^\circ\text{C/ч}$ при модуле теплоотдающей поверхности до: 4; 6; 10 и более соответственно и не должна быть выше $10 \text{ }^\circ\text{C/ч}$ при наличии требований по морозостойкости и водонепроницаемости бетона.

На основе полученных данных для термоактивной опалубки определяют удельную мощность нагревателей по зависимости

$$P = \frac{P_{\text{под}}}{F}, \text{ Вт/м}^2 \text{ (кВт/м}^2\text{)}, \quad (37)$$

где F – площадь термоактивных щитов опалубки для принятой захватки, м^2 .

При этом учитывают, что наиболее распространенные типы термоактивных опалубок характеризуются мощностью нагревателей в $200\text{--}1400 \text{ Вт/м}^2$.

Общие затраты электрической энергии на термообработку бетона определяют по формуле (2.57).

4.5. Обогрев бетона греющими проводами

4.5.1. Расчет в начальной фазе соответствует последовательности п. 14.3 (электродный прогрев бетона) по, включительно, п. 4.3.4, в части определения требуемой мощности на стадии подъема температуры – $P_{\text{под}}$, формула (2.55). При этом учитывают, что рекомендуемая температура обогрева бетона греющими проводами соответствует 20–40 °С, что предполагает широкое применение добавок, ускоряющих твердение бетона и пластификаторов с ускоряющим эффектом.

4.5.2. Используя значение $P_{\text{под}}$, по методике п. 2.5 настоящего методического пособия рассчитывают режим обогрева бетона принятой студентом разновидности (и характеристик) греющего провода. При этом учитывают конструктивные особенности бетонизируемого элемента (захватки) возводимого здания (сооружения).

4.5.3. Подробности и особенности расчетов режимов твердения бетона разными методами приведены в источнике [3].

5. Опалубка и опалубочные работы

Приводят данные о выбранном типе опалубки (с учетом ранее проведенных расчетов) применительно к конструктивным особенностям бетонизируемого элемента здания (сооружения) и погодноклиматическим условиям ведения работ.

Производят поверочный расчет опалубки в соответствии с методическими указаниями п. 2.1 по критериям прочности, жесткости и на опрокидывание для разрабатываемого варианта бетонирования; приводят эскизы расчетной схемы опалубки и свободного пролета палубы.

Приводят основные характеристики принятой для производства работ опалубки, ее конструктивные особенности.

Дают описание последовательности работ при устройстве и съеме опалубки. Приводят данные смазок: составы (летние и зимние), способ нанесения, приемы отогрева опалубки при работе в зимний период и пр.

6. Арматура и арматурные работы

Схему армирования бетонированной конструкции (захватки) разрабатывают на основе данных, принятых по справочным (литературным источникам) или реальным проектам. Приводят в данном разделе или конце пояснительной записки эскизы (рабочие чертежи), схемы армирования арматурных элементов и данные по сортаменту и расчетным характеристикам используемой арматурной стали. Принимают и описывают условия изготовления арматурных элементов, их доставки, хранения, укрупнительной сборки (при наличии) и другие данные по технологии арматурных работ. Приводят спецификацию расхода стали (арматурных элементов) на захватку (конструкцию).

7. Контроль качества ведения работ и бетона

Излагают мероприятия по контролю качества опалубочных, арматурных и бетонных работ. Приводят описание методов контроля качества бетонной смеси, прочности и эксплуатационных характеристик бетона.

8. Список использованной литературы

Приводят список литературы в последовательности, соответствующей использованию, страницы цитирования или заимствования данных источника.

Библиографический список

1. Справочник строителя. Бетонные и железобетонные работы. – М.: Стройиздат, 1987. – 319 с.
2. Справочник мастера-строителя. – М.: Стройиздат, 1989. – 543 с.
3. Технология и методы зимнего монолитного бетонирования: учебное пособие / Э. И. Батяновский [и др.]. – Минск: БНТУ, 2005. – 238 с.
4. Савалов, И. Г. Бетонные и железобетонные работы / И. Г. Савалов, Я. Г. Могилевский, В. И. Остромогольский. – М.: Стройиздат, 1988. – 335 с.

5. Евдокимов, Н. И. Технология монолитного бетона и железобетона / Н. И. Евдокимов, А. Ф. Мацкевич, В. С. Сытник. – М.: Высшая школа, 1980. – 334 с.
6. Миронов, С. А. Теория и методы зимнего бетонирования / С. А. Миронов. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.
7. Батяновский, Э. И. Монолитный бетон сухого формования / Э. И. Батяновский, В. Ю. Мирончик. – Минск: НПО «Стринко», 2003. – 176 с.
8. Байков, В. Н. Железобетонные конструкции / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1991. – 766 с.
9. Кудзис, А. П. Железобетонные и каменные конструкции / А. П. Кудзис. – М.: Высшая школа, 1989. – 263 с.
10. Ахвердов, И. Н. Теоретические основы бетоноведения / И. Н. Ахвердов. – Минск: Высшая школа, 1991. – 263 с.
11. Хаютин, Ю. Г. Монолитный бетон / Ю. Г. Хаютин. – М.: Стройиздат, 1991. – 573 с.
12. Лысов, В. П. Эффективность бетонных работ в строительстве / В. П. Лысов. – Минск: Беларусь, 1982. – 95 с.
13. Атаев, С. С. Технология индустриального строительства из монолитного бетона / С. С. Атаев. – М.: Стройиздат, 1989. – 335 с.
14. Применение добавок в бетон: Пособие П1-99 к СНиП 3.09.01-85. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2000. – 33 с.
15. Бессер, Я. Р. Методы зимнего бетонирования / Я. Р. Бессер. – М.: Стройиздат, 1976. – 167 с.
16. Производство бетонных работ на строительной площадке: Пособие П2-2000 к СНиП 3.03.01-87. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2001. – 51 с.
17. Строительная теплотехника: СНБ 2.01.01-93. – Минск: Стройтехнорм, 1994. – 29 с.
18. Строительная климатология и геофизика. Госстрой СССР: СНиП 2.01.01-82. – М.: Стройиздат, 1983. – 136 с.
19. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий сборного железобетона: ОНТП-07-85. – М.: Минстройматериалов СССР, 1988. – 51 с.

Содержание

Введение	3
1. Общие положения ведения бетонных работ в зимних условиях	5
2. Методические указания к практическим занятиям	11
2.1. Расчет опалубки по критериям прочности, жесткости и на опрокидывание	11
2.2. Расчет температурного режима транспортирования и укладки бетонной смеси в зимний период	15
2.3. Расчет температурного режима твердения бетона по методу горячего термоса	25
2.4. Расчет параметров режима электродного прогрева бетона	38
2.5. Расчет параметров режима обогрева бетона греющими проводами	53
2.6. Расчет режима предварительного электроразогрева бетонной смеси	58
Библиографический список	64
3. Методические указания к лабораторным занятиям	65
3.1. Определение физико-технических характеристик составляющих бетона	65
3.2. Расчет состава тяжелого бетона, транспортируемого по трубам методом нагнетания	72
3.3. Влияние химических добавок на свойства бетонной смеси и бетона	81
3.4. Расчет трубопровода (бетоновода) при подаче бетонной смеси нагнетательными методами	83
3.5. Контроль прочности бетона разрушающим и неразрушающими методами	86
Библиографический список	96
Курсовое проектирование	97
Методические указания по выполнению курсового проектирования	98
1. Тематика курсового проектирования	98
2. Содержание и объем курсовых работ	99
3. Содержание расчетно-пояснительной записки	100
3.1. Введение	100

3.2. Характеристика условий ведения бетонных работ	100
3.3. Вид конструкции, требования к бетону	100
3.4. Требования к материалам	101
3.5. Расчет состава бетона	101
3.6. Расчет режима транспортирования бетонной смеси	102
3.7. Технология ведения бетонных работ и применяемое оборудование	112
4. Расчет режима твердения бетона	116
4.1. Естественное твердение бетона	117
4.2. Термосное твердение бетона	120
4.3. Электродный прогрев бетона	127
4.4. Твердение бетона в термоактивной опалубке	128
4.5. Обогрев бетона греющими проводами	129
5. Опалубка и опалубочные работы	129
6. Арматура и арматурные работы	130
7. Контроль качества ведения работ и бетона	130
8. Список использованной литературы	130
Библиографический список	130

Учебное издание

БАТЯНОВСКИЙ Эдуард Иванович
БОНДАРОВИЧ Александр Иванович
РЯБЧИКОВ Павел Владимирович
КАЛИНОВСКАЯ Наталья Николаевна

ТЕХНОЛОГИЯ МОНОЛИТНОГО И ПРИОБЪЕКТНОГО БЕТОНИРОВАНИЯ

Учебно-методическое пособие
для курсового проектирования, лабораторных
и практических занятий студентов специальности 1-70 01 01
«Производство строительных изделий и конструкций»

Редактор *В. И. Акулёнок*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 27.01.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 7,79. Уч.-изд. л. 6,09. Тираж 300. Заказ 415.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.