

Министерство образования и науки Российской Федерации
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

М.С. Гаркави
О.А. Долгова
Е.А. Трошкина

ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Допущено Уральским отделением
Учебно-методического объединения вузов РФ по образованию
в области строительства в качестве учебного пособия
для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров
270800.62 «Строительство» всех форм обучения*

Магнитогорск
2014

УДК 666.97.035.51:536.24

ББК 38.33

Г 204

Рецензенты:

Заведующий кафедрой МС Уральского федерального университета
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
профессор, доктор технических наук

Ф.Л. Капустин

Профессор кафедры «Строительные материалы»
Казанского государственного архитектурно-строительного университета,
доктор технических наук

Н.Р. Рахимова

Профессор кафедры «Строительные конструкции»
Уфимского государственного нефтяного технического университета,
доктор технических наук

И.В. Недосеко

Гаркави, М.С.

Г 204 Тепловая обработка бетонных и железобетонных изделий:
учеб. пособие / М.С. Гаркави, О.А. Долгова, Е.А. Трошкина. –
Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова,
2014. – 102 с.

ISBN 978-5-9967-0470-5

Изложены основы тепловлажностной обработки бетона, включая обоснование режима и классификацию тепловых установок. Особое внимание уделено процессам, происходящим в среде и материале при тепловой обработке, методикам теплотехнических расчетов и принципам выбора режимов различных тепловых установок.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 270800.62 «Строительство» всех форм обучения.

ISBN 978-5-9967-0470-5

© Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г.И. Носова, 2014

© Гаркави М.С., Долгова О.А.,
Трошкина Е.А., 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. УСКОРЕНИЕ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА	6
2. ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ.....	9
2.1. Периоды ТВО и достигаемые цели	9
2.2. Основные критерии выбора режима ТВО.....	13
3. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ, ИМЕЮЩИХ ПОВЫШЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ.....	14
3.1. Конструкции из лёгких бетонов	14
3.2. Предварительно напряженные железобетонные конструкции	15
3.3. Конструкции с повышенными требованиями к морозостойкости и водонепроницаемости.....	15
4. УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА	16
4.1. Классификация установок для ТВО бетона	16
4.2. Теплотехнические расчеты установок.....	17
4.3. Выбор тепловых установок	24
5. ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА.....	27
5.1. Основные направления развития тепловой обработки сборного железобетона	27
5.2. Сокращение непроизводительных энергозатрат и повышение эффективности тепловых установок.....	29
5.2.1. Организационно-технические мероприятия по рациональному использованию энергии при тепловой обработке бетона.....	29
5.2.2. Экономичные тепловые установки с теплоизолированными ограждениями.....	31
5.3. Энергосберегающие режимы ТВО бетона	35
5.3.1. Термосные тепловые режимы.....	35
5.3.2. Режимы тепловой обработки бетона с ограниченным тепловым импульсом	37
5.4. Эффективные методы тепловой обработки бетона с использованием нетрадиционных энергоносителей	38
5.4.1. Тепловая обработка бетона продуктами сгорания природного газа.....	39
5.4.2. Применение низкотемпературного теплоносителя на основе традиционных и возобновляемых видов энергии ...	40
5.4.3. Применение масла как теплоносителя в технологии термообработки бетона	42

5.5. Энергосберегающие методы применения теплого (предварительно разогретого) бетона.....	42
Приложение 1. Теплотехнический расчет ямной пропарочной камеры	44
Приложение 2. Теплотехнический расчет туннельной пропарочной камеры.....	55
Приложение 3. Теплотехнический расчет кассетных установок	68
Приложение 4. Теплотехнический расчет автоклава	83
Приложение 5. Назначение режимов тепловой обработки изделий	93
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	100

ВВЕДЕНИЕ

При тепловой обработке в материалах и изделиях происходят физико-химические превращения, формируется структура, идут процессы тепло- и массопереноса, возникает напряженное состояние. Изучение этой достаточно сложной взаимосвязи, порой еще мало исследованной, является главной задачей, которую приходится решать технологам.

Основными задачами данного учебного пособия являются: изучение основ физических процессов при тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий, принципов назначения режимов тепловой обработки и методик расчета необходимого количества теплоты и теплоносителя на тепловую обработку изделий с целью проведения мероприятий, направленных на экономию топливно-энергетических ресурсов.

Пособие может быть использовано при выполнении курсового проекта по дисциплине «Теплотехническое оборудование в производстве строительных изделий и конструкций», а также при разработке теплотехнического раздела дипломного проекта профиля подготовки бакалавра «Производство строительных материалов, изделий и конструкций».

1. УСКОРЕНИЕ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

Твердение бетона является наиболее длительной операцией в технологии сборного железобетона. Ее сокращение существенно улучшает технико-экономические показатели производства и, следовательно, положительно сказывается на конкурентоспособности продукции. Поэтому на предприятиях используют ускоренные методы твердения бетона, основанные на тепловой обработке (ТО). Ниже приведены наиболее распространенные методы ТО.

1. Пропаривание при 60–95°C в течение 8–40 ч до достижения 50–100% отпускной прочности. Метод используется наиболее часто, с его помощью выпускают около 80% сборного бетона.

2. Сухой прогрев при 60–120 °C осуществляется за счет использования продуктов сгорания природного газа, теплоэнергонагревателей (ТЭНов) или паровых регистров. Метод наиболее целесообразен при прогреве легких бетонов, т.к. одновременно происходит и сушка. Сушка тяжелого бетона недопустима из-за ухудшения свойств, в частности снижения прочности на 25% и более. При прогреве тяжелого бетона следует использовать теплогенераторы с доувлажнением среды. Помогает также напыление на верхнюю поверхность пленкообразующих материалов или введение в бетонную смесь депрессоров влагоиспарения.

3. Автоклавная обработка проводится при избыточном давлении насыщенного пара 0,8–1,2 МПа и температуре 174–192°C в течение 9–13 ч, обеспечивая достижение 100% прочности. Метод наиболее употребителен при выпуске изделий из силикатных бетонов.

4. Контактный прогрев заключается в передаче тепла бетону от нагретых формообразующих поверхностей. Примером может служить ТО изделий в кассетах и термоформах, когда тепловые оттески нагреваются паром, ТЭНами и др. К этому методу относится и электроиндукционный прогрев.

5. Электропрогрев осуществляется пропуском электрического тока через изделие с выделением в нем тепла. В зависимости от толщины изделия и удельного сопротивления бетонной смеси необходимо напряжение тока 60–150 В. Поэтому необходимо повышенное внимание к электробезопасности при выполнении работ. Возникают также сложности с обеспечением равномерности электрических и тепловых полей из-за повышенной электропроводности стальной арматуры. Метод является одним из экономичных.

6. Использование горячих смесей основано на быстром их разогреве за 1–10 мин до 60–80°C. Для этого используется электрический ток с напряжением до 380 В или пар под давлением около 0,3 МПа. Горячие смеси укладываются в форме и уплотняются. Далее осуществляется их

термосное, либо активное термосное выдерживание (с импульсным подогревом). Предварительный разогрев бетонных смесей позволяет отказаться от предварительной выдержки, а также частично или полностью от разогрева, что дает возможность сократить ТО на 2–4 ч. Большим достоинством метода является почти полное отсутствие деструктивных процессов, что соответственно сказывается на структуре и свойствах бетона. Метод экономичен, но для полной реализации достоинств требует высокой культуры производства и повышенного внимания к вопросам техники безопасности.

Тепловая обработка снижает качество бетона и в первую очередь его долговечность. Тем не менее, нет предприятий, где бы ее не применяли ради интенсификации производства.

Причиной ухудшения качества бетона и, соответственно, изделий является расширение его компонентов при нагреве. Во-первых, их расширение неодинаково. Наибольшую объемную деформацию имеет паровоздушная смесь в порах. На порядок меньше деформируется вода и еще на порядок меньше твердые материалы. В итоге происходит взаимное смещение компонентов, разрыв возникших связей и контактов, разрыхление бетона.

Поскольку прогрев изделий происходит преимущественно в формах, которые препятствуют расширению твердеющего бетона, в нем возникает внутреннее избыточное давление. Под этим давлением паровоздушная смесь и вода перемещаются к открытым поверхностям и к неплотностям в сочленениях элементов форм.

Этот процесс интенсифицируется при наличии градиентов температуры и влажности. В итоге возникает направленная пористость; происходит деформация, разрыв, раскрытие и слияние пор; разрыхляется бетон, особенно внешние слои.

При анализе деструктивных процессов следует также учитывать взаимодействие арматуры и элементов форм с бетоном при изменениях температуры, особенно для предварительно напряженных и ребристых изделий.

Для компенсации потерь качества бетона при ТО нередко прибегают к увеличению расхода цемента. Этот путь нерационален, т.к. ухудшается ряд свойств бетона, повышается его стоимость.

Между тем, имеются эффективные технологические приемы, позволяющие частично, а иногда и полностью, нейтрализовать негативное действие ТО на качество бетона и изделий. Среди них в первую очередь следует отметить назначение оптимальных режимов.

Оптимальным следует считать режим тепловой обработки, который обеспечивает требуемое качество бетона и изделий при минимальной продолжительности ТО и минимальном расходе ресурсов.

Рекомендации по выбору режимов ТО сборных железобетонных изделий содержатся в ряде нормативных документов. Однако они не могут охватить всего многообразия производственно-технологических условий, нередко содержат неточности и противоречия. Поэтому наиболее реальный путь поиска оптимальных режимов – это проведение экспериментов в реальных условиях, учитывающих способ ТО, конструкцию изделий, качество исходных материалов, вид, состав и требования к свойствам бетона.

Кроме назначения оптимальных режимов для уменьшения негативных последствий ТО и экономии энергоресурсов рекомендуются следующие технологические приемы:

1. Оптимизация состава с использованием портландцементов 1 группы эффективности при пропаривании, вяжущих низкой водопотребности – ВНВ и других; снижением водоцементного отношения бетонных смесей; введением в их состав химических добавок – ускорителей твердения и т.п.

2. Совершенствование тепловых установок путем теплоизоляции ограждений и улучшения парораспределения. Например, оснащение имеющихся камер изотермосмесителями или эжекторами-терморегуляторами. Переоборудование камер периодического действия в гидроаэроциркуляционные, а щелевых камер непрерывного действия – в полигональные.

3. Применение дешевых видов энергии, и в первую очередь природного газа, тем более, что положительный эффект от его использования усиливается отсутствием потерь в энергопроводах.

4. Комбинированная и двухстадийная ТО. Например, формование изделий из горячих бетонных смесей с последующим кратковременным прогревом или прогрев изделий в кассетах до достижения распалубочной прочности, распалубка и дальнейшее выдерживание в плотных пакетах.

5. Учет предвыходных дней путем «смягчения» режимов, включая снижение температуры прогрева до 40–50°C.

6. Использование специальных приемов: домол 25–35% цемента, совместное введение в смесь микронаполнителей и суперпластификаторов, повторная вибрация, снижение распалубочной прочности, активизация заполнителей, магнитная обработка воды, электроискровое воздействие на бетонную смесь и др.

7. Автоматизация процесса ТО с коррекцией заданной программы данными о нарастании прочности бетона в изделиях.

2. ТЕПЛОВЛАЖНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

2.1. Периоды ТВО и достигаемые цели

При любом способе тепловой обработки сначала приходится нагревать изделия, а затем, после выдержки при заданной температуре, охлаждать их. Раньше, говоря о режиме ТВО, указывали продолжительность отдельных стадий или периодов и температуру прогрева (максимальную).

Например: 3+6+2 при 80°C.

Однако практика показала, что необходимо указывать еще и продолжительность предварительной выдержки, так как в случае проведения ее в тепловой установке это сказывается на эффективности работы последней, а в случае проведения ее в цехе требуются дополнительные площади.

Например: 2+3+6+2 при 80°C.

Под температурой прогрева обычно подразумевают температуру паровоздушной среды или указывают, что это температура изделия. Изменения температуры и соответствующие периоды представляются в виде графика (рис. 2.1).

ТВО ведут до приобретения бетоном следующих видов прочности:

- распалубочной (технологической);
- передаточной;
- отпускной;
- проектной.

Распалубочная прочность — это минимальная прочность бетона, при которой можно производить расформовку и внутризаводскую транспортировку изделий без их повреждения и потери качества. Устанавливается предприятием-производителем изделия в зависимости от конкретных заводских условий на основе собственного опыта производства.

Целью получения данной прочности является увеличение оборачиваемости форм и тепловых установок, то есть сокращение продолжительности ТВО. Так, например, изделия из тяжелого бетона прогревают в кассетных установках до получения распалубочной прочности, а затем их отправляют в камеры дозревания.

Передаточная прочность устанавливается для предварительно напряженных изделий. Она должна быть такой, чтобы исключалось проскальзывание арматуры и смятие бетона под анкерами при передаче напряжения от арматуры на бетон. Величина передаточной прочности указывается обычно в проекте, ГОСТе или другом нормативном документе на это изделие.

Проектная прочность – прочность бетона, на которую производится расчет конструкций здания или сооружения, где применяется данное изделие. Обычно указывается в проекте, ГОСТе или другом нормативном документе на это изделие.

Следует обратить особое внимание на тот факт, что при одних и тех же условиях, для одного и того же изделия, при получении различной прочности бетона требования к проведению ТВО резко отличаются друг от друга.

В отличие от нормальных условий твердения бетона при тепловлажностной обработке следует учитывать следующие особенности:

- между бетоном и окружающей паровоздушной средой происходит непрерывное взаимодействие. При этом параметры паровоздушной среды все время меняются, происходит непрерывный обмен теплом, влагой и воздухом;

- влага, пар и воздух, находящиеся в бетоне, непрерывно двигаются: то от периферийных зон к центральным, то наоборот. В силу этого в бетоне образуется направленная пористость;

- в период нагревания любого вида бетона в нем возникает внутреннее избыточное давление, что часто сопровождается увеличением общей пористости по причине разуплотнения бетона (деструкции);

- в процессе ТВО в изделиях возникают напряжения, которые могут приводить к деструктивным явлениям. Напряжения могут возникнуть в результате неравномерного нагревания или охлаждения, увлажнения или высыхания периферийных и центральных зон изделия и возникающей при этом разной деформируемости бетона в этих зонах (расширения, усадки и т. п.);

- форма оказывает значительное влияние на характер деформируемости бетона и на трещинообразование во время нагревания и охлаждения изделий. Это влияние может быть как положительным, так и отрицательным.

Положительным это влияние оказывается при условии, когда форма препятствует разуплотнению бетона от влияния внутреннего избыточного давления, возникающего при нагреве изделия, и, тем самым, уменьшает недобор прочности термообработанного бетона. Ярче всего это проявляется в кассетных установках, а также в герметизированных и закрытых формах.

Также положительным это влияние оказывается, когда форма способствует более равномерному охлаждению изделий, тем самым снижая интенсивность испарения влаги из бетона изделий. В силу этого уменьшается величина температурных и усадочных напряжений в бетоне изделий, а значит снижается и опасность трещинообразования (особенно в холодное время года).

Отрицательным это влияние оказывается при следующих условиях:

- когда форма запроектирована или изготовлена недостаточно жесткой, особенно при транспортных операциях;
- когда форма неравномерно нагревается или охлаждается и при этом искривляется (рис. 2.2).

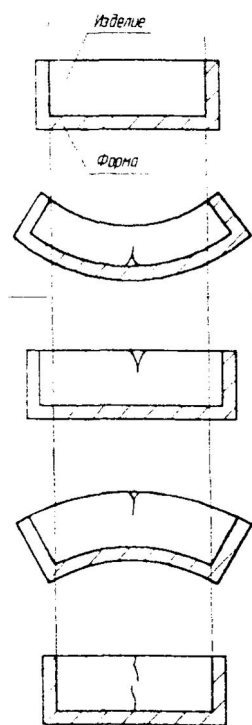


Рис. 2.2. Схема деформирования формы и изделия во время ТВО

До начала нагрева

В начале нагрева

Расширение поддона формы опережает тепловые расширения бетона изделия. На поверхности изделия со стороны поддона возможно появление трещин.

В конце нагрева

При выпрямлении формы поверхностные слои бетона изделия оказываются растянутыми и в них могут появиться трещины.

В начале охлаждения

Низ поддона формы охлаждается раньше верха изделия. Форма искривляется в другую сторону. Поверхностные слои бетона оказываются растянутыми и вверху могут появиться трещины.

В конце охлаждения

Трещины, появившиеся в процессе ТВО, закрываются и становятся практически невидимыми или имеют волосной характер

Следует иметь в виду, что все трещины, появившиеся на изделиях до ТВО, в процессе обработки не залечиваются, а наоборот, увеличиваются. Заполнение трещин новообразованиями не происходит в силу того, что по этим трещинам, как по тоннелям, идет интенсивное движение пара, воды и воздуха то от периферийных зон к центральным, то наоборот.

Возникает противоречие: чем жестче формы (выше поддоны), тем меньше опасность появления трещин механического происхождения (при

транспортных операциях), но при этом больше вероятность появления трещин в процессе ТВО.

В том и другом случаях всегда приходится искать компромисс, что и является одной из основных задач, которые ставятся перед технологом-строителем.

Достичь этого можно только при обязательном условии: необходимо, чтобы в любой момент времени величина растягивающих напряжений, возникающих в бетоне изделий, была меньше предела прочности бетона при растяжении на изгиб.

2.2. Основные критерии выбора режима ТВО

При выборе режима ТВО необходимо устанавливать не только продолжительность отдельных периодов или стадий, включая предварительную выдержку, но и характер изменения параметров паровоздушной среды, а иногда и бетона, на всех стадиях.

На выбор режима большое влияние оказывает вид и активность цемента. Все цементы разделены на три основные группы (табл. 2.1) по эффективности цемента при пропаривании:

$$K_n = \frac{R_n}{R_{11}^{28}}, \quad (1)$$

где R_n – активность цемента при пропаривании, МПа (определяется по ГОСТу); R_{11}^{28} – активность цемента нормального твердения, МПа (определяется по ГОСТу).

Таблица 2.1

Классификация цементов по K_n

Группа цементов	Вид цемента по K_n	Численное значение K_n	Свойства цементов
1	Высокоэффективный	$\geq 0,68$	Высокий темп набора прочности
2	Среднеэффективный	0,57	Средний темп набора прочности
3	Низкоэффективный	$\leq 0,56$	Низкий темп набора прочности (нецелесообразно использовать для ТВО)

Большое влияние на выбор режима ТВО оказывает толщина изделий. При увеличении толщины изделий общая продолжительность тепловлажностной обработки увеличивается. В основном это происходит за счет удлинения периода изотермической выдержки, так как при увеличении толщины увеличивается время запаздывания разогрева центра изделий (τ'_2).

Влияет на выбор режима тепловлажностной обработки и класс бетона. С повышением класса бетона общая продолжительность обработки сокращается, в основном за счет изотермической выдержки.

На продолжительность тепловлажностной обработки оказывают влияние и водоцементное отношение, подвижность или жесткость бетонной смеси, ее температура при формовании, вид химических добавок, способ армирования изделия форма и ее конфигурация, вид бетона и тепловой установки и другие факторы.

3. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ, ИМЕЮЩИХ ПОВЫШЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ

3.1. Конструкции из лёгких бетонов

Для изделий из конструкционных легких бетонов классов В10 и выше способы и режимы тепловлажностной обработки аналогичны режимам для изделий из тяжелых бетонов. Рекомендуется лишь учитывать более медленный нагрев и охлаждение изделий.

Для изделий из конструкционно-теплоизоляционных бетонов классов В7,5 и ниже необходимо получить не только прочностные показатели, но и требуемую отпускную влажность. Следовательно, тепловлажностную обработку необходимо сочетать с сушкой. Это возможно только при создании ненасыщенной паровоздушной среды. Такая тепловая обработка носит название сухого прогрева.

Для получения изделий необходимого качества тепловые установки оборудуют дополнительными источниками тепловой энергии: теплогенераторами для сжигания газа, ТЭНами, регистрами, инфракрасными излучателями и др.

Тепловую обработку проводят при температурах 95–140°C (рис. 3.1), не допуская перегрева изделий и снижая их влажность до необходимых величин.

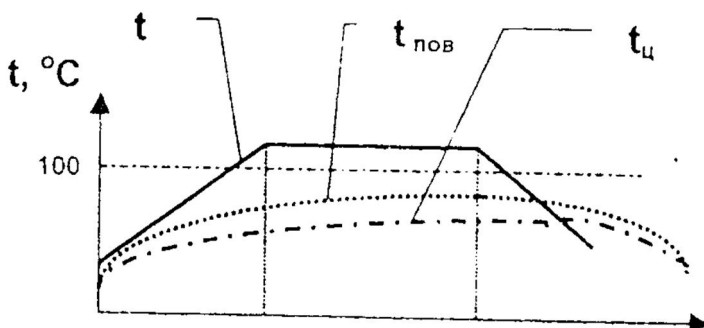


Рис. 3.1. Характер изменения температур при тепловой обработке изделий из легких бетонов:
 t – температура паровоздушной среды, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ц}}$ – температура центра изделия, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{пов}}$ – температура поверхности изделия

3.2. Предварительно напряженные железобетонные конструкции

При тепловлажностной обработке предварительно напряженных конструкций из тяжелых бетонов необходимо учитывать взаимодействие стальной арматуры с бетоном и получение сразу (в течение 0,5 ч) после окончания тепловой обработки передаточной прочности.

Такие требования значительно увеличивают длительность обработки, в основном, за счет удлинения изотермической выдержки.

Необходимо снижать температуру изотермического прогрева, применять ступенчатые режимы в период подъема температуры, а также предварительно нагревать тепловые установки и производить подтяжку напрягаемой арматуры при производстве работ на полигонах.

3.3. Конструкции с повышенными требованиями к морозостойкости и водонепроницаемости

При нарушении структуры бетона во время ТВО морозостойкость и водонепроницаемость снижаются гораздо в большей степени, чем прочностные показатели. При неоптимальных режимах и снижении прочности на 35–40% морозостойкость уменьшается в 8–10 раз.

Главное условие получения изделий необходимого качества – «мягкие» режимы, в которые входят: длительная предварительная выдержка, малые скорости подъема температуры среды, снижение температуры изо-

термической выдержки, а также проведение охлаждения изделий с увлажнением открытых поверхностей водой регулируемой температуры.

Для получения высоких показателей качества изделий и, в первую

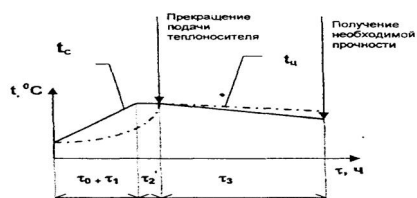


Рис. 3.2. Термосный режим

очередь, долговечности при одновременной экономии тепловой энергии и цемента весьма целесообразным считается применение термосных режимов. Они отличаются от обычных практически полным исключением периода изотермической выдержки (рис. 3.2).

Как правило, при таких режимах тепловые установки работают с суточным циклом, то есть коэффициент оборачиваемости равен единице.

4. УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА

ТВО – это наиболее длительный и заключительный процесс технологии бетона и железобетона. Поэтому качество готовой продукции во многом зависит от правильной организации ТВО и выбора конструкции установок.

4.1. Классификация установок для ТВО бетона

Классификация установок для тепловлажностной обработки бетона по режиму работы представлена в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Классификация по режиму работы

Периодического действия		Непрерывного действия
При атмосферном давлении ($t < 100^{\circ}\text{C}$; $p < 0,06 \text{ МПа}$): ямные камеры; касетные, пакетные установки, термоформы, обогреваемые стенды с колпаками и термосы	При избыточном давлении ($t > 100^{\circ}\text{C}$; $p > 0,06 \text{ МПа}$): автоклавы	Только при атмосферном давлении: горизонтальные (туннельные (шелловые)) и вертикальные камеры (с непрерывным, а чаще импульсным, передвижением изделий), пакетиروшки термоформ

Таблица 4.2

Классификация по виду используемого теплоносителя

Теплоноситель	Метод	Установки
Насыщенный водяной пар	Пропаривание	Все виды камер, термоформы, кассеты, термопосты
Горячий воздух или паровоздушная смесь с низкой и пониженной влажностью при температуре среды: $t < 100^{\circ}\text{C}$ $t > 100^{\circ}\text{C}$	Прогрев в сухой среде Высокотемпературный прогрев в сухой среде	Щелевая, ямная камеры
Продукты сгорания газа	Прогрев в среде продуктов сгорания	Щелевая, ямная камеры
Высокотемпературные жидкости	Масляный прогрев	Термоформы, кассеты
Электроэнергия	Электрообогрев, электропрогрев, индукционный прогрев	Специальные нагревательные устройства в камерах разных типов
Солнечная энергия	Прогрев с использованием солнечной энергии	В туннельных камерах с пленочным покрытием, пленочно-инвентарные покрытия на полигонах, гелиоформы
Смешанные	То же с использованием дополнительных источников	То же с дополнительными устройствами

Кроме установок для ТВО бетонных и железобетонных изделий применяются установки и устройства для подогрева и размораживания заполнителей бетона, разогрева бетонной смеси.

4.2. Теплотехнические расчеты установок

Теплотехнический расчет заключается в составлении теплового баланса установок. В общем виде это уравнение можно записать:

$$Q_{1n} + Q_{2n} = Q_{1p} + Q_{2p} + Q_{3p} + Q_{4p} \dots \quad (2)$$

В левую часть этого уравнения входит поступление теплоты от теплоносителя и за счет экзотермии цемента, в правую – расход тепла по соответствующим статьям.

Если ТУ выполнены в общем блоке (например, ямные камеры), то баланс составляется для всего блока.

1. Расчет теплового баланса для установок периодического действия производится на цикл работы, а непрерывного действия – на 1 ч.

Поступление тепла от теплоносителя
периодического действия (за 1 цикл)

$$Q_{1n} = D \cdot i_n;$$

непрерывного действия (за 1 ч)

$$Q_{1n} = d \cdot i_n, \quad (3)$$

где D, d – неизвестные значения расхода пара за цикл и за 1 ч соответственно, кг;

i_n – энтальпия пара, кДж/кг (определяется по iS-диаграмме [7]).

2. От экзотермии цемента в бетоне:

$$\begin{aligned} Q_{2n} &= q_{\text{экз}} \cdot \Pi \cdot V_{\text{и}} \cdot n_{\text{и}}; \\ Q_{2n} &= \Pi_{\text{ч}} \cdot q_{\text{экз}} \cdot \Pi \cdot V_{\text{и}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где Π – расход цемента, кг/м³;

$q_{\text{экз}}$ – количество теплоты, выделенное 1 кг цемента за счет экзотермии, кДж;

$V_{\text{и}}$ – объем бетона одного изделия в установке, м³;

$\Pi_{\text{ч}}$ – часовая производительность установки, шт.;

n – количество изделий в установке, шт.

3. Расход тепла на нагрев изделий:

$$Q_{1p} = V_{\text{и}} \cdot n_{\text{и}} \cdot \rho_{\text{б}} (t_k - t_n); \quad (5)$$

$$Q_{1p} = \Pi_{\text{ч}} \cdot V_{\text{и}} \cdot C_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{б}} (t_k - t_n), \quad (6)$$

где $C_{\text{б}}$ – теплоемкость бетона, кДж/кг°С;

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

t_k, t_n – конечная и начальная температура бетона, °С.

4. Нагрев форм и арматуры:

$$Q_{2p} = (G_{\text{ф}} + G_{\text{а}}) \cdot n_{\text{и}} \cdot C_{\text{с}} (t_k - t_n); \quad (7)$$

$$Q_{2p} = (G_{\text{ф}} + G_{\text{а}}) \cdot \Pi_{\text{ч}} \cdot C_{\text{с}} (t_k - t_n), \quad (8)$$

где G_{ϕ} – масса формы, кг;

G_a – масса арматуры в одном изделии, кг;

C_c – теплоемкость стали, кДж/кг $^{\circ}$ С;

t_k, t_n – конечная и начальная температура форм и арматуры, $^{\circ}$ С.

5. Нагрев влаги в бетоне:

$$Q_{3p} = V_n \cdot \rho_b \cdot \frac{\omega}{100} \cdot n_n \cdot C_{вл} \cdot (t_k - t_n); \quad (9)$$

$$Q_{3p} = \Pi_{\text{ч}} \cdot V_n \cdot \rho_b \cdot \frac{\omega}{100} \cdot n_n \cdot C_c \cdot (t_k - t_n), \quad (10)$$

где ω – массовая влажность бетона, %;

$C_{вл}$ – теплоемкость влаги, кДж/кг $^{\circ}$ С.

6. Испарение части влаги:

$$Q_{4p} = V_n \cdot \rho_b \cdot \frac{\omega_n - \omega_k}{100} \cdot n_n \cdot 2487; \quad (11)$$

$$Q_{4p} = \Pi_{\text{ч}} \cdot V_n \cdot \rho_b \cdot \frac{\omega_n - \omega_k}{100} \cdot n_n \cdot 2487, \quad (12)$$

где $r = 2487$ – теплота парообразования;

ω_n и ω_k – начальная и конечная влажность, %.

7. Нагрев ТУ (непрерывный – при пуске в работу и после перерывов):

$$Q_{5p} = G_y \cdot C_y (t_k - t_n); \quad (13)$$

$$Q_{5p} = \frac{G_y \cdot C_y (t_k - t_n)}{\tau_{m.o}}, \quad (14)$$

где G_y – масса установки, кг;

C_y – теплоемкость материала установки, кДж/кг $^{\circ}$ С;

$\tau_{m.o}$ – период прогрева, связанный с расходом теплоносителя, ч.

8. Потери теплоты в окружающую среду:

$$Q_{6p} = \alpha (t_{\text{ст}} - t_{\text{в}}) \cdot F \cdot 7,2 \tau_{m.o}; \quad (15)$$

$$Q_{6p} = \alpha (t_{\text{ст}} - t_{\text{в}}) \cdot F \cdot 7,2, \quad (16)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м 2 К [10];

$t_{\text{ст}}$ – температура наружной поверхности стенки;

$t_{\text{в}}$ – температура наружного воздуха;

F – поверхность тепловой установки, м 2 .

9. Потери тепла с отработанным теплоносителем:

$$Q_{7p} = D \cdot C_k \cdot t_{\text{кон}}; \quad (17)$$

$$Q_{7p} = d \cdot C_k \cdot t_{\text{кон}}, \quad (18)$$

где C_k – теплоемкость конденсата, $C_k = 4,19$ кДж/кг $^{\circ}$ С.

10. Потери тепла с паром:

$$Q_{8p} = V_{св} \cdot \rho_n \cdot i_n; \quad (19)$$

$$Q_{8p} = \frac{V_{св} \cdot \rho_n \cdot i_n}{\tau_{mo}}, \quad (20)$$

где $V_{св}$ – свободный от изделий объем установки, м³;
 ρ_n – плотность пара, кг/м³.

11. Потери тепла с утечкой пара:

$$Q_{9p} = K_7 \cdot D \cdot i_n; \quad (21)$$

$$Q_{9p} = K_7 \cdot d \cdot i_n, \quad (22)$$

где K_7 – коэффициент утечки теплоносителя через неплотности в камере, принимают 10–20% поступившего.

В уравнении баланса в левой его части неизвестным оказывается расход пара за весь период D или за час работы d установки.

Из этих значений находят удельные расходы пара на 1 м³ бетона соответственно за цикл и за час работы:

$$D_{уд} = \frac{D}{V_u \cdot N_u}; \quad d_{уд} = \frac{d}{\Pi_q \cdot V_u}. \quad (23)$$

Нормы расхода пара приведены в табл. 4.3.

Эти теплотехнические расчеты дают повышенную точность, но в то же время являются трудоемкими (прил. 1–4).

Пример расчета туннельной камеры для ТВО бордюрных камней из мелкозернистого бетона

Исходные данные:

Бордюрный камень размером 1,0×0,3×0,15 м; плотность бетона 2250 кг/м³; удельная теплоемкость бетона – 0,9 кДж/(кг×К); влажность 6%. Бетон класса В30. Расход компонентов на 1 м³: цемент – 403 кг, вода – 218 л, песок – 1411 кг. Режим тепловой обработки: подъем температуры до 80°С – 3 ч, изотермическая выдержка – 4 ч, охлаждение – 2 ч. Размер поддона 1,16×1,2×0,01. Вес поддона 25 кг.

Теплотехнический расчет

Уравнение теплового баланса в общем виде

$$Q_{1п} + Q_{2п} = Q_{1р} + Q_{2р} + Q_{3р} + Q_{4р} + Q_{5р} + Q_{6р} + Q_{7р} + Q_{8р} + Q_{9р}.$$

В левую часть уравнения входят поступления теплоты от теплоносителя и за счет экзотермии цемента. В правую часть входит расход тепла по соответствующим статьям.

Приход тепла:

1) Поступление теплоты от теплоносителя:

$$Q_{1п} = d \cdot i_{п},$$

где $Q_{1п}$ – поступление теплоты от теплоносителя, кДж;

d – неизвестное значение расхода пара за час, кг;

$i_{п}$ – энтальпия пара, кДж/кг.

$$Q_{1п} = 2660 \cdot d \text{ кДж.}$$

2) Поступление теплоты за счет экзотермии цемента:

$$Q_{2п} = П_{ч} \cdot q_{экз} \cdot Ц \cdot V_{и},$$

где $Q_{2п}$ – поступление теплоты за счет экзотермии цемента, кДж;

$q_{экз}$ – количество теплоты, выделенное 1 кг цемента за счет экзотермии, кДж/кг;

$П_{ч}$ – расход цемента, кг/м³;

$V_{и}$ – объем изделия, м³;

$П_{ч}$ – часовая производительность установки, шт.

$$Q_{2п} = 30 \cdot 500 \cdot 403 \cdot 0,045 = 272025 \text{ кДж.}$$

Расход тепла:

1) Расход теплоты на нагрев изделий:

$$Q_{1р} = П_{ч} \cdot V_{и} \cdot \rho_{б} \cdot C_{б} \cdot (t_{к} - t_{н}),$$

где $Q_{1р}$ – расход теплоты на нагрев изделий, кДж;

$\rho_{б}$ – плотность бетона, кг/м³;

$C_{б}$ – теплоемкость бетона, кДж/кг·°С;

$t_{к}$ – конечная температура бетона, °С ($t_{к} = 80^{\circ}\text{С}$);

$t_{н}$ – начальная температура бетона, °С ($t_{н} = 20^{\circ}\text{С}$).

$$Q_{1р} = 30 \cdot 0,045 \cdot 2250 \cdot 0,84 \cdot (80 - 20) = 153090 \text{ кДж.}$$

2) Расход теплоты на нагрев формы и арматуры:

$$Q_{2р} = G_{ф} \cdot П_{ч} \cdot C_{с} \cdot (t_{к} - t_{н}),$$

где $Q_{2р}$ – расход теплоты на нагрев формы и арматуры, кДж;

$G_{ф}$ – масса формы, кг;

$C_{с}$ – теплоемкость стали, кДж/кг·°С;

t_k – конечная температура стали, °C ($t_k = 80^\circ\text{C}$);
 t_n – начальная температура стали, °C ($t_n = 20^\circ\text{C}$).

$$Q_{2p} = 25 \cdot 30 \cdot 0,16 \cdot (80 - 20) = 7200 \text{ кДж.}$$

3) Расход теплоты на нагрев влаги в бетоне:

$$Q_{3p} = V_n \cdot \rho_b \cdot \frac{\omega}{100} \cdot n_n \cdot C_{вл} \cdot (t_k - t_n),$$

где Q_{3p} – расход теплоты на нагрев влаги в бетоне, кДж;

ω – весовая влажность бетона, % по массе;

$C_{вл}$ – теплоемкость воды, кДж/кг·°C ($C_{вл} = 4,19$ кДж/кг·°C);

t_k – конечная температура воды, °C ($t_k = 80^\circ\text{C}$);

t_n – начальная температура воды, °C ($t_n = 20^\circ\text{C}$).

$$Q_{3p} = 30 \cdot 0,045 \cdot 2250 \cdot \frac{6,0}{100} \cdot 4,19 \cdot (80 - 20) = 45818 \text{ кДж.}$$

4) Расход теплоты на испарение части влаги:

$$Q_{4p} = V_n \cdot \rho_b \cdot P_{ч} \cdot \frac{\omega_n - \omega_k}{100} \cdot 2487,$$

где Q_{4p} – расход теплоты на испарение части влаги, кДж;

ω_n – начальная влажность бетона, %;

ω_k – конечная влажность бетона, %;

2487 – количество тепла для перехода воды в пар, кДж/кг.

$$Q_{4p} = 0,045 \cdot 2250 \cdot 30 \cdot \frac{6,0 - 3,0}{100} \cdot 2487 = 226628 \text{ кДж.}$$

5) Расход теплоты на нагрев тепловой установки:

$$Q_{5p} = \frac{G_y \cdot C_y \cdot (t_k - t_n)}{\tau_{т.о.}},$$

где Q_{5p} – расход теплоты на нагрев тепловой установки, кДж;

G_y – масса установки, кг;

C_y – теплоемкость материала установки, кДж/кг·°C;

t_k – конечная температура установки, °C ($t_k = 40^\circ\text{C}$);

t_n – начальная температура установки, °C ($t_n = 20^\circ\text{C}$).

$$Q_{5p} = \frac{30000 \cdot 0,84 \cdot (40 - 20)}{7} = 72000 \text{ кДж.}$$

6) Потери тепла в окружающую среду:

$$Q_{6p} = K \cdot (t_{ст} - t_{в}) \cdot F \cdot 7,2,$$

где Q_{6p} – потери тепла в окружающую среду, кДж;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К;

$t_{ст}$ – температура наружной поверхности стенки, °С ($t_{ст} = 50^\circ\text{C}$);

$t_{в}$ – температура наружного воздуха, °С ($t_{в} = 20^\circ\text{C}$).

F – площадь поверхности стенки, м².

$$Q_{6p} = 4,2 \cdot (50 - 20) \cdot 177 \cdot 7,2 = 160574 \text{ кДж.}$$

7) Потери тепла с отработанным теплоносителем:

$$Q_{7p} = d \cdot C_k \cdot t_{кон},$$

где Q_{7p} – потери тепла с отработанным теплоносителем, кДж;

C_k – теплоемкость конденсата, кДж/кг·°С ($C_k = 4,19$ кДж/кг·°С);

$t_{кон}$ – температура конденсата, °С ($t_{ст} = 80^\circ\text{C}$).

$$Q_{7p} = d \cdot 4,19 \cdot 80 = 335,2 \cdot d \text{ кДж.}$$

8) Потери тепла с паром:

$$Q_{8p} = \frac{V_{св} \cdot \rho_p \cdot i_p}{\tau_{т.о.}},$$

где Q_{8p} – потери тепла с паром, кДж;

$V_{св}$ – свободный от изделия объем установки, м³;

ρ_p – плотность пара, кг/м³.

$$Q_{8p} = \frac{88,32 \cdot 0,62 \cdot 2660}{7} = 20808 \text{ кДж.}$$

9) Потери тепла с утечкой пара:

$$Q_{9p} = K_y \cdot d \cdot i_p,$$

где Q_{9p} – потери тепла с утечкой пара, кДж;

K_y – коэффициент утечки теплоносителя через неплотности в камере ($K_y = 0,1$).

$$Q_{9p} = 0,1 \cdot d \cdot 2660 = 266 \cdot d \text{ кДж.}$$

$$2660 \cdot d + 272025 =$$

$$= 153090 + 7200 + 45818 + 226628 + 72000 + 160574 + 335,2 \cdot d + 20808 + 266 \cdot d;$$

$$2660 \cdot d + 272025 = 601,2 \cdot d + 686118;$$

$$2058,8 \cdot d = 414093, \quad d = 201,13 \text{ кг;}$$

$$d_{уд} = d / \Pi_{ч} \cdot V_{и} = 201,13 / 30 \cdot 0,045 = 148,98 \text{ кг/м}^3.$$

Так как полученный удельный расход пара не превышает 220 кг/м³ (см. табл. 4.3), перерасчет не требуется.

4.3. Выбор тепловых установок

На заводах сборного железобетона применяют агрегатный, конвейерный и стендовый способы производства и их комбинации. Выбор способа зависит от типа изделий, их конструктивно-технологической характеристики и объема выпуска. Принятый способ производства служит основанием для выбора тепловой установки (ТУ), которая не относится к ведущему оборудованию цеха. Любой из названных способов производства железобетонных изделий можно обеспечить, используя тепловые установки периодического или непрерывного действия.

При поточно-агрегатном и стендовом способах производства применяют установки периодического действия (пропарочные камеры, автоклавы, термоформы, термостаты и др.). В ряде случаев поточно-агрегатные линии оборудованы ТУ непрерывного действия.

Для конвейерного способа производства изделий ТУ может быть как периодического, так и непрерывного действия (камеры, автоклавы, термоформы).

При комбинации способов ТУ может быть как периодического, так и непрерывного действия. Для выбора ТУ по режиму действия сравнивают их недостатки и достоинства.

Основные недостатки ТУ периодического действия:

1. Их трудно механизировать и автоматизировать и поэтому нельзя использовать для заводов-автоматов.
2. В них непроизводительно расходуется теплоноситель, не используется тепло конденсата пара, остывающих изделий, форм и ограждений. Все это увеличивает себестоимость тепловой обработки ЖБИ.
3. Периодический процесс приводит к недоиспользованию рабочего объема установок во время загрузки и разгрузки, что уменьшает их оборачиваемость и производительность.
4. Эти установки занимают большие производственные площади.

Стремление ликвидировать эти недостатки привело к разработке ТУ непрерывного действия, отличающихся удобством в эксплуатации, возможностью компактной укладки изделий в несколько ярусов по высоте, высоким коэффициентом использования емкости и применимостью для всех видов изделий.

Однако и эти установки не лишены некоторых недостатков. К ним можно отнести капиталоемкость и сложность ремонта механических устройств, работающих в тяжелых условиях ($t = 100^{\circ}\text{C}$, $W=100\%$).

Выбирая вид тепловых установок, учитывают расход пара в них для обработки изделий (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Средний расход пара, кг/м³, в тепловых агрегатах

Агрегат	Термическое сопротивление теплопередаче (м ² °С/Вт) для ограждений тепловых агрегатов	
	не более 0,25	не менее 1,3
Ямные камеры:		
двухсекционные	400	170
трехсекционные	350	170
четырёхсекционные	300	170
Щелевые камеры не- прерывного действия	-	220
Термоформы	-	250
Вертикальные камеры	-	120
Кассетные установки	-	200

Основные требования к тепловым установкам и показатели эффективности их работы

Тепловая установка *должна обеспечивать:*

- заданную производительность;
- получение изделий требуемого качества;
- механизированную загрузку и выгрузку изделий;
- автоматическую регулировку теплового режима;
- минимальные затраты труда по обслуживанию;
- минимальные капитальные затраты;
- высокие технико-экономические показатели.

С точки зрения экономии тепловой энергии весьма перспективны такие тепловые установки, в которых:

- используется тепло остывающих изделий;
- исключаются потери с «пролетным» паром;
- затраты на нагрев самой тепловой установки минимальны;
- потери тепла через ограждающие конструкции тепловой установки в окружающую среду сведены к минимуму.

К основным показателям эффективности работы тепловых установок относятся:

1. Удельный расход тепловой энергии q , МДж/м³:

- для установок периодического действия:

$$q = \frac{Q}{V_y}, \quad (24)$$

где Q – расход теплоты за один цикл работы тепловой установки, МДж;
 V – вместимость установки (объем находящихся в ней изделий), м³;

- для установок непрерывного действия:

$$q = \frac{Q_q}{B_q}. \quad (25)$$

2. Удельный расход теплоносителя (пара) g_n , кг/м³:

$$g_n = \frac{q}{i_n}, \quad (26)$$

где q – удельный расход тепловой энергии, МДж/м³;

i_n – энтальпия насыщенного пара при температуре изотермической выдержки, МДж/кг.

3. Коэффициент загрузки K_3 (полезного использования рабочего объема установки):

$$K_3 = \frac{B_y}{V_y}, \quad (27)$$

где B_y – вместимость установки (объем находящихся в ней изделий), м³;

V_y – рабочий объем установки, м³.

4. Коэффициент оборачиваемости $K_{об}$ (количество повторных использований установки в течение суток):

$$K_{об} = \frac{24}{\tau_{ц}}, \quad (28)$$

где 24 – число часов в сутках;

$\tau_{ц}$ – длительность цикла работы тепловой установки (продолжительность оборота), включая технологические простои, ч.

5. Мощность установки M_{my} , м³/год (расчетная годовая производительность):

- для установок периодичного действия:

$$M_{my} = B_y \cdot K_{об} \cdot K_{см} \cdot T_p, \quad (29)$$

где $K_{см}$ – коэффициент использования оборудования в течение смены;

T_p – расчетное количество рабочих суток в году, принимаемое по ОНТП-07-85.

- для установок непрерывного действия:

$$M_{my} = B_q \cdot T_q \cdot K_{см} \cdot T_p, \quad (30)$$

где B_q – объем изделий, поступающих в тепловую установку за один час, м³;

T_q – число часов работы формовочного отделения в сутки (16 или 23), ч.

6. Годовой съем продукции C_r , м³/м³, с единицы рабочего объема установки:

$$C_r = \frac{\Pi_r}{V_y \cdot N}, \quad (31)$$

где Π_r – заданная годовая программа по производству изделий (мощность линии), м³/год;

N – принятое в проекте количество тепловых установок, шт.

5. ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

5.1. Основные направления развития тепловой обработки сборного железобетона

На технический прогресс в промышленности сборного железобетона, основанный на использовании современных минеральных вяжущих, большое влияние оказывает совершенствование и развитие тепловой обработки бетона. Перевод этого процесса на новый научно-технический уровень зачастую оказывается определяющим в создании интенсивной малоэнергоёмкой технологии при прочих неизменных условиях. Опыт показывает, что совершенствование тепловой обработки изделий и освоение интенсивных тепловых методов ускорения твердения бетона позволяют комплексно оптимизировать технологический, энергетический и экологический режимы работы заводов.

При совершенствовании тепловой обработки бетона четко прослеживается тенденция ограничения процесса по энергоёмкости, продолжительности, занимаемой площади и капитальным затратам. Эта тенденция является одной из основных движущих сил развития производства сборного железобетона в направлении создания интенсивной, малоэнергоёмкой, а в перспективе безобогревной технологии.

Процесс совершенствования и развития тепловой обработки бетона в заводских условиях можно разделить на два основных направления, обеспечивающих снижение соответственно непроизводительных энергозатрат и уровня полезного энергопотребления. Первое направление – это комплекс известных методов нормализации технологического теплопотребления в промышленности сборного железобетона. Второе направление – это новые энергосберегающие технологии на основе внедрения эффективных методов и режимов теплового воздействия.

Нормализация – это первый и обязательный этап в энергосберегающей программе предприятия, технический уровень производства которого в течение длительного времени не повышался. Цель этого этапа –

повысить технический уровень проведения тепловой обработки изделий и довести технологическое теплотребление до научно обоснованных норм с помощью комплекса организационно-технических мероприятий.

В результате нормализации удастся снизить уровень технологического теплотребления на 30%, повысить коэффициент полезного использования энергии при изотермических режимах тепловой обработки изделий до 0,4–0,5 и увеличить оборачиваемость тепловых установок и форм до 1–1,5 об/сут.

Нормализованная технология становится в дальнейшем объектом внедрения новых эффективных методов тепловой обработки бетона. К таким методам, снижающим энергозатраты, но не изменяющим технологический цикл изготовления изделий, можно отнести термосные режимы тепловой обработки изделий, а также методы, при которых утилизируются нетрадиционные возобновляемые виды энергии. В тепловых установках, эксплуатируемых по термосным режимам, уровень энергозатрат не превышает 0,6–0,8 ГДж/м при КПД энергии 0,5–0,6. Применение экономичных термосных режимов с разогревом бетона до температуры 60–80°C реально для большинства заводов по производству сборного железобетона, тепловые установки которых эксплуатируются с оборачиваемостью 1,0 и 1,5 об/сут. С таким же технологическим циклом может быть реализована энергосберегающая технология тепловой обработки бетона с утилизацией в соответствующих условиях энергии солнца или геотермальных вод. При использовании указанных возобновляемых видов энергии в так называемых гидроаэроциркуляционных камерах расход топлива может быть сокращен в 1,5–2 раза.

Новое технологическое решение при совершенствовании тепловой обработки бетона считается более результативным и эффективным, если наряду с энергосбережением повышается производительность оборудования и снижается фондоемкость производства.

Повысить оборачиваемость тепловых установок и сократить количество камер периодического действия или длину туннельных камер позволяют режимы с ограниченным тепловым импульсом. Продолжительность активной тепловой обработки бетона при этих режимах ограничивается моментом достижения стадии твердения бетона с максимальной скоростью. Дальнейшая выдержка изделий может осуществляться в режиме остывания вне камер, причем кинетика твердения бетона практически соответствует росту прочности при изотермическом режиме. Энергетический эффект от применения режимов с ограниченным импульсом оценивается экономией 15–30% тепловой энергии в зависимости от исходного энергопотребления при традиционных изотермических режимах.

Эффективность внедрения перечисленных прогрессивных тепловых режимов может быть резко увеличена с переходом на ускоренные методы разогрева бетона (со скоростью, превышающей 20°C/ч). Высоко-

скоростной разогрев может быть осуществлен либо путем прогрева бетона после формования изделий в условиях, исключающих деструктивные процессы, либо предварительным разогревом бетона с получением теплотой (40–60°C) или горячей (> 60°C) бетонной смеси.

Эффективность интенсивных тепловых методов может быть повышена применением химических добавок - ускорителей твердения, пластификаторов и комплексных добавок. Кардинально решить проблему технологического теплопотребления можно с помощью новых вяжущих с таким потенциалом твердения цементного камня, при котором можно резко ограничить или исключить тепловую обработку бетона.

Перечисленные методы ускорения твердения бетона отражают основные направления и этапы совершенствования и развития тепловой обработки изделий сборного железобетона. Все эти методы, отличающиеся уровнем снижения энергоемкости и различной степенью интенсификации производства, подробно рассмотрены в последующих разделах.

5.2. Сокращение непроизводительных энергозатрат и повышение эффективности тепловых установок

5.2.1. Организационно-технические мероприятия по рациональному использованию энергии при тепловой обработке бетона

Минимизация непроизводительных энергозатрат и реализация существующих норм технологического теплопотребления без реконструкции и технической модернизации заводов сборного железобетона достигаются внедрением комплекса организационно-технических мероприятий.

Автоматизация тепловой обработки бетона. Известно, что главными причинами непроизводительного расхода энергии являются отсутствие регулирования расхода пара в процессе тепловой обработки и утечка пара через дефектные гидравлические затворы, ограждающие конструкции и паропроводы камер. Устранение этих причин в сочетании с устройством в камерах эффективных систем распределения пара и конденсатоотводоов и внедрением режимов с минимально необходимым временем теплопотребления позволяют резко снизить энергозатраты, повысить качество продукции и показатели производства. Одним из показателей технического уровня производства сборного железобетона является степень автоматизации технологических процессов и, в частности, тепловой обработки. Регулируемая или автоматически дозируемая подача пара, реализующая оптимальные тепловые режимы, может быть обеспечена различными средствами автоматики. Автоматические регуляторы температуры программного типа, стабилизируя режимы тепловлажностной обработки бетона в тепловых условиях, улучшают работу систем теплоснабжения завода в целом.

Теплоизоляция тепловых установок. Усовершенствовать тепловые установки и, в частности, камеры паропрогрева в теплотехническом отношении можно путем оптимизации их ограждающих конструкций. В пропарочных камерах со стенками толщиной 20-40 см из тяжелого бетона до 40 % тепловой энергии расходуется на их нагревание и потери при охлаждении. С целью снижения этих потерь стенки следует сооружать из материалов малой тепловой емкости и теплопроводности.

Теплоизоляция систем теплоснабжения. При нормализации технологического теплопотребления не следует пренебрегать экономией тепловой энергии топлива за счет теплоизоляции теплотрасс и паропроводов. На многих заводах сборного железобетона значительная часть паропроводов не теплоизолирована. Теплопотери 1 м такого паропровода с условным проходом 25–150 мм достигают в среднем 1250 кДж/ч при разности температур теплоносителя и среды 80°C. Норма тепловых потерь при тех же условиях составляет в среднем 150 кДж/ч. Тепловые потери паропровода, защищенного теплоизоляцией с коэффициентом теплопроводности 0,046–0,185 Вт/(м°C), равны при тех же условиях в среднем примерно 80 кДж/ч. Теплопотери сокращаются в 15 раз, и для завода годовой мощностью 100 тыс.м³ бетона экономия составит 30–50 т у.т.

Балансовые испытания. Энергетический баланс является важной характеристикой состояния энергетического хозяйства предприятия и отражает количественное соотношение между суммарной подведенной энергией (приходом) и суммарной потребленной энергией (расходом), состоящей из полезной энергии и потерь.

Внедрение энергосберегающих мероприятий, улучшающих работу технологического оборудования, должно быть учтено в работе энергогенерирующего оборудования с целью нормализации режима выработки энергоносителя (характер тепловой нагрузки, мощность выработки пара средняя и максимальная, количество действующих паровых котлов и режим их работы).

По качественному признаку, характеризующему уровень энергоиспользования, энергетические балансы подразделяются на рациональные, нормализованные и оптимальные.

Рациональный энергетический баланс отражает уровень энергоиспользования с учетом мероприятий по снижению расхода топлива и энергии без реконструкции основного оборудования.

Нормализованный энергетический баланс определяет уровень энергоиспользования, соответствующий научно обоснованным нормам расхода топлива и энергии.

Оптимальный энергетический баланс соответствует такому варианту энергоснабжения и энергоиспользования, при котором выпуск заданного количества продукции осуществляется с максимальной эффективностью по энергосбережению.

Указанные виды энергетических балансов характеризуют этапы развития производства с оценкой их по эффективности энергоиспользования.

Повышение равномерности и интенсивности теплообмена.

Энергоемкость тепловой обработки бетона, качество этого процесса и обрабатываемых изделий зависят от условий теплообмена в тепловых установках. Максимальные интенсивность теплообмена и эффект ускорения твердения бетона достигаются в камерах прогрева изделий острым паром. Известно немало технических решений упорядоченного распределения пара по объему камеры с целью равномерного и быстрого прогрева всех изделий при различных коэффициентах загрузки камер.

Наиболее быстрое выравнивание температуры среды по высоте камер достигается путем равномерной подачи пара из перфорированной трубы диаметром 50–60 мм, уложенной по периметру камеры на высоте 70–200 мм от уровня пола. Существенными факторами являются направление и скорость выпуска пара. Наблюдения и расчеты показывают, что при выпуске пара из отверстий диаметром 5 мм со скоростью 200–250 м/с выравнивание температуры по высоте ямной камеры достигается в течение 1,5–2 ч. Струя пара, направленная с большой скоростью вверх, создает циркуляцию паровоздушной среды в камере и подсасывание воздуха из промежутков между изделиями.

Пар высокого давления (0,4–0,5 МПа) хорошо распределяется системой, состоящей из верхнего и нижнего коллекторов и внешнего эжектора. При использовании пара с низким давлением целесообразно осуществлять его распределение в камере с помощью перфорированных вертикальных стояков.

Выравнивание температуры паровоздушной среды и регулирование подачи пара обеспечивают также эжекторы-терморегуляторы.

Интенсивный и равномерный прогрев изделий, уложенных в штабель на пакетирующий камеры, может быть достигнут с помощью многэтажного парораспределения. Это могут обеспечить, например, поворотные регистры, входящие в зазоры между изделиями. Такое решение эффективно при использовании высоких штабелей, а также при необходимости создания зоны ускоренного прогрева изделий в камерах непрерывного действия.

5.2.2. Экономичные тепловые установки с теплоизолированными ограждениями

Методика оптимизации тепловой обработки бетона в направлении ее интенсификации и снижения удельной энергоемкости зависит от многих технологических факторов и, в частности, от применяемых технологий и тепловых установок.

Энергетическое совершенствование тепловых установок заключается в сокращении удельных энергозатрат путем повышения теплового КПД и коэффициента теплотехнического совершенства технологического процесса.

Эффективным средством повышения теплового КПД установок, особенно энергозатратных пропарочных камер, в настоящее время является теплоизоляция ограждающих конструкций, сокращающая теплоемкость ограждений и потери тепла в окружающую среду.

Значительное снижение тепловой емкости ограждений может быть достигнуто при устройстве дополнительного теплоизоляционного слоя на внутренней поверхности стенок камер периодического действия. При этом снижаются и потери тепла в окружающую среду за счет увеличения термического сопротивления стен, особенно керамзитобетонных.

Повышением термического сопротивления ограждающих конструкций до $0,8\text{--}1,0 \text{ (м}^2 \times ^\circ\text{C)/Вт}$ и более теплотребление можно сократить почти вдвое.

Научными и проектными организациями разработано много эффективных технических решений ограждающих конструкций камер (стен, днища, крышек) для различных условий их эксплуатации.

Наиболее простым решением повышения эффективности пропарочных камер является замена в ограждающих конструкциях тяжелого бетона керамзитобетоном с гидрофобизирующими добавками (рис. 5.1) и гидрозащита внутренней поверхности латексным составом ЛСП-904 или гидроизоляционной гидробутиловой пленкой. Однако подобные камеры имеют КПИ не выше 50 %.

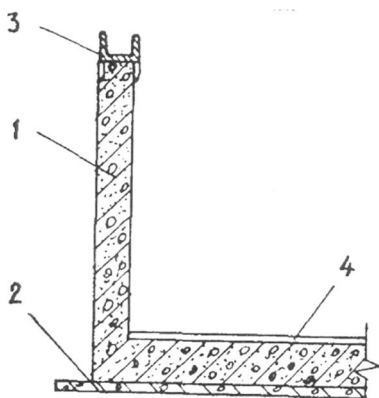


Рис. 5.1. Эффективное ограждение из сборного и монолитного керамзитобетона для пропарочных камер:

- 1 – керамзитобетон; 2 – бетонная подготовка;
- 3 – гидравлический затвор; 4 – цементная стяжка

Более совершенными являются камеры с теплоизоляцией, выполненной из различных теплоизоляционных материалов, отличающихся коэффициентом теплопроводности $0,02 - 0,10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$, плотностью $40-400 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Известные технические решения теплоизолированных ограждений камер: теплозащитный слой с гидрозащитой стальным листом (рис. 5.2), экранная изоляция с воздушными прослойками (рис. 5.3) и др., отличающиеся видом теплоизоляционного материала, способом паро- и гидрозащиты теплоизоляции, выбираются каждым конкретным заводом на основе расчета экономического эффекта, капитальных затрат и срока их окупаемости.

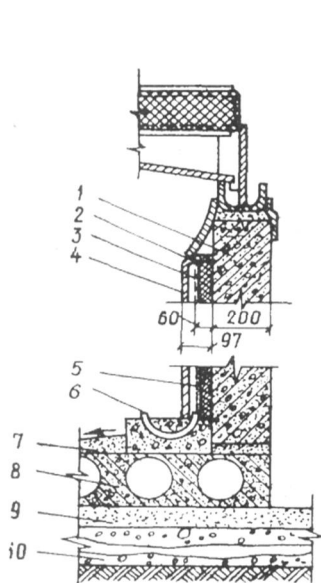


Рис. 5.2. Ограждение пропарочной камеры с теплоизоляцией и ее гидрозащитой стальным листом:

- 1 – железобетон; 2 – утеплитель;
- 3 – фольгоизол или фольга;
- 4 – стальная обшивка;
- 5 – воздушная прослойка;
- 6 – гидрозащитор; 7 – цементная стяжка; 8 – легкобетонная панель;
- 9 – песчаная подготовка;
- 10 – керамзитовый гравий

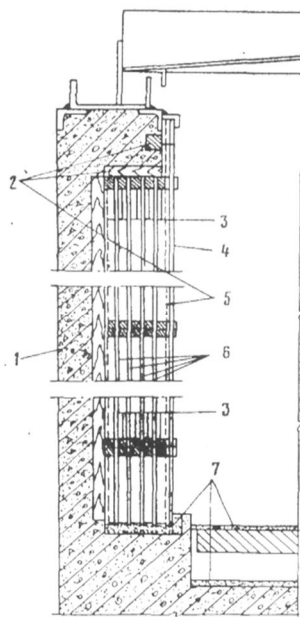


Рис. 5.3. Наружное ограждение камеры с экранной изоляцией:

- 1 – железобетон; 2 – деревянные бруски; 3 – деревянные прокладки;
- 4 – асбоцементный лист;
- 5 – фольгоизол или фольга;
- 6 – экраны; 7 – цементная стяжка

Наиболее распространенным типом малоинерционных пропарочных камер являются камеры с внутренним теплоизоляционным слоем из традиционных утеплителей: пенопластов, пеностекла, минераловатных плит. Эти материалы в условиях паровоздушной среды быстро насыщаются влагой и теряют свои теплозащитные свойства, поэтому необходима их паро- и гидрозащита. Наиболее надежной является защита стальным листом. Однако следует отметить такие ее недостатки, как дефицитность листовой стали толщиной 3–4 мм, трудоемкость изготовления и необходимость антикоррозионной защиты.

Сборная экранная теплоизоляция также не лишена недостатков, главными из которых являются трудоемкость изготовления, старение стеклопластика, коробление асбестоцементных листов в условиях высоких температуры и влажности.

Анализ существующих конструктивных решений малоинерционных пропарочных камер явного типа показал, что задача создания технологичных ограждающих конструкций, одинаково пригодных для новых и реконструируемых камер, может быть оптимально решена при наличии материала, сочетающего необходимые тепло- и гидроизоляционные свойства.

Создание ограждающих конструкций с использованием таких материалов представляет собой новое направление в конструировании пропарочных камер.

К теплогидроизоляционным материалам можно отнести асфальтовые и цементные гидрофобизированные бетоны на пористых заполнителях, эпоксидные пенопласты и сферопласты.

Однако вследствие больших значений плотности и теплопроводности гидрофобизированные бетоны следует признать малопригодными для внутренней теплоизоляции камер.

Хорошие теплофизические свойства, малая плотность и высокая теплостойкость эпоксидных пенопластов позволяют считать их перспективными материалами для теплоизоляции пропарочных камер.

Сферопласты образуют особую группу газонаполненных пластмасс, состоящих из полимерной матрицы и полых сферических частиц наполнителя из стекла, металла, полимера и керамики. Хотя сферопласты обладают высокими теплогидроизоляционными свойствами, применять их для теплоизоляции камер нецелесообразно из-за дефицитности наполнителей.

На основе совмещения эпоксидного пенопласта с крупнопористым заполнителем может быть создан эффективный теплогидроизоляционный материал – пенополимербетон, сохраняющий высокие теплозащитные свойства в паровоздушной среде с температурой 80–100°C.

Оптимальная толщина пенополимербетонной облицовки составляет 50 мм, что позволит снизить агрегатный расход тепловой энергии почти вдвое. С помощью этого материала можно покрывать внутреннюю поверхность камер без дополнительной паро- и гидрозащиты.

5.3. Энергосберегающие режимы ТВО бетона

5.3.1. Термосные тепловые режимы

Оптимизация тепловых режимов является наименее затратным методом совершенствования тепловой обработки бетона, способствующим снижению энергоемкости процесса и повышению его научно-технического уровня.

Энергосберегающим методом, оптимально связывающим существующие технику и организацию производства с кинетикой твердения и прочностью бетона, является термообработка изделий с применением термосных режимов.

При термосных режимах выдержка разогретых изделий осуществляется без энергозатрат на стабилизацию температуры. Минимально необходимая температура разогрева бетона назначается в зависимости от вида и группы цемента, марки бетона, требуемой оборачиваемости тепловых установок за сутки, заданной распалубочной прочности бетона и параметра, характеризующего тепловую инерцию или длительность остывания тепловой установки с изделиями в условиях конкретной окружающей среды.

Показатель тепловой инерции, например, пропарочных камер в зависимости от их конструкции колеблется в широких пределах: от 10 до 150 и более. Этот показатель определяет скорость остывания изделий и, следовательно, температуру их разогрева. Чем больше этот показатель, тем ниже может быть температура разогрева и выше уровень экономии энергии. При снижении температуры разогрева бетона с 80 до 50–60°C расход тепловой энергии сокращается на 30–40%. Снижению температуры разогрева способствует также режим твердения изделий с выдержкой их после распалубки не менее 12 ч в цехе.

При назначении термосных режимов следует учитывать, что с увеличением распалубочной или передаточной прочности резко повышается расход энергии на разогрев бетона. При увеличении задаваемой прочности с 50 до 70 % от марки бетона расход тепловой энергии возрастает в 1,5–2,0 раза. В связи с этим следует стремиться к назначению минимально возможных в местных условиях значений регламентируемой прочности бетона, учитывая последующий прирост прочности на стадии выдержки изделий в цехе и на складе при положительной температуре воздуха. Применение химических добавок также позволяет снизить температуру разогрева: на 10–20°C при использовании ускорителей твердения и на 20–30°C – суперпластификаторов для бетонов, термообрабатываемых по термосным режимам.

Термосные режимы – это реальный, наиболее дешевый и доступный для современного производства энергосберегающий способ термо-

обработки изделий сборного железобетона. Принятая на предприятиях сборного железобетона система организации труда предполагает в основном суточный цикл изготовления изделий при среднем коэффициенте суточной оборачиваемости 1,12. Такое положение приводит к тому, что длительность нахождения изделий в разогретых до температуры 80–85°C агрегатах намного превышает необходимое время тепловой обработки. Избыточное тепловое воздействие на бетон приводит к перерасходу энергии и снижению на 10–15% прочности бетона в 28-суточном возрасте. Вынужденно длительный цикл тепловой обработки создает предпосылки для внедрения низкотемпературных (50–70°C) термосных режимов, обеспечивающих лучшие условия структурообразования в цементном камне без температурных напряжений в материале. Известно также, что при мягких режимах тепловой обработки с температурой бетона 40–60°C эффективно используется экзотермия образования цементного камня.

Достоинства термосных режимов:

- появляется возможность применения «мягких» режимов тепловой обработки, приводящих к повышению качества и долговечности выпускаемой продукции;
- снижаются расходы тепловой энергии и вяжущего вещества (цемента);
- резко сокращаются непроизводительные потери с «пролетным» паром, так как большую часть времени теплоноситель в тепловую установку не подается;
- значительно улучшаются условия работы по причине меньшего парения тепловых установок;
- при использовании продуктов сгорания природного газа устраняется опасность пересушки изделий.

При термосных режимах максимальную температуру прогрева можно понизить (рис. 5.4).

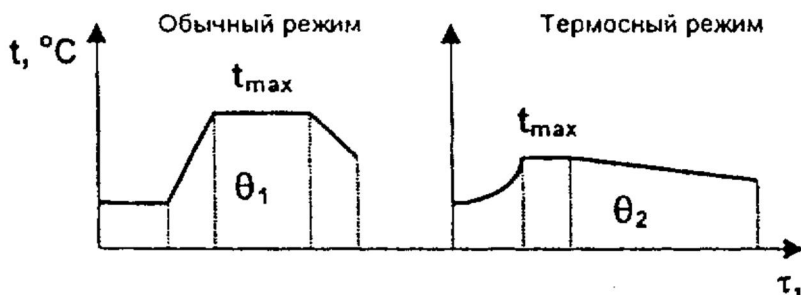


Рис. 5.4. Расчет и назначение термосного режима взамен обычного

После определения термосного режима необходима проверка его на опытной партии изделий с уточнением принятого режима ТВО.

При этом в обоих случаях определяются площади θ , °С·ч, находящиеся между графиком тепловой обработки и осью времени, по формуле:

$$\theta = \sum_{\tau_0}^{\tau_3} t \cdot \tau. \quad (37)$$

где t и τ – температура и продолжительность соответствующей стадии или периода тепловой обработки, °С и ч.

В результате проведенных расчетов в обоих случаях должно соблюдаться равенство количества градусо-часов, полученных изделия-ми:

$$\theta_1 = \theta_2. \quad (38)$$

Недостатки термосных режимов:

- увеличивается потребность в формах;
- увеличивается количество тепловых установок.

Количество тепловых установок можно не увеличивать и даже значительно уменьшить, если увеличить их вместимость (например, увеличить глубину установки, высоту крышек и т.п.).

5.3.2. Режимы тепловой обработки бетона с ограниченным тепловым импульсом

ВНИИжелезобетоном разработана методика определения энерго-сберегающих тепловых режимов с оптимальной продолжительностью активного периода термообработки и удельной энергоемкостью [31–33].

Согласно этой методике находят минимально необходимую продолжительность теплотребления при заданных скорости и температуре разогрева бетона. Методика основана на зависимости между кинетикой твердения бетона и его энергетическим состоянием.

Установлено, что, начиная с определенного момента твердения бетона, подводимая тепловая энергия не оказывает существенного влияния на динамику твердения и величину прочности (рис. 5.5). Такой границей рациональной продолжительности теплотребления является момент достижения зоны максимальной скорости роста прочности бетона на графике кинетики его твердения. Уровень достигаемой при этом прочности составляет 25–35% от проектной величины. После этого теплоподвод может быть прекращен, а изделие выдерживается до достижения заданной распалубочной прочности в режиме остывания. При этом, если скорость остывания бетона не превышает определенное критиче-

ское значение, характер его твердения практически не отличается от кинетики роста прочности при изотермическом режиме.

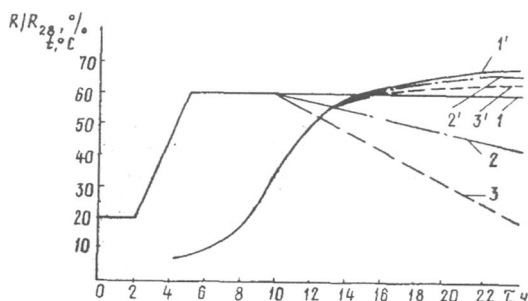


Рис. 5.5. Режимы тепловой обработки бетона на цементе М500 (В/Ц = 0,4):

I – изотермический; 2,3 – с ограниченным тепловым импульсом с разной интенсивностью охлаждения бетона; 1', 2', 3' – кинетика прочности бетона при этих режимах соответственно

Указанная временная граница на кривой изменения прочности бетона может служить временем выгрузки изделий из камеры для последующей их выдержки в цехе с температурой воздуха не ниже 15°C.

Таким образом, в отличие от термосных режимов тепловые режимы с ограниченным импульсом наряду с энергосбережением позволяют увеличить оборачиваемость тепловых установок.

Высокая результативность указанных режимов, не требующих капитальных вложений при их внедрении, характеризует данное энергосберегающее мероприятие как эффективное и доступное для заводов сборного железобетона.

5.4. Эффективные методы тепловой обработки бетона с использованием нетрадиционных энергоносителей

Высококачественный, традиционный, повсеместно применяемый энергоноситель – насыщенный пар – позволяет успешно решать задачи интенсификации производства сборного железобетона. Подробно разработанная в настоящее время и развиваемая научно-техническая оптимизация тепловой обработки бетона позволяет высокоэффективно использовать пар, обеспечивая требуемое качество изделий и оборачиваемость техники при удельной энергоемкости 0,3–0,6 ГДж/м³.

Однако пар или паровоздушная смесь, получаемые централизованно от ТЭЦ или котельных, не являются единственными теплоносителями.

лями. Малоэнергоемкие режимы тепловой обработки могут быть достигнуты при использовании нетрадиционных энергоносителей, например продуктов сгорания природного газа, горячего масла, электроэнергии, а также тепловой энергии возобновляемых источников (солнечной, геотермальной).

Однако применение перечисленных нетрадиционных энергоносителей должно быть экономически обосновано с учетом вида изделий, технологии их изготовления, теплофизических возможностей теплоносителя и определением решающего фактора в пользу применения нового энергоносителя. Такими факторами могут быть, например, отсутствие технологического пара, эффективный высокоравномерный теплоподвод к бетону, обеспечение требуемого влагосодержания в бетоне, пониженная фондоемкость, удобство автоматизации, улучшенные условия труда и т.д.

5.4.1. Тепловая обработка бетона продуктами сгорания природного газа

Около 45% производимого в стране сборного железобетона обрабатывается паром, получаемым при сгорании природного газа. Далеко не весь объем этого бетона производится с энергоемкостью на уровне 0,3–0,6 ГДж/м³. Снизить фактические энергозатраты на 20–25% можно путем использования для тепловой обработки бетона непосредственно продуктов сгорания природного газа. При этом исключаются потери тепловой энергии при транспортировке пара (10–15 %) и конденсата (около 10%).

Для получения продуктов сгорания газа в камерах последние должны быть укомплектованы автономными теплогенераторами, к которым подводится природный газ.

Прогрев изделий продуктами сгорания природного газа осуществляется в обычных ямных, напольных, туннельных и щелевых камерах с помощью теплогенераторов.

После загрузки изделий в камеру ее закрывают крышкой и включают рециркуляционный вентилятор. Отбираемая из камеры среда (сначала это воздух) поступает по рециркуляционной трубе обратно в камеру.

Продукты сгорания, вырабатываемые горелкой, подмешиваются к циркулирующему теплоносителю, повышая его температуру по заданному режиму. Высокая скорость подачи продуктов сгорания в камеру (до 25 м/с) повышает равномерность состава и температуру среды в камере.

Каждая камера периодического действия оборудуется индивидуальным теплогенератором, а камеры непрерывного действия оснащаются теплогенераторами, распределенными по тепловым зонам.

Известно, что газовый теплоноситель по сравнению с паром имеет невысокий коэффициент теплоотдачи или теплообмена. Поэтому, несмотря на высокую температуру продуктов сгорания (130–140°C), дан-

ный способ не позволяет интенсифицировать разогрев бетона и получить более короткие циклы термообработки. В связи с этим этот способ может быть эффективен лишь при условии более экономичного потребления топлива по сравнению не с фактическим, а с оптимизированным паропрогревом.

Достигнутая при этом способе удельная технологическая энергоёмкость составляет 0,3–0,5 ГДж/м³.

5.4.2. Применение низкотемпературного теплоносителя на основе традиционных и возобновляемых видов энергии

К числу энергосберегающих методов тепловой обработки сборного железобетона относится метод обогрева изделий в среде низкотемпературного (50–70°C) теплоносителя, для получения которого могут быть использованы традиционные энергоносители (газ, электроэнергия), возобновляемые виды энергии (солнечная, геотермальная), а также производственные низкотемпературные отходы (конденсат, оборотные воды горячего водоснабжения).

Требуемая для нагрева бетона до температуры 60–70°C паровоздушная смесь с температурой не более 80°C создается непосредственно в пропарочной камере.

Генератором низкотемпературной паровоздушной смеси является гидроаэроциркуляционная (пузырьковая) камера (рис. 5.6). В качестве теплоаккумулирующей и теплопередающей среды в этих камерах используется вода, циркулирующая по замкнутому контуру с насосом, водоподогревателем, паровоздушными эжекторами и перфорированными трубами, погруженными в водяную ванну камеры.

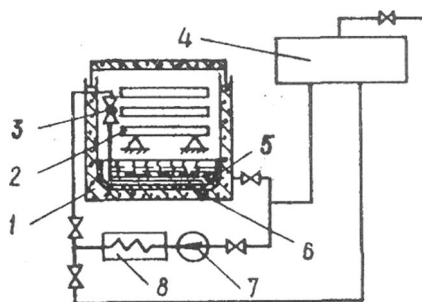


Рис. 5.6. Гидроаэроциркуляционная пропарочная камера:

- 1 – камера; 2 – железобетонное изделие;
- 3 – паровоздушный эжектор; 4 – бак-аккумулятор;
- 5 – ванна; 6 – перфорированная труба; 7 – насос; 8 – водоподогреватель

Бак-аккумулятор предназначен для накопления горячей воды. Циркуляция низкотемпературной паровоздушной смеси с требуемыми температурой и влажностью и необходимый теплообмен в камере создаются в результате реализации так называемого «пузырькового» режима барботажного аэрирования воды.

Таким образом, гидроаэроциркуляционная камера – это агрегат с автономной выработкой паровоздушного теплоносителя на основе несложного оборудования, позволяющего использовать нетрадиционные возобновляемые энергоносители и вторичные энергоресурсы.

Исследования показали, что «пузырьковый» режим барботажного аэрирования воды повышает интенсивность разогрева среды и бетона изделий примерно в 1,5 раза по сравнению с режимом разогрева изделий в камере с заглушенными эжекторами.

Благодаря принудительной конвекции насыщенного влагой теплоносителя бетон изделий разогревается со скоростью, близкой к скорости повышения температуры среды в камере. Это исключает образование конденсата на поверхности изделий и испарение влаги из бетона. Незначительные градиенты температуры и влагосодержания ограничивают интенсивность внутреннего переноса влаги, что положительно влияет на физико-механические характеристики бетона.

Теплоэнергетический анализ показал, что в случае применения предварительно разогретой воды время и энергозатраты на разогрев изделий в камере сокращаются примерно на 20 %.

Запас предварительно подогретой воды может быть создан в специальных емкостных тепловых аккумуляторах, использующих какой-либо возобновляемый вид энергии, например солнечную, или традиционный источник энергии, например, электроэнергию в часы внепиковой нагрузки энергосистемы.

Энергетический эффект от предварительного нагрева воды теплом, например солнечной энергии зависит от ее доли в энергетическом балансе тепловых установок. При частичном использовании солнечной энергии (25–30% от общих энергозатрат) потребление топлива по сравнению с нормативным паропрогревом может быть сокращено на 15–20 %.

Однако следует подчеркнуть, что пузырьковая камера – это тепловая установка, осуществляющая низкотемпературный разогрев бетона. Низкотемпературная паровоздушная смесь с коэффициентом теплоотдачи при принудительном конвективном теплообмене, не превышающим $60 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$, и температурой не более 80°C не может интенсифицировать прогрев по сравнению с традиционным паропрогревом и сократить цикл тепловой обработки. Поэтому в основе ожидаемого экономического эффекта лежит главным образом энергосбережение. В связи с этим применение пузырьковых камер может быть экономически обосновано при использовании возобновляемых видов энергии, причем доля этой энергии в тепловом балансе камеры должна быть не менее 50%.

Таким образом, рассмотренная технология тепловлажностной обработки бетона в среде низкотемпературного теплоносителя является эффективной по энергосбережению и технической возможности использования возобновляемых видов энергии для технологических нужд заводов сборного железобетона.

5.4.3. Применение масла как теплоносителя в технологии термообработки бетона

Экономичные, малоэнергоемкие и компактные тепловые системы для нагрева отформованных железобетонных и бетонных изделий могут быть созданы при использовании в качестве теплоносителя масла. Широкомасштабного применения масляный теплоноситель иметь не может, и системы на его основе, как правило, разрабатываются для выпуска определенных изделий и являются неотъемлемой частью конкретной технологической линии.

Реализуемый с помощью таких систем контактно-кондуктивный прогрев бетона рационален для тепловой обработки высоко- и среднемодульных изделий в кассетах, термоформах и стендовой опалубке других видов.

При отсутствии технологического пара масляный обогрев является высокоэкономичным, позволяющим организовать тепловую обработку изделий при любом первичном источнике энергии (газе, электроэнергии).

Масляный обогрев и системы на его основе перспективны при создании мобильных установок по производству железобетонных строительных материалов массового спроса (плит, блоков, камней и т.д.).

Легко управляемая система генерирования тепловой энергии и ее передачи к объекту нагрева обеспечивает широкий диапазон параметров теплообмена. Регулируемые температура (60–300°C) и скорость циркуляции масла позволяют легко оптимизировать режимы тепловой обработки бетона и реализовать при необходимости высокоскоростные и высокотемпературные режимы прогрева бетона под давлением.

5.5. Энергосберегающие методы применения теплого (предварительно разогретого) бетона

Высокопроизводительный завод с минимальными энерго- и фондоемкостью может быть создан на основе технологии тепловой обработки с применением теплого бетона и режима с ограниченным тепловым импульсом.

Под теплым бетоном понимают свежеприготовленную бетонную смесь, собственная температура которой выше температуры окружающей среды. Повышенная температура свежеприготовленного бетона способ-

ствует более интенсивному его твердению по сравнению с традиционным паропрогревом.

Применение теплой бетонной смеси в производстве сборного железобетона возможно при условии восполнения и сохранения подведенного к бетону тепла в течение времени, которое определяется режимом ограниченного теплового импульса. Метод применения теплого бетона в сочетании с режимом ограниченного теплового импульса позволит в 1,8–2 раза сократить время достижения бетоном распалубочной (50%) и передаточной или отпускной прочности (70%).

Получение теплого бетона в технологии изготовления железобетонных изделий возможно на основе различных методов паро- и электропрогрева. При этом в условиях одного производства возможно сочетание централизованного и децентрализованного приготовления теплого бетона. Для централизованного приготовления теплого бетона предлагается метод паропрогрева составляющих бетонной смеси: щебня, песка и воды. Для децентрализованного приготовления теплого бетона на отдельных технологических линиях предлагаются методы электро- или паропрогрева бетонной смеси.

При использовании предварительно разогретых бетонных смесей эффект ускорения твердения бетона, обеспечивающий двух- и трехкратный оборот форм в сутки, возможен при условии минимальных технологических влаго- и теплопотерь и соблюдения необходимой длительности изотермической или термосной выдержки изделий.

Термосная или изотермическая выдержка железобетонных изделий может осуществляться в камерах периодического и непрерывного действия, термоформах, термопакетах, кассетных установках или под термоколпаками. В качестве источника тепловой энергии могут быть использованы водяной пар, паровоздушная смесь, горячий воздух, электроэнергия, продукты сгорания природного газа, а также энергия возобновляемых источников.

Продолжительность выдержки, определяющая фондоемкость тепловой обработки, зависит от вида цемента, марки бетона, распалубочной прочности, температуры и определяется как параметр режима с ограниченным тепловым импульсом. Искомое время ограничивается достижением максимальной скорости роста прочности на кривой кинетики твердения бетона. Прочность бетона, набираемая к этому времени, составляет 20–30% от марочной. Дальнейшее твердение бетона может осуществляться вне тепловой установки при остывании в среде цеха с положительной температурой. При этом время достижения распалубочной прочности практически не увеличивается.

Эффект интенсификации твердения бетона выражается в 1,5–2-кратном сокращении цикла термообработки по сравнению с традиционным паропрогревом. При этом уровень технологических энергозатрат сводится до 0,25–0,40 ГДж/м³, а КПИ энергии повышается до 0,80–0,85.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЯМНОЙ ПРОПАРОЧНОЙ КАМЕРЫ

Исходные данные:

1. Вид изделия.
2. Геометрические размеры изделия, м:
длина – l ,
ширина – b ,
высота – h .
3. Масса изделия – $G_{и}$, кг.
4. Объем бетона в изделии – $V_б$, $м^3$.
5. Объем одного изделия – $V_{и}$, $м^3$.
6. Расход арматуры на 1 $м^3$ бетона – $G_{аб}$, кг.
7. Расход арматуры на 1 изделие – G_a , кг.
8. Водоцементное отношение – B/C .
9. Марка цемента – $M_ц$.
10. Марка бетона – $M_б$.
11. Масса бетона в изделии – $G_б$, кг.
12. Объемная масса бетонной смеси
$$\rho = G_ц + G_в + G_п + G_{щ}$$
13. Расход материалов на 1 $м^3$, кг:
цемент – $G_ц$,
вода – $G_в$,
песок – $G_п$,
щебень – $G_{щ}$.
14. Вес сухих веществ на 1 $м^3$ – $G_{сб}$, кг.
15. Вес сухих веществ на 1 изделие, кг
$$G_{с1} = G_{сб} \cdot V_б$$
16. Количество воды вступившее в реакцию с вяжущим (принимается по литературным данным):
$$G_{вс} = G_ц \cdot a_1,$$

где a_1 – степень гидратации, $a_1 = 0,23$.

17. Масса формы – $G_ф$, кг.

Для расчета массы формы ориентировочно можно пользоваться значениями удельной металлоемкости, характеризующей отношение массы формы к единице объема, изготавливаемого в ней изделия или изделий, по табл. П1.1.

18. Размеры формы, м:

длина – l_{ϕ} ,
 ширина – b_{ϕ} ,
 высота – h_{ϕ} .

Таблица П1.1

Значения удельной металлоемкости

Изделия	Удельная металло- емкость, т/м ³
Плиты:	
перекрытия жилых и общественных зданий	1,1–1,8
покрытий производственных зданий	
ребристые длиной 6 и 12 м	2,7–3,4
Панели стеновые:	
жилых зданий одномодульные	1,3–2,1
жилых зданий двухмодульные	1,8–2,0
производственных зданий двумодульные	0,8–1,3
Балки покрытий, фундаментные, обвязочные	
пролетом 6 м	1,0–1,2
Ригели, прогоны пролетом до 18 м	
(формование в горизонтальном положении	
с паровыми лопастями)	1,8–2,1
Ригели, прогоны пролетом до 18 м	
(формование в рабочем положении)	2,6–3,0
Сваи, колонны прямоугольного сечения:	
Многоэтажных производственных зданий	
длиной более 6 м	0,6–0,8
то же менее 6 м	1,4–1,7
одноэтажных производственных зданий	
длиной более 6 м	0,8–1,2
то же менее 6 м	1,7–2,5

19. Температура загружаемых изделий – t_0 , °С.
20. Температура окружающей среды – t_{oc} , °С.
21. Начальная температура в камере – t_1 , °С.
22. Температура изотермической выдержки – $t_{из}$, °С.
23. Температура изделий при выгрузке из камеры – $t_{ох}$, °С.
24. Удельная теплоемкость бетона – c_6 , Дж/кг · град.
25. Коэффициенты:
 - теплопроводности бетона – λ_6 , Вт/м · град;
 - температуропроводность бетона – a_6 , м²/ч.

26. Прочность бетона после тепловлажностной обработки $R_{\text{тво}}$, МПа.

Определение размеров пропарочной камеры

1. Число изделий, уложенных в камере – N_1 , шт.

Количество изделий, уложенных в камере, определяется по эскизу из изображения максимальной загрузки камеры. При этом необходимо учитывать следующие расстояния:

от стен до формы – 50–100 мм;

от дна камеры до нижней формы – 50–100 мм;

между верхним изделием и крышкой камеры – 50–100 мм;

по вертикали между отдельными изделиями за счет прокладок или кронштейнов – 30 мм.

2. Размеры камеры:

Внутренние размеры камеры, м:

длина – L ,

ширина – B ,

высота – H .

Габаритные размеры, мм:

длина – $L_k = L + 2d_{\text{ст}}$,

ширина – $B_k = B + 2d_{\text{ст}}$,

высота – $H_k = H + d_{\text{п}} + d_{\text{кр}}$,

где $d_{\text{ст}}$ – толщина стены, м,

$d_{\text{п}}$ – толщина пола, м,

$d_{\text{кр}}$ – толщина крышки, м.

Наружная поверхность ограждения камеры, м^2

$$F = 2(H_k L_k + L_k B_k + B_k H_k).$$

Площадь подземной части, м^2

$$F_{\text{п}} = 2H_{\text{кп}}(L_k + B_k) + B_k L_k.$$

Площадь надземной части, м^2

$$F_{\text{н}} = 2H_{\text{кз}}(L_k + B_k) + B_k L_k.$$

3. Рабочий объем камеры, м^3

$$V_k = L \cdot B \cdot H.$$

4. Суммарный объем бетона изделий, входящих в камеру

$$V_{\text{бк}} = N_1 \cdot V_{\text{б}}.$$

5. Суммарная масса бетона изделий, входящих в камеру:

$$G_{\text{бк}} = V_{\text{бк}} \cdot R_{\text{бс}}.$$

6. Объем формы

$$V_{\text{ф1}} = G_{\text{ф}} / \rho_{\text{ф}}.$$

7. Суммарный объем форм изделий, находящихся в камере:

$$V_{\text{ф}} = V_{\text{ф1}} \cdot N_1.$$

8. Степень заполнения камеры бетоном изделий

$$q_6 = \frac{V_{6к}}{V_k}.$$

9. Степень заполнения камеры формами

$$q_k = \frac{V_{\phi}}{V_k}.$$

Расчет количества камер

1. Продолжительность загрузки изделий в камеру

$$T_3 = N_1 \cdot T_{\text{форм}},$$

где $T_{\text{форм}}$ – цикл формовочного поста, ч.

2. Время выгрузки изделий, ч

$$T_b = 0,5 \cdot T_3.$$

3. Общая длительность полного цикла камеры, ч

$$D_{\text{ц}} = \frac{T_3 + T_b + D}{K_d},$$

где D – длительность процесса тепловлажностной обработки;

K_d – коэффициент, учитывающий затраты времени на открывание и закрывание крышки, чистку камеры и т.д. (0,91–0,94).

4. Суточная оборачиваемость камеры

а) для трехсменной работы:

$$m_c = \frac{24}{D_{\text{ц}}};$$

б) для двухсменной работы:

$$m_c = \frac{24}{D_{\text{ц}}} \cdot K_{\text{п}},$$

где $K_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент оборачиваемости при переходе от трехсменной работы к двухсменной (табл. П1.2).

Таблица П1.2

Значения поправочных коэффициентов снижения оборачиваемости

Технология производства	Продолжительность операции до ТО, ч	Значения поправочных коэффициентов снижения оборачиваемости при продолжительности ТО, ч			
		7	8	9	10
Агрегатная	1	0,67	0,75	0,83	0,92
Конвейерная	2	0,75	0,83	0,92	1,00
Стендовая	3	0,83	0,92	0,92	0,95
Кассетно-стендовая	5	1,00	0,83	0,87	0,78

5. Количество циклов работы камеры в году

$$m_{\Gamma} = \frac{T_{\Gamma} \cdot K_{\text{исп}}}{D_{\text{ц}}}$$

6. Годовая производительность одной камеры по объему

$$П_{\text{к}} = m_{\Gamma} \cdot V_{\text{бк}}.$$

7. Требуемое количество камер, шт.

$$N_{\text{кам}} = 1,1 \frac{П}{П_{\text{к}}},$$

где $П$ – годовой объем выпуска изделий, м³.

Полученное значение $N_{\text{кам}}$ округляется до ближайшего большего и добавляется 1 резервная камера на каждые 10 камер.

Материальный баланс камеры

- Поступает в камеру:

– сухих веществ $G_{\text{с}} = V_{\text{бк}} \cdot G_{\text{с1}}$;

– воды $G_{\text{w}} = V_{\text{бк}} \cdot G_{\text{в}}$;

– металла форм $G_{\text{м}} = N_1 \cdot G_{\text{ф}}$;

– арматуры и закладных деталей $G_{\text{ар}} = G_{\text{аб}} \cdot V_{\text{бк}}$.

- Выгружается из камеры:

– сухого бетона $G_{\text{бо}} = G_{\text{с}} + G_{\text{вг}}$;

– воды, перешедшей в гидратную влагу: $G_{\text{вг}} = G_{\text{вс}} \cdot V_{\text{бк}}$,

где $G_{\text{вс}} = G_{\text{ц}} \cdot a_1$ – количество химически связанной воды, a_1 – степень гидратации (принимается по литературным данным);

– остаточная влага изделий

$$G_{\text{восм}} = G_{\text{w}} - G_{\text{вг}} - G_{\text{w}}(a_2 - a_3)/100,$$

– испарившаяся вода

$$G_{\text{и}} = \frac{G_{\text{w}} \cdot a_2}{100},$$

где a_2 – испарившаяся влага за период охлаждения, %:

– металла форм $G_{\text{м}} = N_1 \cdot G_{\text{ф}}$;

– арматуры и закладных деталей $G_{\text{ар}} = G_{\text{аб}} \cdot V_{\text{бк}}$.

Испарение влаги будет происходить только с открытой поверхности изделия.

Тепловой баланс ямной пропарочной камеры

Тепловой баланс рассчитывается по периодам работы тепловой обработки. Единица расчета – кДж/период.

Тепловой баланс периода подъема температуры

1. Приход тепла:

1.1. Теплосодержание сухой части бетонной смеси, поступившей в зону:

$$Q_{1-1} = G_c \cdot c_b \cdot t_o,$$

где c_b – теплоемкость бетона при температуре t_o , кДж/кг·град.

1.2. Теплосодержание влаги, содержащейся в бетонной смеси:

$$Q_{2-1} = G_w \cdot c_w \cdot t_o,$$

где c_w – теплоемкость воды при t_o , кДж/кг·град.

1.3. Теплосодержание арматуры и закладных деталей изделий, загруженных в камеру:

$$Q_{1-3} = G_{ap} \cdot c_a \cdot t_o,$$

где c_a – теплоемкость арматуры, кДж/кг·град.

1.4. Теплосодержание форм

$$Q_{1-4} = G_m \cdot c_{\phi} \cdot t_o,$$

где c_{ϕ} – теплоемкость материала форм, кДж/кг·град.

1.5. Тепло экзотермии вяжущего

$$Q_{1-5} = q_{ц1} \cdot G_{ц} \cdot V_{и} \cdot N_{п},$$

где $N_{п}$ – количество изделий в камере;

$V_{и}$ – объем бетона в изделии, м³;

$q_{ц1}$ – тепло, выделившееся при гидратации 1 кг цемента, кДж/кг,

$$q_{ц1} = \frac{M_{ц} \cdot \theta_1 \cdot a_0 \sqrt{B/\Pi}}{162 + 0,96 \cdot \theta_1},$$

где $\theta_1 = D_{п} \cdot t_{(1-2)}$ – количество градусо-часов процесса,

a_0 – коэффициент:

$$a_0 = 0,32 + 0,002 \cdot \theta_1 \text{ при } \theta_1 \leq 290 \text{ град}\cdot\text{ч},$$

$$a_0 = 0,84 + 0,0002 \cdot \theta_1 \text{ при } \theta_1 > 290 \text{ град}\cdot\text{ч}.$$

1.6. Тепло материалов ограждений

$$Q_{1-6} = \sum V_{iогр} \cdot \rho_{iогр} \cdot c_{iогр} \cdot t_{iогр},$$

где $V_{iогр}$ – объем i-го слоя материала, кг/м³;

$\rho_{iогр}$ – плотность i-го материала, кг/м³;

$c_{iогр}$ – удельная теплоемкость i-го материала, кДж/кг·град;

$t_{iогр}$ – средняя температура i-го слоя материала, °С.

1.7. Тепло, выносимое теплоносителем:

$$Q_{1-7} = G_1 \cdot i_{п},$$

где G_1 – количество подаваемого теплоносителя в период подогрева,

$i_{п}$ – энтальпия теплоносителя.

1.8. Сумма приходных статей

$$Q_{1п} = \sum Q_{1-i}.$$

2. Расход тепла:

2.1. На нагрев сухих материалов

$$Q_{2-1} = G_c \cdot c_6 \cdot t_{(1-2)6}.$$

2.2. На нагрев воды в бетонной смеси

$$Q_{2-2} = G_w \cdot c_w \cdot t_{(1-2)6}.$$

2.3. На нагрев арматуры и закладных деталей

$$Q_{2-3} = G_{ap} \cdot c_a \cdot t_{(1-2)6}.$$

2.4. На нагрев форм (вагонеток)

$$Q_{2-4} = G_m \cdot c_f \cdot t_{из}.$$

2.5. На нагрев материалов и ограждений

$$Q_{2-5} = \sum V_{iогр} \cdot \rho_{iогр} \cdot c_{iогр} \cdot t_{2iогр},$$

где $t_{2iогр}$ – средняя температура i-го слоя материала ограждения.

2.6. Потери тепла в окружающую среду через надземную часть стен

$$Q_{2-6} = 3.6 \cdot k \cdot F_n \cdot D_n \cdot (t_{(1-2)0} - t_{oc}),$$

где D_n – время подъема температуры, ч;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·град,

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющей среды к разделяющей стенке:

- для чистого пара 9000–12000 Вт/м²·град,

- для паровоздушной смеси – коэффициент теплоотдачи пара умножается на поправочный коэффициент, принимаемый по табл. П1.3.

Таблица П1.3

Поправочные коэффициенты

Процент примеси воздуха	Массовая скорость паровоздушной смеси, кг/м ³ ·сек.			
	0	0,3	2	6,5
1	0,42	0,7	0,88	0,96
2	0,3	0,62	0,83	0,94
3	0,2	0,55	0,78	0,91
4	0,18	0,5	0,74	0,88
8	0,12	0,38	0,63	0,8
12	0,1	0,32	0,56	0,74

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде, Вт/м²·град,

$$\alpha_2 = 2,6 \sqrt{t_{ст} - t_{oc}} + 5,7 \frac{E \cdot \left(\left(\frac{t_{ст} + 273}{100} \right)^4 + \left(\frac{t_{oc} + 273}{100} \right)^4 \right)}{t_{ст} - t_{oc}},$$

b_i – толщина слоев ограждения, м;
 λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя ограждающей конструкции, Вт/м·град;
 2,6 – коэффициент, учитывающий расположение стен;
 $t_{ст}$ – температура наружной поверхности стен, °С;
 E – степень черноты:
 0,8 ... 0,9 – для керамических материалов,
 0,8 – для стального листа,
 0,1 ... 0,2 – для стального листа, покрытого алюминиевой краской.

2.7. Потери тепла подземной частью стен камеры

$$Q_{2-7} = (0.1 \dots 0.3) \cdot Q_{2-6}.$$

2.8. Потери тепла через крышку

$$Q_{2-8} = 3,6 \cdot k \cdot F_{кр} \cdot D_{п} \cdot (t_{п.кр} - t_{ос}),$$

где $t_{п.кр}$ – температура внутренней поверхности крышки;

$D_{п}$ – время подъема температуры, ч;

$F_{кр}$ – площадь крышки, м²;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·град,

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{2кр}}},$$

где $\alpha_{2кр}$ – коэффициент теплоотдачи от крышки к окружающей среде, Вт/м²·град,

$$\alpha_{2кр} = 3,3 \cdot \alpha_{к},$$

b_i – толщина слоев крышки, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности слоев, Вт/м·град;

3,3 – коэффициент, учитывающий расположение ограждающей конструкции;

$t_{ос}$ – температура окружающей среды, °С;

$\alpha_{к}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·град, принимается по табл. П1.4.

Таблица П1.4

Коэффициент теплоотдачи

Температура наружной поверхности, °С	Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·град
10	9,81
25	10,45
40	10,69
60	11,63

2.9. Тепло, уносимое конденсатом:

$$Q_{2-10} = G_k \cdot c_k \cdot t_{(1-2)0},$$

где $G_k = G_1 - G_{cb} - G_{пр}$,

$G_{пр}$ – потери пара через неплотности установки в атмосферу 0,1–0,2 от общего расхода пара за период;

G_{cb} – масса пара, заполняющего свободный объем камеры:

$$G_{cb} = \rho_p (V_k - V_{bk} - V_{\phi});$$

ρ_p – плотность пара при средней температуре в камере в период подъема температуры;

c_k – удельная теплоемкость конденсата, кДж/кг·град.

2.10. Потери тепла с паром, уходящим через неплотности установки:

$$Q_{2-11} = G_{пр} \cdot c_p \cdot t_{(1-2)0},$$

где c_p – удельная теплоемкость пара, кДж/кг·град.

2.11. Расход тепла на нагрев паровоздушной смеси, заполняющий свободный объем камеры:

$$Q_{2-12} = G_{cb} \cdot c_p \cdot t_{из},$$

где c_p – теплоемкость паровоздушной смеси при температуре изотермической выдержки.

2.12. Сумма расходных статей

$$Q_{1p} = \sum Q_{2-i}.$$

Уравнение теплового баланса для периода подъема температуры

$$Q_{1п} = Q_{1р}.$$

Решая данное уравнение, определяем расход теплоносителя, поданного в камеру в период подъема температуры G_1 .

Среднечасовой расход теплоносителя

$$G_{1с} = \frac{G_1}{D_n}.$$

Тепловой баланс периода изотермической выдержки

3. Приход тепла:

3.1. Теплосодержание сухой части бетонной смеси

$$Q_{3-1} = Q_{2-1}.$$

3.2. Теплосодержание влаги, содержащейся в бетонной смеси:

$$Q_{3-2} = Q_{2-2}.$$

3.3. Теплосодержание арматуры и закладных деталей изделий

$$Q_{3-3} = Q_{2-3}.$$

3.4. Теплосодержание форм

$$Q_{3-4} = Q_{2-4}.$$

3.5. Тепло материалов ограждений

$$Q_{3-5} = Q_{2-5}.$$

3.6. Тепло выносимое теплоносителем:

$$Q_{3-6} = G_2 \cdot i_{\text{п}},$$

где G_2 – количество подаваемого теплоносителя в период экзотермической выдержки;

$i_{\text{п}}$ – энтальпия теплоносителя.

3.7. Тепло экзотермии вяжущего

$$Q_{3-7} = q_{\text{ц2}} \cdot G_{\text{ц}} \cdot V_{\text{и}} \cdot N_1,$$

где $q_{\text{ц2}}$ – тепло выделившееся при гидратации 1 кг цемента, кДж/кг,

$$q_{\text{ц2}} = \frac{M_{\text{ц}} \cdot \theta_2 \cdot a_0 \sqrt{B/\Pi}}{162 + 0,96 \cdot \theta_2},$$

где $\theta_2 = D_{\text{и}} \cdot t_2 \cdot K_1 - \theta_2$ – количество градусо-часов процесса,

$D_{\text{и}}$ – продолжительность изотермической выдержки, ч,

K_1 – коэффициент, учитывающий герметичность изделий:

1,2 – для распалубленных,

1 – для изделий в форме,

0,85 – для укрытых изделий,

0,8 – для герметизированных.

3.8. Сумма природных статей

$$Q_{2\text{п}} = \sum Q_{3-i}.$$

4. Расход тепла:

4.1. На нагрев материалов

$$Q_{4-1} = G_{\text{с}} \cdot c_6 \cdot t_{(1-2)\text{би}}.$$

4.2. На нагрев воды в бетонной смеси

$$Q_{4-2} = (G_{\text{в}} - G_{\text{ви}} - G_{\text{вг}}) c_{\text{в}} \cdot t_{(1-2)\text{би}}.$$

4.3. На нагрев арматуры и закладных деталей

$$Q_{4-3} = G_{\text{ар}} \cdot c_{\text{а}} \cdot t_{(1-2)\text{би}}.$$

4.4. На нагрев формы

$$Q_{4-4} = Q_{2-4}.$$

4.5. На нагрев материалов ограждений

$$Q_{4-5} = \sum_{i=1}^n V_{\text{огр}} \cdot \rho_{\text{огр}} \cdot c_{\text{огр}} \cdot t_{2\text{огр}}.$$

4.6. Потери тепла в окружающую среду через надземную часть стен

$$Q_{2-6} = 3.6 \cdot k \cdot F_{\text{н}} \cdot D_{\text{и}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{ос}}).$$

4.7. Потери тепла подземной частью стен камеры

$$Q_{4-7} = (0.1 \dots 0.3) Q_{4-6}.$$

4.8. Потери тепла через крышку

$$Q_{4-8} = 3.6 \cdot k \cdot F_{\text{кр}} \cdot D_{\text{и}} \cdot (t_{\text{п.кр.}} - t_{\text{ос}}).$$

4.9. Потери тепла на испарение части воды затворения и нагрев водяных паров

$$Q_{4-9} = G_{\text{ви}}(r + c_{\text{вп}} \cdot t_{(1-2)\text{би}}),$$

где r – скрытая теплота парообразования;

$c_{\text{вп}}$ – теплоемкость водяного пара.

4.10. Тепло, уносимое конденсатом:

$$Q_{4-10} = G_{\text{к}} \cdot c_{\text{к}} \cdot t_{\text{из}},$$

где $G_{\text{к}} = G_2 - G_{\text{св}} - G_{\text{пр}}$,

$G_{\text{пр}}$ – потери пара через неплотности установки в атмосферу 0,1–0,2 от общего расхода пара за период;

$G_{\text{св}}$ – масса пара, заполняющего свободный объем камеры;

$$G_{\text{св}} = \rho_{\text{п}} \cdot (V_{\text{к}} - V_{\text{бк}} - V_{\text{ф}}),$$

$\rho_{\text{п}}$ – плотность пара при средней температуре в камере в период подъема температуры;

$c_{\text{к}}$ – удельная теплоемкость конденсата, кДж/кг·град.

4.11. Потери тепла с паром, уходящим через неплотности установки:

$$Q_{4-11} = G_{\text{пр}} \cdot c_{\text{п}} \cdot t_{(1-2)\text{о}},$$

где $c_{\text{п}}$ – удельная теплоемкость конденсата, кДж/кг·град.

4.12. Расход тепла на нагрев паровоздушной смеси, заполняющей свободный объем камеры:

$$Q_{4-11} = G_{\text{св}} \cdot c_{\text{п}} \cdot t_{\text{из}}.$$

4.13. Сумма расходных статей

$$Q_{2\text{р}} = \sum Q_{4-i}.$$

Уравнение теплового баланса для периода изотермической выдержки

$$Q_{2\text{п}} = Q_{2\text{р}}.$$

Решая данное уравнение, определяем расход теплоносителя, поданного в камеру в период изотермической выдержки - G_2 .

Среднечасовой расход теплоносителя, кг/ч

$$G_{2\text{с}} = \frac{G_2}{D_{\text{и}}}.$$

Удельный расход пара на тепловую обработку, кг/м³

$$G_{\text{уп}} = \frac{G_1 + G_2}{V_{\text{бк}}}.$$

При превышении удельного расхода пара 170 кг/м³ изменяют конструктивное решение ограждений тепловой установки или режим тепловой обработки и расчет повторяют (СН 513-79, ОНТП-07-85).

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТУННЕЛЬНОЙ ПРОПАРОЧНОЙ КАМЕРЫ

Исходные данные:

1. Вид изделия.
 2. Геометрические размеры изделия, м:
длина – l ,
ширина – b ,
высота – h .
 3. Масса изделия – $G_{и}$, кг.
 4. Объем бетона в изделии – $V_б$, m^3 .
 5. Объем одного изделия – $V_{и}$, m^3 .
 6. Расход арматуры на 1 m^3 бетона – $G_{аб}$, кг.
 7. Расход арматуры на 1 изделие – G_a , кг.
 8. Водоцементное отношение – B/C .
 9. Марка цемента – $M_{ц}$.
 10. Марка бетона – $M_б$.
 11. Масса бетона в изделии – $G_б$, кг.
 12. Объемная масса свежесушеного бетона (бетонной смеси)
 $\rho_{бс} = G_{ц} + G_{в} + G_{п} + G_{щ}$,
 13. Расход материалов на 1 m^3 , кг:
цемент – $G_{ц}$,
вода – $G_{в}$,
песок – $G_{п}$,
щебень – $G_{щ}$.
 14. Вес сухих веществ на 1 m^3 – $G_{сб}$, кг.
 15. Вес сухих веществ на 1 изделие – $G_{с1} = G_{сб} \cdot V_б$, кг.
 16. Количество воды, вступившее в реакцию с вяжущим
(принимается по литературным данным) – $G_{вс} = G_{ц} \cdot a_1$,
 a_1 – степень гидратации.
 17. Масса формы – вагонетки – $G_{ф}$, кг.
- Для расчета массы формы ориентировочно можно пользоваться значениями удельной металлоемкости, характеризующей отношение массы формы к единице объема, изготавливаемого в ней изделия или изделий [27, табл. 14].
18. Размеры формы – вагонетки, м:
длина – $l_{ф}$,

ширина – b_{ϕ} ,

высота – h_{ϕ} .

19. Температура загружаемых изделий – t_o , °С.

20. Температура окружающей среды – t_{oc} , °С.

21. Начальная температура в камере – t_1 , °С.

22. Температура изотермической выдержки – $t_{из}$, °С.

23. Температура изделий при выходе из зоны охлаждения – $t_{ок}$, °С.

24. Удельная теплоемкость бетона c_6 , Дж/кг · град.

25. Коэффициенты:

теплопроводности бетона – λ_6 , Вт/м · град,

температуропроводности бетона – a_6 , м²/ч.

26. Прочность бетона после тепловлажностной обработки $R_{тво}$, МПа (%).

Расчет количества камер и определение их размеров

Количество камер непрерывного действия определяется из условия равенства производительности конвейерной линии и пропарочных камер

$$N_{\text{кам}} = \frac{60 \cdot N_{\text{кл}} \cdot D}{N \cdot N_{\text{я}} \cdot k},$$

где D – цикл тепловлажностной обработки, ч;

N – количество изделий, входящих в камеру по длине, шт.;

$N_{\text{я}}$ – количество ярусов в камере, шт.;

k – ритм конвейера, мин

$$k = \frac{60 \cdot D_{\Gamma}}{\Pi},$$

Π – годовой объем выпуска изделий, м³;

D_{Γ} – число рабочих часов в году.

Количество конвейерных линий

$$N_{\text{кл}} = \frac{\Pi_{\phi} \cdot k}{D_{\Gamma}},$$

где k – ритм конвейера, ч;

D_{Γ} – число рабочих часов в году;

Π_{ϕ} – необходимое число формовок в год, определяется по формуле

$$\Pi_{\phi} = \frac{\Pi}{V_6},$$

Π – заданная годовая производительность по выпуску изделий, м³;

V_6 – объем бетона в изделии на одной форме, поддоне, вагонетке, м³.

Количество изделий, входящих в камеру:

$$N_1 = \frac{D}{k},$$

где D – цикл тепловлажностной обработки, ч;

k – ритм конвейера, ч.

Длина камеры

$$L = \frac{N_1}{N_{\text{я}}} \cdot (l_{\text{ф}} + 0,2),$$

где $N_{\text{я}}$ – число ярусов;

$l_{\text{ф}}$ – длина формы – вагонетки.

Высота камеры

$$H = (h_{\text{ф}} + h_{\text{р}} + h_{\text{з}}) \cdot N_{\text{я}} + h_{\text{к}} \cdot (N_{\text{я}} - 1),$$

где $h_{\text{ф}}$ – высота формы – вагонетки от головки рельса до верха формы, м;

$h_{\text{р}}$ – высота рельса, м;

$h_{\text{з}}$ – величина зазора между верхом формы – вагонетки и низом консоли, м;

$N_{\text{я}}$ – количество ярусов;

$h_{\text{к}}$ – высота консоли, м.

Ориентировочно можно принять следующие размеры:

$$h_{\text{ф}} = 0,6 \text{ м}, h_{\text{р}} = 0,25 \text{ м}, h_{\text{з}} = 0,1\text{--}0,3 \text{ м}, h_{\text{к}} = 0,3\text{--}0,5 \text{ м}.$$

Ширина камеры

$$B = b_{\text{ф}} + 2 \cdot s_1,$$

где $b_{\text{ф}}$ – ширина формы вагонетки, м (0,05–0,15);

s_1 – расстояние от форм до стен, м

Длина зоны подогрева

$$L_{\text{п}} = \frac{N_1}{N_{\text{я}}} \cdot (l_{\text{ф}} + 0,2) \cdot \frac{D_{\text{п}}}{D}.$$

Длина зоны изотермической выдержки

$$L_{\text{и}} = \frac{N_1}{N_{\text{я}}} \cdot (l_{\text{ф}} + 0,2) \cdot \frac{D_{\text{из}}}{D}.$$

Длина зоны охлаждения

$$L_{\text{ох}} = \frac{N_1}{N_{\text{я}}} \cdot (l_{\text{ф}} + 0,2) \cdot \frac{D_{\text{ох}}}{D}.$$

После определения длин зон подъема температуры, изотермической выдержки и охлаждения длина зон устанавливается кратной ближайшему целому количеству форм.

$N_{\text{п}}$ – количество изделий в зоне подогрева,

$N_{\text{из}}$ – количество изделий в зоне изотермической выдержки,

$N_{\text{ок}}$ – количество изделий в зоне охлаждения.

Рабочий объем камеры

$$V_k = L \cdot B \cdot H.$$

Суммарный объем бетона изделий, входящих в камеру:

$$V_k = N_1 \cdot V_b.$$

Суммарная масса бетона изделий, входящих в камеру:

$$G_{bk} = V_{bk} \cdot \rho_{bc}$$

Объем формы – вагонетки

$$V_{\phi 1} = G_{\phi} / \rho_{\phi}.$$

Суммарный объем форм изделий, находящихся в камере:

$$V_{\phi} = V_{\phi 1} \cdot N_1.$$

Степень заполнения камеры бетоном изделий

$$q_b = \frac{V_{be}}{V_k}.$$

Степень заполнения камеры формами – вагонетками

$$q_k = \frac{V_{\phi} - V_{bk}}{V_k}.$$

Производительность камеры в год:

а) по изделиям

$$P_{k1} = \frac{D_r \cdot N_1}{D};$$

б) по объему бетона

$$P_k = \frac{D_r \cdot V_{bk}}{D};$$

Требуемое количество камер для выполнения заданной производительности

$$N_{\text{кам}} = P / P_k.$$

Материальный баланс камеры

1. Зона подогрева (подъема температуры)

- поступает в камеру

сухих веществ $G_c = V_k \cdot G_{c1}$,

воды затворения $G_w = V_{bk} \cdot G_b$,

металла форм $G_m = N_1 \cdot G_{\phi}$,

арматуры и закладных деталей $G_{ap} = G_{ab} \cdot V_{bk}$.

Всего

поступает в зону изотермической выдержки

сухих веществ G_c ,

гигроскопической влаги (с учетом конденсата) G_w ,

металла форм G_m ,
арматуры и закладных деталей G_{ap} .

Всего

2. Зона изотермической выдержки

поступает из зоны подогрева
сухих веществ G_c ,
гигроскопической влаги G_w ,
металла форм G_m ,
арматуры и закладных деталей G_{ap} .

Всего

поступает в зону охлаждения
сухих веществ G_c ,
гигроскопической влаги $G_{wi} = G_w - G_{wg} - G_{wi}$,
металла форм G_m ,
арматуры и закладных деталей G_{ap} ,
вода, перешедшая в гидратную влагу $G_{wg} = G_{wc} \cdot V_{бк}$,
испарившаяся вода

$$G_{wi} = \frac{G_w \cdot a_2}{100},$$

где a_2 – испарившаяся вода за период, %.

Всего

3. Зона охлаждения

- поступает из зоны изотермической выдержки
сухого бетона $G_{bo} = G_c + G_{wg}$,
гигроскопической влаги G_{wi} ,
металла форм G_m ,
арматуры и закладных деталей G_{ap} .

Всего

выходит из камеры
сухого бетона G_{bo} ,
остаточная влага изделий $G_{wост} = G_w - G_{wg} - G_w$,
 $(a_2 + a_3)/100$

металла форм G_m

арматуры и закладных деталей G_{ap}

испаряется вода

$$G_{wио} = \frac{G_w \cdot a_3}{100},$$

где a_3 – испарившаяся влага за период (до 10% в зависимости от площади открытой поверхности), %.

Тепловой баланс туннельной камеры

Тепловой баланс рассчитывается для каждой зоны отдельно и по результатам частных тепловых балансов составляется тепловой баланс всей установки. Единицей расчета служит кДж/ч.

Тепловой баланс зоны подогрева

1. Приход тепла

1.1. Теплосодержание сухой части бетонной смеси, поступившей в зону:

$$Q_{1-1} = G_c \cdot c_6 \cdot t_o,$$

где c_6 – теплоемкость бетона, кДж/кг · град;

t_o – температура изделий на входе в камеру, °С.

1.2. Теплосодержание влаги, содержащейся в бетонной смеси:

$$Q_{1-2} = G_w \cdot c_w \cdot t_o,$$

где c_w – теплоемкость воды, кДж/кг · град.

1.3. Теплосодержание арматуры и закладных деталей изделий, загруженных в камеру:

$$Q_{1-3} = G_{ap} \cdot c_a \cdot t_o,$$

где c_a – теплоемкость арматуры, кДж/кг · град.

1.4. Теплосодержание форм-вагонеток, загруженных в камеру:

$$Q_{1-4} = G_m \cdot c_m \cdot t_o,$$

где c_m – теплоемкость материала форм, кДж/кг · град.

1.5. Тепло, вносимое воздухом через торец камеры:

$$Q_{1-5} = \frac{3600 \cdot i_b \cdot (1 - z) \cdot M_b}{1 + \frac{d_b}{1000}},$$

где i_b – теплосодержание влажного воздуха при температуре t_{oc} , определяется по i-D диаграмме;

z – тепловой КПД штор;

d_b – влагосодержание влажного воздуха при температуре t_{oc} , г/кг;

M_b – количество влажного воздуха, входящего в камеру, кг/с

$$M_b = \frac{F_k \cdot M_{b1}}{31} \cdot \sqrt{H},$$

F_k – площадь торца камеры, м²;

H – высота камеры, м;

M_{b1} – количество воздуха, определяемое по табл. П2.1.

Таблица П2.1

Эффективность штор и воздушных завес
в тоннельных камерах непрерывного действия

Показатели	Торец не защищен	Навешаны шторы	Навешаны шторы, завеса работает
Количество циркулирующего воздуха, м ³ /ч	11000	4850	1730
Тепловой КПД, %	-	56	88
Потери тепла, ккал/ч	680000	300000	78000
Потери пара, кг/ч	1070	470	122
Экономия пара, кг/ч	-	600	948

1.6. Тепло, вносимое теплоносителем:

$$Q_{1-6} = G_1 \cdot i_{\text{п}},$$

где G_1 – количество подаваемого теплоносителя в период подогрева.

1.7. Сумма приходных статей

$$Q_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n Q_{1-i}.$$

2. Расход тепла

2.1. На нагрев сухих материалов

$$Q_{2-1} = G_c \cdot c_b \cdot t_{(1-2)b}.$$

2.2. На нагрев воды в бетонной смеси

$$Q_{2-2} = G_w \cdot c_w \cdot t_{(1-2)b}.$$

2.3. На нагрев арматуры и закладных деталей

$$Q_{2-3} = G_{\text{ар}} \cdot c_a \cdot t_{(1-2)b}.$$

2.4. На нагрев форм-вагонеток

$$Q_{2-4} = G_m \cdot c_m \cdot t_{\text{из}}.$$

2.5. Потери тепла в окружающую среду через ограждающие конструкции (расчет ведется для стен и перекрытия, потери тепла через пол не учитываются)

$$Q_{2-5} = 3,6 \cdot k \cdot F \cdot D_{\text{п}} \cdot (t_{(1-2)o} - t_{\text{oc}}),$$

где F – площадь через которую теряется тепло, м²;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/м² · град,

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющей среды к разделяющей стенке:
для чистого пара 9000–12000 Вт/м² · град;

для паровоздушной смеси – коэффициент теплоотдачи пара умножается на поправочный коэффициент [15].

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде, Вт/м² · град

$$\alpha_2 = A \cdot \sqrt{t_{\text{ст}} - t_{\text{ос}}} + 5,7 \cdot \frac{E \cdot \left(\left(\frac{t_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 + \left(\frac{t_{\text{ос}} + 273}{100} \right)^4 \right)}{t_{\text{ст}} - t_{\text{ос}}},$$

где b_i – толщина слоев ограждения, м,

λ_i – коэффициент теплопроводности слоев ограждающих конструкции, Вт/м · град,

A – коэффициент, учитывающий расположение ограждающей конструкции:

для горизонтальных поверхностей – 3,3,

для вертикальных поверхностей – 2,6;

$t_{\text{ст}}$ – температура наружной поверхности стен, °С;

$t_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды, °С;

E – степень черноты:

0,8–0,9 – для керамических материалов;

0,8 – для стального листа;

0,1–0,2 – для стального листа покрытого алюминиевой краской.

2.6. Потери тепла с воздухом

$$Q_{2-8} = \frac{3600 \cdot i_{\text{в}} \cdot (1 - z) \cdot M_{\text{в}}}{1 + \frac{d_{\text{вп}}}{1000}},$$

где $i_{\text{в}}$ – теплосодержание влажного воздуха при температуре в камере $t_{(1-2)}$;

z – тепловой КПД штор;

$d_{\text{вп}}$ – влагосодержание влажного воздуха в зоне подогрева, г/кг;

$M_{\text{в}}$ – количество влажного воздуха, проходящего через зону подогрева, кг/с

$$M_{\text{в}} = \frac{F_{\text{к}} \cdot M_{\text{в1}}}{31} \cdot \sqrt{H},$$

$F_{\text{к}}$ – площадь торца камеры, м²;

H – высота камеры, м;

$M_{\text{в1}}$ – количество воздуха.

2.7. Сумма расходных статей

$$Q_{1\text{п}} = \sum_{i=1}^n Q_{2-i}.$$

Уравнение теплового баланса для зоны

$$Q_{1\text{п}} = Q_{1\text{р}}.$$

Решая уравнение теплового баланса, определяем количество пара (G_1), необходимое для выдерживания режима тепловой обработки в зоне подогрева.

Тепловой баланс зоны изотермической выдержки

3. Приход тепла

3.1. Теплосодержание сухой части бетонной смеси, поступившей в зону:

$$Q_{3-1} = Q_{2-1}.$$

3.2. Теплосодержание влаги, содержащейся в бетонной смеси:

$$Q_{3-2} = Q_{2-2}.$$

3.3. Теплосодержание арматуры и закладных деталей изделий, загруженных в камеру:

$$Q_{3-3} = Q_{2-3}.$$

3.4. Теплосодержание форм-вагонеток, загруженных в камеру:

$$Q_{3-4} = Q_{2-4}.$$

3.5. Тепло, вносимое теплоносителем:

$$Q_{3-5} = G_2 \cdot i_n,$$

где G_2 – количество подаваемого теплоносителя в период изотермической выдержки;

i_n – энтальпия теплоносителя.

3.6. Тепло экзотермии вяжущего

$$Q_{3-6} = q_{ц1} \cdot G_{ц} \cdot V_{и} \cdot N_{из},$$

где $N_{из}$ – количество изделий в зоне;

$V_{и}$ – объем бетона в изделии, m^3 ;

$q_{ц1}$ – тепло, выделившееся при гидратации 1 кг цемента, kJ/kg :

$$q_{ц1} = \frac{M_{ц} \cdot \theta_1 \cdot a_0 \cdot \sqrt{B/C}}{162 + 0,96 \cdot \theta_1},$$

где $\theta_1 = D_{и} \cdot t_{26} \cdot K_1$ – количество градусо-часов процесса,

$a_0 = 0,32 + 0,002 \cdot \theta_1$ при $\theta_1 \leq 290$ град $\cdot$ ч,

$a_0 = 0,84 + 0,002 \cdot \theta_1$ при $\theta_1 > 290$ град $\cdot$ ч;

K_1 – коэффициент, учитывающий герметичность изделий:

1,2 – для распалубленных;

1,0 – для изделий в форме;

0,85 – для укрытых изделий;

0,8 – для герметизированных.

3.7. Сумма прихода статей

$$Q_{2п} = \sum_{i=1}^n Q_{3-i}.$$

4. Расход тепла

4.1. На нагрев материалов

$$Q_{4-1} = (G_c + G_{вг}) \cdot c_b \cdot t_{(1-2)би}.$$

4.2. На нагрев воды в изделиях

$$Q_{4-2} = (G_w - G_{ви} - G_{вг}) \cdot c_w \cdot t_{(1-2)би}.$$

4.3. На нагрев арматуры и закладных деталей

$$Q_{4-3} = G_{ар} \cdot c_a \cdot t_{(1-2)би}.$$

4.4. На нагрев форм-вагонеток

$$Q_{4-4} = Q_{2-4}.$$

4.5. Потери тепла в окружающую среду через надземную часть ограждающих конструкций

$$Q_{4-5} = 3,6 \cdot k \cdot F \cdot D_{из} \cdot (t_{из} - t_{oc}),$$

где F – площадь через которую теряется тепло, m^2 ;

k – коэффициент теплопередачи, $Вт/м^2 \cdot град$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде, $Вт/м^2 \cdot град$

$$\alpha_2 = A \cdot \sqrt{t_{ст} - t_{oc}} + 5,7 \cdot \frac{E \cdot \left(\left(\frac{t_{ст} + 273}{100} \right)^4 + \left(\frac{t_{oc} + 273}{100} \right)^4 \right)}{t_{ст} - t_{oc}},$$

$t_{ст}$ – температура наружной поверхности стен в зоне изотермической выдержки, $^{\circ}C$.

4.6. Расход тепла на испарение влаги из бетона и нагрев водяных паров

$$Q_{4-6} = G_{ви} \cdot (r + C_{вп} \cdot t_{(1-2)би}),$$

где r – скрытая теплота парообразования;

$C_{вп}$ – теплоемкость паровоздушной смеси.

4.7. Сумма расходных статей

$$Q_{2p} = \sum_{i=1}^n Q_{4-i}.$$

Уравнение теплового баланса для зоны

$$Q_{2п} = Q_{2p}.$$

Решая уравнение теплового баланса, определяем количество пара (G_2), необходимое для поддержания температуры изотермической выдержки в зоне.

Тепловой баланс зоны охлаждения

5. Приход тепла

5.1. Теплосодержание сухой части бетона, поступившего в зону:

$$Q_{5-1} = Q_{4-1}.$$

5.2. Теплосодержание влаги, содержащейся в бетоне изделий:

$$Q_{5-2} = Q_{4-2}.$$

5.3. Теплосодержание арматуры и закладных деталей изделий, загруженных в камеру:

$$Q_{5-3} = Q_{4-3}.$$

5.4. Теплосодержание форм-вагонеток, загруженных в камеру:

$$Q_{5-4} = Q_{4-4}.$$

5.5. Тепло, вносимое воздухом, поступающим на охлаждение

$$Q_{5-5} = V_v \cdot c_v \cdot t_v,$$

где V_v – расход воздуха, м³/ч;

c_v – теплоемкость воздуха в зависимости от температуры;

t_v – температура воздуха, поступающего в зону охлаждения, °C.

5.6. Сумма приходных статей

$$Q_{3п} = \sum_{i=1}^n Q_{5-i}.$$

6. Расход тепла

6.1. На нагрев материалов

$$Q_{6-1} = (G_c + G_{вг}) \cdot c_b \cdot t_{оx},$$

$$t_{оx} - t_{oc} < 40.$$

6.2. На нагрев воды в изделиях

$$Q_{6-2} = G_{вост} \cdot c_w \cdot t_{оx}.$$

6.3. На нагрев арматуры и закладных деталей

$$Q_{6-3} = G_{ap} \cdot c_a \cdot t_{оx}.$$

6.4. На нагрев форм-вагонеток

$$Q_{6-4} = G_{ф} \cdot c_m \cdot t_{оx}.$$

6.5. Потери тепла в окружающую среду через ограждающие конструкции

$$Q_{6-5} = 3,6 \cdot k \cdot F \cdot D_{ox} \cdot (t_{c,ox} - t_{oc}),$$

где $t_{c,ox}$ – средняя температура в зоне охлаждения, °C,

$$t_{c,ox} = (t_{bo} + t_{oc})/2,$$

t_{bo} – температура воздуха, выходящего из зоны охлаждения (принимается равной t_{ox} и затем проверяется по [20]).

6.6. Расход тепла на испарение влаги из бетона и нагрев водяных паров

$$Q_{6-6} = G_{wиo} \cdot (r + c_{вп} \cdot t_{bo}).$$

6.7. Потери тепла с воздухом определяются из уравнения

$$Q_{6-7} = V_v \cdot c_v \cdot t_{bo},$$

$$V_v \cdot c_v \cdot (t_{bo} - t_{oc}) = \alpha \cdot D_{ox} \cdot F_{из.0} \cdot (t_{c,изд} - t_{c,в}), \quad (*)$$

где $t_{c,изд}$ – средняя температура изделия на выходе из зоны охлаждения, °C,

$$t_{c,изд} = (t_{ox} + t_{bo})/2,$$

$t_{c,в}$ – средняя температура воздуха в зоне охлаждения, °C

$$t_{c,в} = (t_v + t_{bo})/2,$$

$F_{из.0}$ – поверхность теплоотдачи изделий, находящихся в зоне охлаждения:

$$F_{из.0} = 1,1 \cdot N_{ок} \cdot 1 \cdot b.$$

6.8. Сумма расходных статей

$$Q_{3p} = \sum_{i=1}^n Q_{6-i}.$$

Уравнение теплового баланса зоны охлаждения

$$Q_{3п} = Q_{3p}.$$

Из уравнения теплового баланса зоны охлаждения определяется значение V_v (кг/м²)

$$Q_{5-5} = Q_{3п} - Q_{3p}.$$

Подставляя значение V_v в уравнение (*), находим температуру $t_{во}$. Если полученное значение отличается от принятого $t_{ок}$ более чем на 5°C, производим перерасчет с другой температурой.

7. Среднечасовой расход пара, кг/ч:

- для зоны подогрева

$$G_{1c} = \frac{G_1}{D_{п}};$$

- для зоны изотермической выдержки

$$G_{2c} = \frac{G_2}{D_{из}}.$$

8. Удельный расход пара, кг/м³:

- для зоны подогрева

$$G_{1cy} = \frac{G_1}{N_{п} \cdot V_6};$$

- для зоны изотермической выдержки

$$G_{2cy} = \frac{G_2}{N_{из} \cdot V_6};$$

- для камеры

$$G_{cy} = G_{1cy} + G_{2cy}.$$

При превышении удельного расхода пара 240 кг/м³ изменяют конструктивное решение ограждений тепловой установки или режим тепловой обработки и расчет повторяют (ОНТП-07-85).

Сводный тепловой баланс

1. Приход

Тепловыделение цемента

$$Q_{ц} = Q_{3-6}.$$

Тепло, вносимое теплоносителем:

$$Q_{п} = Q_{1-6} + Q_{3-5}.$$

Итого

$$Q_1 = Q_{\text{ц}} + Q_{\text{п}}.$$

2. Расход

Нагрев сухой части бетонной смеси

$$Q_6 = Q_{6-1} - Q_{2-1}.$$

Нагрев влаги бетона

$$Q_{\text{в}} = Q_{6-2} - Q_{2-2}.$$

Нагрев арматуры и закладных деталей

$$Q_{\text{ар}} = Q_{6-3} - Q_{2-3}.$$

Нагрев форм-вагонеток

$$Q_{\text{ф}} = Q_{6-4} - Q_{2-4}.$$

Испарение влаги из бетона и нагрев водяных паров

$$Q_{\text{ив}} = Q_{6-6} + Q_{4-6}.$$

Потери в окружающую среду

$$Q_{\text{ос}} = Q_{2-5} + Q_{4-6} + Q_{6-5}.$$

Нагрев воздуха

ИТОГО

Неувязка баланса должна быть не более 1%.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАССЕТНЫХ УСТАНОВОК

Определение количества кассетных установок

Мощность одной кассетной установки, м³/год, определяется из формулы

$$M_k = V_{II}^{\bar{o}} \cdot K_{CM} \cdot K_{об} \cdot T_{Г} \cdot N_{\Phi O}^{кас},$$

где $V_{II}^{\bar{o}}$ – средневзвешенный объем изделия, формуемого в кассетной установке, м³;

$N_{\Phi O}^{кас}$ – число формовочных отсеков в кассетной установке;

$T_{Г}$ – номинальное количество рабочих дней в году по ОНТП 07-85 [30].

K_{CM} – коэффициент использования оборудования (кассетных установок) в течение смены;

$K_{об}$ – коэффициент оборачиваемости кассетных установок в сутки.

Коэффициент оборачиваемости кассетных установок при двухсменном формовании можно ориентировочно определить по формуле

$$K_{об} = \frac{16}{T_{ц}},$$

где $T_{ц}$ – продолжительность цикла работы кассеты.

Цикл работы кассетной установки определяется по формуле

$$T_{ц} = \tau_{\phi} + \tau_{TO} + \tau_{под},$$

где τ_{ϕ} – продолжительность формования всех отсеков кассеты, определяется по [20];

τ_{TO} – продолжительность тепловой обработки, включая продолжительность предварительной выдержки;

$\tau_{под}$ – продолжительность распалубки, чистки смазки, армирования и сборки кассетной установки.

Число кассетных установок, необходимых для выполнения годовой программы цеха, определится по формуле

$$N_K = \frac{P_{год}}{M_K},$$

где $P_{год}$ – годовая программа цеха с учетом потерь от брака, м³.

Для формирования изделий из смесей с подвижностью 6–8 см (более эффективных по расходу цемента) часто применяют комплексное виброуплотнение, когда наряду с вибрированием бетонной смеси через разделительные стенки применяют виброуплотнение с помощью глубинных вибраторов, подвешенных на гребенке и опускаемых в отсек с помощью мостового крана.

Режим тепловой обработки

В условиях почти полностью замкнутого формовочного отсека (1,5–6,0 % открытой поверхности изделия) создаются наиболее благоприятные условия для твердеющего бетона. Возникающее избыточное давление в порах бетона почти полностью воспринимается жесткими стенками отсека. Нарушения структуры бетона при этом оказываются минимальными. Именно поэтому в ряде случаев появляется возможность отказаться от предварительной выдержки перед тепловой обработкой, более интенсивно проводить стадию нагрева изделий, что в конечном итоге приводит к существенному сокращению продолжительности тепловой обработки. Верхнюю, открытую поверхность изделий, чтобы защитить бетон от высыхания, необходимо укрывать брезентом, резиной, пленками, колпаками или заливать водой после схватывания цемента.

Режимы тепловой обработки назначаются в соответствии с [20, 29] и уточняются в ходе освоения выпуска изделий.

Для интенсификации изготовления изделий в кассетных установках следует применять двухэтапную тепловую обработку. Первый этап тепловой обработки при этом проводится в кассете до достижения бетоном изделия распалубочной прочности (50–75 кг/м³). Затем после распалубки изделия твердеют в камерах дозревания. Длительность технологического цикла при этом сокращается на 2–3 ч, а в некоторых случаях и более. Камеры дозревания могут быть ямного типа с внутренним утеплением. Камеры дозревания устраиваются напротив каждой кассетной установки.

Определение толщины теплоизоляции кассетной установки

Теплоизоляция двух вертикальных поверхностей крайних тепловых отсеков выполняется, как правило, из минераловатных плит с защитой их металлическим листом толщиной $\delta_{защ} = 1–3$ мм.

Для определения толщины теплоизоляции вертикальных поверхностей крайних тепловых отсеков кассетной установки рассчитывают

последовательно коэффициенты теплоотдачи конвекцией α_k и лучеиспусканием α_l , коэффициент теплопередачи K . Задаваясь материалом теплоизоляции (его коэффициентом теплопроводности α_u), определяем толщину теплоизоляционного слоя δ_u .

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k , $Bm / (m^2 \times K)$, можно рассчитать по следующей формуле:

$$\alpha_k = 1,66 \cdot \sqrt[3]{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

где t_{CT}'' – температура наружной поверхности ограждения тепловой установки. Принимается не выше 30–45°C из условий техники безопасности, экономических и гигиенических соображений. Для уменьшения теплопотерь в окружающую среду целесообразно принимать меньшие значения температуры;

t_{OC} – температура воздуха в цехе, принимается равной 15–20°C.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием α_l , $Bm / (m^2 \times ^\circ K)$, определяется по формуле

$$\alpha_l = \frac{C \times \left[\left(\frac{273 + t_{CT}''}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{OC}}{100} \right)^4 \right]}{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

где C – коэффициент излучения наружной поверхности защитного слоя, $Bm / (m^2 \times K^4)$.

Коэффициент теплопередачи K , $Bm / (m^2 \times K)$, можно определить по формуле

$$K = \frac{(\alpha_k + \alpha_l) \times (t_{CT}'' - t_{OC})}{t_C - t_{OC}},$$

где t_C – температура среды в ямной пропарочной камере в период изотермической выдержки.

Толщину слоя теплоизоляции можно вычислить из следующего соотношения:

$$\frac{\delta_H}{\lambda_H} + \frac{\delta_{II}}{\lambda_{II}} + \frac{\delta_{зашц}}{\lambda_{зашц}} = \frac{\alpha_K + \alpha_{Л} - K}{(\alpha_K + \alpha_{Л}) \times K},$$

где δ_H – толщина несущего слоя, м. В качестве несущего слоя в данном случае принимается стенка парового отсека, которая выполняется из стального листа $\delta_H = 0,024$ м.

δ_{II} – толщина слоя тепловой изоляции, м;

$\delta_{зашц}$ – толщина защитного слоя, м.

$\delta_{зашц} = 0,001 \dots 0,003$ м.

$\lambda_H, \lambda_{II}, \lambda_{г II}$ – коэффициенты теплопроводности, Вт / (м² × К), соответственно несущего слоя, слоя теплоизоляции и защитного слоя. Определяются по справочным данным для известного материала каждого из слоев.

Теплотехнический расчет кассеты

Исходные данные для теплотехнического расчета

Для удобства выполнения теплотехнического расчета все исходные данные систематизируются в табличной форме. Перед систематизацией исходных данных должны быть выполнены все необходимые вспомогательные расчеты по нижеприведенным формулам:

1. Объем бетона в кассете при тепловой обработке, м³

$$V_{\phi}^{Kac} = V_{II}^{\phi} \times N_{\phi O}^{Kac}$$

где V_{II}^{ϕ} – объем бетона в изделии, м³;

$N_{\phi O}^{Kac}$ – число формовочных отсеков в кассете, шт.

2. Ориентировочная длина, ширина (толщина) и высота пакета формовочных и тепловых отсеков, м

$$L = l_{изд} + 0,5;$$

$$B = b_{II} \times N_{\phi}^{Kac} + 2\delta_{II} + \left(\frac{N_{\phi}^{Kac}}{2} + 1 \right) \times 0,15 + \left(\frac{N_{\phi}^{Kac}}{2} - 1 \right) \times 0,024;$$

$$H = h_{изд} + 0,25,$$

где b_{II} – ширина (толщина) изделия, м;

l_{II} – длина изделия, м;

$h_{ИЗД}$ – высота изделия, м;

$N_{\Phi}^{кас}$ – число формовочных отсеков в кассете.

3. Площадь изолированной поверхности кассеты, м

$$F_1 = 2 \times L \times H.$$

4. Площадь верхней неизолированной поверхности, м²

$$F_2 = L \times B.$$

5. Площадь боковой неизолированной поверхности, м²

$$F_3 = 2 \times (2 \times B \times H).$$

6. Площадь нижней неизолированной поверхности пакета формовочных и тепловых отсеков, м²

$$F_4 = 2 \times (L \times B).$$

7. Коэффициент теплопередачи K_1 , $Bm / (m^2 \times K)$, для боковой изолированной поверхности крайних тепловых отсеков определяется в следующей последовательности:

а) коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k^1 , $Bm / (m^2 \times K)$

$$\alpha_k^1 = 2,2 \times \sqrt[4]{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

где t_{OC} – температура окружающего воздуха в цехе, принимается равной 15–17°C;

t_{CT}'' – температура боковой изолированной поверхности снаружи, °C. На стадии подъема температуры и изотермической выдержки принимается равной $t_{CT}'' = 20 - 25^\circ C$;

б) коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием α_L^1 , $Bm / (m^2 \times K)$, для боковой изолированной поверхности

$$\alpha_L^1 = \frac{C \times \left[\left(\frac{273 + t_{CT}''}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{OC}}{100} \right)^4 \right]}{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

где C – коэффициент излучения поверхности, $Bm / (m^2 \times K^4)$.

Для железа матового окисленного можно принять $C = 5,52$;

в) коэффициент теплопередачи изолированной боковой поверхности крайних тепловых отсеков на стадии подъема температуры K_1 , $Bm / (m^2 \times K)$

$$K_1 = \frac{(\alpha_K^1 + \alpha_L^1) \times (t_{CT}'' - t_{OC})}{t_C - t_{OC}},$$

где t_C – температура изотермической выдержки, °С.

8. Коэффициент теплопередачи K_2 , $Bm / (m^2 \times K)$, для верхней неизолированной поверхности определяется в следующей последовательности:

а) коэффициент теплоотдачи конвекцией α_K^2 , $Bm / (m^2 \times K)$, для этой поверхности

$$\alpha_K^2 = 2,8 \times \sqrt[4]{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

где t_{CT}'' – температура верхней неизолированной поверхности снаружи, °С. Принимается равной на стадии подъема температуры и изотермической выдержки $t_{CT}'' = t_C$;

б) коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием α_L^2 , $Bm / (m^2 \times K)$, для верхней неизолированной поверхности

$$\alpha_L^2 = \frac{C \times \left[\left(\frac{273 + t_{CT}''}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{OC}}{100} \right)^4 \right]}{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

где C – коэффициент излучения поверхности, $Bm / (m^2 \times K^4)$. Для бетона можно принять $C = 4,89$;

в) коэффициент теплопередачи неизолированной верхней поверхности пакета формовочных и тепловых отсеков на стадии подъема температуры K_2 , $Bm / (m^2 \times K)$

$$K_2 = \frac{(\alpha_K^2 + \alpha_L^2) \times (t_{CT}'' - t_{OC})}{t_C - t_{OC}}.$$

9. Коэффициент теплопередачи K_3 , $Bm / (m^2 \times K)$, для боковой неизолированной поверхности определяется в следующей последовательности:

а) коэффициент теплоотдачи конвекцией α_K^3 , $Bm / (m^2 \times K)$, для этой поверхности

$$(\alpha_K^3) = 2,2 \times \sqrt[4]{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

где t_{CT}'' – температура боковой неизолированной поверхности снаружи, °С. На стадии подъема температуры и изотермической выдержки принимается равной $t_{CT}'' = t_C$;

б) коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием α_L^3 , $Bm / (m^2 \times K)$, для боковой неизолированной поверхности

$$\alpha_L^3 = \frac{C \times \left[\left(\frac{273 + t_{CT}''}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{OC}}{100} \right)^4 \right]}{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

где C – коэффициент излучения поверхности, $Bm / (m^2 \times K)$. Для железа матового окисленного можно принять $C=5,52$;

в) коэффициент теплопередачи неизолированной боковой поверхности пакета формовочных и тепловых отсеков на стадии подъема температуры K_3 , $Bm / (m^2 \times K)$

$$K_3 = \frac{(\alpha_K^3 + \alpha_L^3) \times (t_{CT}'' - t_{OC})}{t_C - t_{OC}}.$$

10. Коэффициент теплопередачи K_4 , $Bm / (m^2 \times K)$, для нижней неизолированной поверхности определяется в следующей последовательности:

а) коэффициент теплоотдачи конвекцией α_K^4 , $Bm / (m^2 \times K)$, для этой поверхности

$$\alpha_K^4 = 1,6 \times \sqrt[4]{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

где t_{CT}'' – температура нижней неизолированной поверхности снаружи, °С. На стадии подъема температуры и изотермической выдержки принимается равной $t_{CT}'' = t_C$;

б) коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием α_L^4 , $Bm / (m^2 \times K)$, для нижней неизолированной поверхности

$$\alpha_L^4 = \frac{C \times \left[\left(\frac{273 + t_{CT}''}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{OC}}{100} \right)^4 \right]}{t_{CT}'' - t_{OC}},$$

C – коэффициент излучения поверхности, $Bm / (m^2 \times K)$. Для железа матового окисленного можно принять $C = 5,52$;

в) коэффициент теплопередачи неизолированной нижней поверхности пакета формовочных и тепловых отсеков на стадии подъема температуры K_4 , $Bm / (m^2 \times K)$

$$K_4 = \frac{(\alpha_K^4 + \alpha_L^4) \times (t_{CT}'' - t_{OC})}{t_C - t_{OC}}.$$

Заимствованные из справочной и нормативной литературы данные, а также полученные в ходе предварительных расчетов, систематизируются в табл. ПЗ.1.

Расход тепла на стадии подъема температуры

1. Расход тепла на нагрев изделий, $кДж/м^3$:

$$Q_1^1 = [C_{TB} \times (Гp + П + Ц) + C_M \times G_a + C_B \times B] \times (t_C - t_{\bar{o}}).$$

2. Расход тепла на нагрев кассеты, $кДж/м^3$:

$$Q_2^1 = \frac{(G_{кас} + 0,2G_{P.M.}) \times C_M \times (t_C - t_{кас})}{V_{\bar{o}}^{кас}}.$$

3. Расход тепла на нагрев теплоизоляции кассетной установки, $кДж/м^3$:

$$Q_3^1 = \frac{2 \times L \times H \times \delta_H \times C_{ИЗ} \times (t_1 - t_{OC})}{V_{\bar{o}}^{кас}},$$

где t_1 – средняя температура теплоизоляции кассеты в период изотермической выдержки, $^{\circ}C$. Ориентировочно можно принять $60-70^{\circ}C$.

4. Расход тепла на нагрев воздуха в тепловых отсеках, $кДж/м^3$

$$Q_4^1 = \frac{\left(\frac{N_{\Phi}^{кас}}{2} + 1 \right) \times L \times B \times 0,15 \times \rho^{возд} \times C_{возд} \times (t_C - t_{OC})}{V_{\bar{o}}^{кас}}.$$

Таблица ПЗ.1

Исходные данные для теплотехнического расчета кассетной установки

Наименование показателей	Обозначение	Численное значение
Характеристики изделий, формуемых в кассете		
1. Масса крупного заполнителя в 1 м ³ бетона, кг	Гр	
2. Масса мелкого заполнителя в 1 м ³ бетона, кг	П	
3. Масса воды в 1 м ³ бетона, кг	В	
4. Масса цемента в 1 м ³ , кг	Ц	
5. Марка цемента	Мц	
6. Водоцементное отношение бетона	В/Ц	
7. Масса арматуры, приходящейся на 1 м ³ бетона	G _а	
8. Объем бетона в изделия, м ³	V _Н ^б	
Характеристики кассетной установки		
9. Число формовочных отсеков в кассете, шт.	N ^{кас} _{Ф.О.}	
10. Объем бетона, формуемого в кассете, м ³	V _б ^{кас}	
11. Масса кассетной установки, кг	G _{кас}	
12. Масса распалубочной машины, кг	G _{Р.М.}	
13. Длина пакета тепловых и формовочных отсеков, м	L	
14. Ширина пакета тепловых и формовочных отсеков, м	B	
15. Высота пакета тепловых и формовочных отсеков, м	H	
16. Толщина слоя теплоизоляции кассеты, м	δ _И	
17. Средняя плотность материала изоляции, кг/м ³	ρ _И	
18. Коэффициент теплопередачи боковой изолированной поверхности пакета формовочных и тепловых отсеков, Вт/м ² ×К	K ₁	
19. Коэффициент теплопередачи верхней неизолированной поверхности пакета формовочных и тепловых отсеков, Вт/м ² × К	K ₂	
20. Коэффициент теплопередачи боковой неизолированной поверхности пакета формовочных и тепловых отсеков, Вт/м ² × К		
21. Коэффициент теплопередачи нижней неизолированной поверхности пакета формовочных и тепловых отсеков, Вт / м × К	K ₃ K ₄	

Окончание табл. ПЗ.1

Наименование показателей	Обозначение	Численное значение
Температурные характеристики		
22. Температура воздуха в цехе, °С	t_{oc}	
23. Начальная температура бетона, °С	t_6	
24. Температура изотермической выдержки, °С	t_c	
25. Начальная температура металла кассеты, °С	$t_{кас}$	
26. Средняя температура теплоизоляции кассеты в период изотермической выдержки, °С	t_1	
Характеристики режима тепловой обработки		
27. Продолжительность предварительной выдержки, ч	$\tau_{пв}$	
28. Продолжительность подъема температуры, ч	τ_1	
29. Продолжительность изотермической выдержки, ч	τ_2	
Теплофизические характеристики водяного пара и конденсата		
30. Скрытая теплота парообразования при средней температуре за стадию подъема температуры, кДж/кг	r_1	
31. Скрытая теплота парообразования при температуре изотермической выдержки, кДж/кг	r_2	
32. Теплосодержание конденсата при средней температуре на стадии подъема температуры, кДж/кг	i_1	
33. Теплосодержание конденсата при температуре изотермической выдержки, кДж/кг	i_2	
Прочие исходные данные		
34. Коэффициент, учитывающий прочие потери	μ	
35. Принятое в расчете количество кассет, шт.	$N_{к\text{ в с}}$	
36. Годовая программа цеха, м ³ /год	$\Pi_{год}$	
37. Удельная теплоемкость металла (сталь), кДж/кг х°С	C_m	0,482
38. Удельная теплоемкость материала теплоизоляции крайних тепловых отсеков, кДж / кг х°С	$C_{из}$	0,837
39. Удельная теплоемкость материалов твердой фазы бетона, кДж/кг х°С	$C_{тв}$	0,837
40. Удельная теплоемкость воды, кДж /кг х °С	C_v	4,187
41. Удельная теплоемкость воздуха, кДж /к гх°С	$C_{возд}$	1,015
42. Истинная плотность воздуха при 20 °С, кг/м ³	$\rho^{возд}$	1,104

5. Расход тепла на компенсацию теплопотерь с поверхностей пакета формовочных и тепловых отсеков кассеты, кДж/м^3

$$Q_5^1 = \frac{(K_1 \times F_1 + K_2 \times F_2 + K_3 \times F_3 + K_4 \times F_4) \times (t_c - t_{oc})}{V_6^{кас}} \times \tau_1.$$

6. Расход тепла на испарение воды из бетона, кДж/м^3

$$Q_6^1 = 0,01(\Gamma p + \Pi + B + \mathcal{U}) \times \left(2501 + 1,84 \frac{t_c + t_{oc}}{2} \right).$$

7. Расход тепла на компенсацию теплопотерь с уходящим конденсатом, кДж/м^3 :

$$Q_7^1 = \frac{\sum_1^6 (Q_i^1)}{r_1} \times i_1.$$

Прочие расходы тепла (утечки через неплотности, пролетный пар и т.д.), кДж/м^3 :

$$Q_8^1 = \mu \times \sum_1^7 Q_i^1,$$

где μ — коэффициент, учитывающий утечки пара через неплотности, пролетный пар и т.д. Принимается равным:

- при ручном и полуавтоматическом регулировании $\mu = 0,3$;
- при автоматическом регулировании $\mu = 0,15$.

8. Суммарный расход тепла в период подъема температуры, кДж/м^3

$$Q_9^1 = \sum_1^8 Q_i^1.$$

Расход тепла на стадии изотермической выдержки

1. Расход тепла на компенсацию теплопотерь с поверхностей пакета формовочных и тепловых отсеков кассеты, кДж/м^3

$$Q_1'' = \frac{(K_1 \times F_1 + K_2 \times F_2 + K_3 \times F_3 + K_4 \times F_4) \times (t_c - t_{oc})}{V_6^{кас}} \times \tau_2.$$

2. Расход тепла на испарение воды из бетона [30], кДж/м^3 :

$$Q_2'' = 0,01(\Gamma p + \Pi + B + \mathcal{U}) \times (2501 + 1,84 \times t_c).$$

3. Расход тепла на компенсацию тепловотерь с уходящим конденсатом, кДж/м³

$$Q_3^{\text{II}} = \frac{\sum_1^3 (Q_i^{\text{II}})}{r_1} \times i_1,$$

4. Прочие расходы тепла (утечки через неплотности, пролетный пар и т.д.). КДж/м³:

$$Q_4^{\text{II}} = \mu \times \sum_1^3 Q_i^{\text{II}},$$

где μ – коэффициент, учитывающий утечки пара через неплотности, пролетный пар и т.д. Принимается:

- при ручном и полуавтоматическом регулировании $\mu = 3$;
- при автоматическом регулировании $\mu = 0,15$.

5. Суммарный расход тепла в период подъема температуры, кДж/м³

$$Q_5^{\text{II}} = \sum_1^4 Q_i^{\text{II}}.$$

Суммарный расход тепла за обе стадии тепловой обработки, кДж/м³:

$$Q_P = Q_9^{\text{I}} + Q_5^{\text{II}}.$$

Приход тепла

Приход тепла осуществляется за счет двух источников: тепла экзотермических реакций цемента и тепла, приносимого со свежим паром. Приход за счет этих двух статей должен компенсировать общий расход тепла на стадиях подъема температуры и изотермической выдержки.

1 Тепловыделение 1 м³ бетона в кДж/м³ на стадии подъема температуры определяется по формуле

$$Q_9^{\text{I}} = q_9^{\text{I}} \times C,$$

где q_9^{I} – тепловыделение 1 кг цемента на стадии подъема температуры, кДж/кг. Удельное тепловыделение цемента известной марки определяет-ся по формуле или номограмме [5].

Число градусо-часов, полученных бетоном на стадии подъема температуры, рассчитывается по формуле

$$\theta^I = t_{\delta} \times \tau_{ПВ} + \frac{t_{\delta} + t_C}{2} \times \tau_1.$$

2. Тепло, приносимое паром на стадии подъема температуры, определяется по формуле, кДж/м³:

$$Q_{II}^I = Q_9^I - Q_{\mathcal{E}}^I.$$

3. Тепловыделение 1 м³ бетона, кДж/м³, на стадии изотермической выдержки определится по формуле

$$Q_{\mathcal{E}}^{II} = q_{\mathcal{E}}^{II} \times II,$$

где $q_{\mathcal{E}}^{II}$ – тепловыделение 1 кг цемента на стадии изотермической выдержки, кДж. Определяется как разность между тепловыделением бетона за весь цикл обработки и тепловыделением на стадии подъема температуры, т е.

$$q_{\mathcal{E}}^{II} = q_{\mathcal{E}}^{I+II} - q_{\mathcal{E}}^I.$$

Определение удельного тепловыделения за весь цикл тепловой обработки $q_{\mathcal{E}}^{I+II}$, кДж/м³, производится аналогично определению $q_{\mathcal{E}}^I$, но при числе градусо-часов θ^{I+II} , рассчитанном по формуле

$$\theta^{I+II} = t_{\delta} \times \tau_{ПВ} + \frac{t_{\delta} + t_C}{2} \times \tau_1 + t_C \times \tau_2.$$

4. Тепло, кДж/м³, приносимое паром на стадии изотермической выдержки равно

$$Q_{II}^{II} = Q_5^{II} - Q_{\mathcal{E}}^{II}.$$

5. Расход тепла, кДж/м³, за весь цикл тепловой обработки определяется по формуле

$$Q_{II}^{общ} = Q_{II}^I + Q_{II}^{II}.$$

Результаты расчета обобщаются в таблице (ПЗ.2).

Расход пара, кг/м³, на тепловую обработку 1 м³ бетона определится по формуле

$$G_{II} = \frac{Q_{II}^{общ}}{i},$$

где i – теплосодержание (энтальпия) 1 кг пара при температуре 100°C.

Технико-экономические показатели

Решение всех основных вопросов - выбор режима работы тепловой установки, раскладки изделий в тепловой установке, ее конструкции и т.д. — должно быть подчинено задаче получения наилучших технико-экономических показателей, которые являются основными критериями показателей аналогичных установок на передовых предприятиях (из литературных источников).

Показателем эффективности использования внутреннего объема кассетной установки является коэффициент загрузки

$$K_{\text{загр}} = \frac{V_{\text{б}}^{\text{кас}}}{V_{\text{ФО}}},$$

где $V_{\text{ФО}}$ — объем всех формовочных отсеков в кассете, м^3 .

Коэффициент оборачиваемости кассетных установок является показателем эффективности их использования во времени и может быть определен по формуле

$$K_{\text{об}} = \frac{16}{T_{\text{ц}}}.$$

Уточненное значение коэффициента оборачиваемости кассетных установок можно определить по циклограмме работы кассет.

Комплексным показателем оценки эффективности работы кассетных установок является годовой съем продукции с 1 м^3 их формовочного объема, определяемый по формуле

$$C_{\text{год}} = \frac{\Pi_{\text{год}}}{N_{\text{К}} \times V_{\text{ФО}}}.$$

Тепловой коэффициент полезного действия равен

$$\text{КПД} = \frac{Q_1^{\text{I}}}{Q_{\text{П}}^{\text{общ}}}.$$

Удельный расход тепла, кДж/м^3

$$q = Q_{\text{П}}^{\text{общ}}.$$

Удельный расход пара, кг/м^3

$$g = G_{\text{П}}.$$

Таблица ПЗ.2

Тепловой баланс кассетной установки

Наименование статей	1 стадия	2 стадия	За обе стадии	
			кДж	%
<i>Расход тепла</i>				
1. Нагрев изделий	—	—	—	—
2. Нагрев кассеты		—	—	—
3. Нагрев теплоизоляции кассетной установки	—	—	—	—
4. Нагрев воздуха в тепловых отсеках	—	—	—	—
5. Теплопотери с поверхностей пакета формовочных и тепловых отсеков	—	—	—	—
6. Испарение воды из бетона	—	—	—	—
7. Теплопотери с уходящим конденсатом	—	—	—	—
8. Прочие расходы тепла	—	—	—	—
ИТОГО:				100,0
<i>Приход тепла</i>	—	—	—	—
1. Тепло экзотермии цемента	—	—	—	—
2. Тепло, приносимое паром	—	—	—	—
ИТОГО:				100,0

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АВТОКЛАВА

Исходные данные:

1. Вид изделия.
2. Геометрические размеры изделия, м:
длина – l ,
ширина – b ,
высота – h ,
3. Масса изделия – $G_{из}$, кг.
4. Объем бетона в изделии – $V_б$, m^3 .
5. Объем одного изделия – $V_{из}$, m^3 .
6. Расход арматуры на 1 m^3 бетона – $G_{аб}$, кг.
7. Расход арматуры на 1 изделие – G_a , кг.
8. Водотвердое отношение В/Т.
9. Марка цемента – $M_{ц}$.
10. Марка бетона – $M_б$.
11. Масса бетона в изделии – $G_б$, кг.
12. Объемная масса свежесушеного бетона (бетонной смеси)
 $\rho = G_{ц} + G_в + G_{п} + G_{щ} + G_{и} + G_з + G_{ш} + G_{гзк} + G_{ал}$.
13. Расход материалов на 1 m^3 , кг:
цемент – $G_{ц}$,
вода – $G_в$,
песок – $G_{п}$,
щебень – $G_{щ}$,
известь – $G_{и}$,
зола – $G_з$,
шлак – $G_{ш}$,
кремнеземистый компонент – $G_{кк}$,
алюминиевая пудра – $G_{ал}$.
14. Вес сухих веществ на 1 m^3 – $G_{сб}$, кг.
15. Вес сухих веществ на 1 изделие, кг
 $G_{с1} = G_{сб} \cdot V_б$
16. Количество воды, вступившее в реакцию с вяжущим – $G_{вс}$, кг,
(согласно НС 277-80 количество связанной воды принимается как 10% от массы ячеистого бетона).
17. Масса формы, кг – $G_{ф}$.
18. Размеры формы, м:
длина – $l_{ф}$,
ширина – $b_{ф}$,

высота – h_{ϕ} .

19. Масса решетки запаривания – $G_{\text{реш1}}$, кг.
20. Масса вагонетки – $G_{\text{ваг1}}$, кг.
21. Температура загружаемых изделий – t_0 , °С.
22. Температура окружающей среды – t_{oc} , °С.
23. Начальная температура в автоклаве – t_1 , °С.
24. Температура запаривания – $t_{\text{из}}$, °С.
25. Температура изделий при выгрузке из автоклава – $t_{\text{ох}}$, °С.
26. Удельная теплоемкость бетона – c_6 , Дж/кг·град.
27. Коэффициенты:
теплопроводности бетона – λ_6 , Вт/м·град;
температуропроводности бетона – a_6 , м²/час.
28. Прочность бетона после тепловлажностной обработки – $R_{\text{ТВО}}$, МПа (%).

Выбор автоклава. Характеристика

1. Число изделий, расположенных в автоклаве – N_1 , шт.

Количество изделий, расположенных в автоклаве, определяется по эскизу из соображения максимальной загрузки. При этом необходимо учитывать следующие расстояния:

- от стен до изделий (форм) – 50-100 мм,
- по вертикали между отдельными изделиями (при необходимости) – 30 мм,
- по горизонтали между отдельными изделиями или блоками изделий – 50-100 мм.

2. На основании эскиза раскладки изделий в автоклаве подбирается стандартный автоклав и количество изделий в автоклаве (N_1) уточняется, исходя из его размеров и количества вагонеток ($N_{\text{вг}}$), входящих в камеру. Предпочтение следует отдавать автоклавам больших диаметра и длины, так как они позволяют при одинаковых режимах ТВО увеличивать производительность, что повысит эффективность их использования.

Приводится тип автоклава.

3. Размеры камеры:

Внутренние размеры, м:

длина – L ,

диаметр – $D_{\text{вн}}$.

Габаритные размеры, м:

длина – $L_{\text{к}}$,

ширина – $B_{\text{к}}$,

высота – $H_{\text{к}}$,

диаметр – $D_{\text{вн}}$.

Толщина стены – $d_{\text{ст}}$, м.

Толщина крышки – $d_{\text{кр}}$, м.

Наружная поверхность автоклава, м^2

$$F = 2 \cdot F_{\text{кр}} + F_{\text{бв}},$$

где F – наружная поверхность автоклава, м^2 ;

$F_{\text{кр}}$ – площадь крышки, м^2 ;

$F_{\text{бв}}$ – площадь боковой поверхности, м^2 .

4. Рабочий объем автоклава, м^3

$$V_{\text{к}} = 3,14 \cdot L \cdot \frac{D_{\text{вн}}^2}{4}.$$

5. Суммарный объем бетона изделий, входящих в автоклав, м^3 :

$$V_{\text{бк}} = N_1 \cdot V_{\text{б}}.$$

6. Суммарная масса бетона изделий, входящих в автоклав, кг:

$$G_{\text{бк}} = V_{\text{бк}} \cdot \rho_{\text{бс}}.$$

7. Объем формы, м^3

$$V_{\text{ф1}} = \frac{G_{\text{ф}}}{\rho_{\text{ф}}}.$$

8. Суммарный объем форм изделий, находящихся в автоклаве, м^3 :

$$V_{\text{ф}} = V_{\text{ф1}} \cdot N_1.$$

9. Масса вагонеток, загружаемых в камеру

$$G_{\text{ваг}} = G_{\text{ваг1}} \cdot N_1.$$

10. Масса решеток запаривания, входящих в автоклав:

$$G_{\text{рз}} = G_{\text{рз1}} \cdot N_1.$$

11. Коэффициент заполнения автоклава бетоном изделий

$$q_{\text{б}} = \frac{V_{\text{бк}}}{V_{\text{к}}}.$$

12. Коэффициент заполнения автоклава формами

$$q_{\text{к}} = \frac{(V_{\text{ф}} - V_{\text{бк}})}{V_{\text{к}}}.$$

13. Коэффициент заполнения автоклава вагонетками

$$q_{\text{вг}} = \frac{G_{\text{вг}}}{\rho_{\text{вг}} \cdot V_{\text{к}}},$$

где $\rho_{\text{вг}}$ – плотность материала вагонеток, $\text{кг}/\text{м}^3$.

14. Коэффициент заполнения автоклава решетками запаривания

$$q_{\text{рз}} = \frac{G_{\text{рз}}}{\rho_{\text{рз}} \cdot V_{\text{к}}},$$

где $\rho_{\text{рз}}$ – плотность материала решеток запаривания, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Расчет количества автоклавов

Количество автоклавов определяется исходя из годовой производительности предприятия.

1. Годовая производительность одной камеры по объему:

$$\begin{aligned} \Pi_K &= \frac{V_6}{D_{\text{ц}}} \cdot T_{\text{об}} \cdot K_{\text{п}}; \\ D_{\text{ц}} &= T_3 + T_{\text{в}} + D; \\ T_{\text{об}} &= T \cdot K_{\text{ти}} \cdot K_{\text{г}} \cdot K_{\text{см}}; \\ T &= N_d \cdot N_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}}, \end{aligned}$$

где $D_{\text{ц}}$ – общая длительность полного цикла камеры, ч;

$T_{\text{об}}$ – нормативный годовой фонд времени работы, ч;

$K_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий потери ($K_{\text{п}} = 0,975 - 0,99$);

T_3 – продолжительность загрузки автоклава, ч;

$T_{\text{в}}$ – продолжительность выгрузки изделий, ч ($T_{\text{в}} = 1 - 2$ ч);

T_3 и $T_{\text{в}}$ принимают с учетом типа автоклава по ОНТП 09-85;

D – длительность процесса тепловлажностной обработки, ч;

T – номинальный фонд рабочего времени, ч;

$K_{\text{ти}}$ – коэффициент технического использования оборудования, ($K_{\text{ти}} = 0,95$);

$K_{\text{г}}$ – коэффициент готовности автоклава ($K_{\text{г}} = 0,98$);

$K_{\text{см}}$ – коэффициент использования сменного времени ($K_{\text{см}} = 1$);

N_d – номинальное количество рабочих дней в году;

$N_{\text{см}}$ – количество смен в сутки;

$T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч.

2. Требуемое количество автоклавов, шт.

$$N_{\text{кам}} = \frac{\Pi}{\Pi_K},$$

где Π – годовой объем выпуска изделий, м³.

Полученное значение $N_{\text{кам}}$ округляется до ближайшего большего и добавляется 1 резервная камера. Если количество автоклавов до 4, то принимают тупиковый вариант, если более, то проходной вариант исполнения тепловой установки.

Материальный баланс работы автоклава

Поступает в автоклав:

сухих веществ

$$G_c = V_{\text{бк}} \cdot G_{c1};$$

воды

$$G_w = V_{\text{бк}} \cdot G_{\text{в}} ;$$

металла форм

$$G_{\text{м}} = N_1 \cdot G_{\text{ф}} ;$$

арматуры и закладных деталей

$$G_{\text{ар}} = G_{\text{аб}} \cdot V_{\text{бк}} ;$$

вагонеток $G_{\text{ваг}}$,

решеток запаривания $G_{\text{рз}}$.

Выгружается из автоклава:

сухого бетона

$$G_{\text{бс}} = G_{\text{с}} + G_{\text{вг}} .$$

Вода, перешедшая в гидратную влагу

$$G_{\text{вг}} = G_{\text{вс}} \cdot V_{\text{бк}} .$$

Остаточная влага изделий

$$G_{\text{w,ост}} = G_{\text{w}} - G_{\text{вг}} - G_{\text{w}} \cdot \frac{a_1 + a_2}{100} .$$

Испарившаяся вода

$$G_{\text{ви}} = G_{\text{w}} \cdot \frac{a_2}{100} ,$$

где a_2 – процент испарившейся воды за период запаривания.

Испаряется вода

$$G_{\text{w,ио}} = G_{\text{w}} \cdot \frac{a_3}{100} ,$$

где a_3 – процент испарившейся влаги за период снижения давления;
металла форм

$$G_{\text{м}} = N_1 \cdot G_{\text{ф}} ;$$

арматуры и закладных деталей

$$G_{\text{ар}} = G_{\text{аб}} \cdot V_{\text{бк}} ;$$

вагонеток $G_{\text{ваг}}$;

решеток запаривания $G_{\text{рз}}$.

Тепловой баланс автоклава

Тепловой баланс рассчитывается по периодам работы тепловой установки. Единицей расчета служит кДж/период.

Тепловой баланс периода подъема температуры

1. Приход тепла:

1.1. Теплосодержание сухой части бетонной смеси изделий, загружаемых в автоклав:

$$Q_{1-1} = G_{\text{с}} \cdot c_{\text{б}} \cdot t_0 ,$$

где $c_{\text{б}}$ – теплоемкость бетона, кДж/кг·град.

1.2. Теплосодержание влаги, содержащейся в бетонной смеси:

$$Q_{1-2} = G_{\text{w}} \cdot c_{\text{w}} \cdot t_0 ,$$

где c_w – теплоемкость воды, кДж/кг·град.

- 1.3. Теплосодержание арматуры и закладных деталей изделий, загружаемых в автоклав

$$Q_{1-3} = G_{ap} \cdot c_a \cdot t_0,$$

где c_a – теплоемкость арматуры, кДж/кг·град.

- 1.4. Теплосодержание форм

$$Q_{1-4} = G_m \cdot c_\phi \cdot t_0,$$

где c_ϕ – теплоемкость материала формы, кДж/кг·град.

- 1.5. Тепло экзотермии вяжущего

$$Q_{1-5} = (q_{ц} \cdot G_{ц} + q_{и} \cdot G_{и}) \cdot V_{и} \cdot N_{п},$$

где $N_{п}$ – количество изделий в зоне;

$V_{и}$ – объем бетона в изделии, м³.

- 1.6. Тепло материалов ограждений

$$Q_{1-6} = \sum_{i=1}^n V_{iогр} \cdot \rho_{iогр} \cdot c_{iогр} \cdot t_{iогр},$$

где $V_{iогр}$ – объем i-го материала в ограждении, м³;

$\rho_{iогр}$ – плотность i-го материала, кг/м³;

$c_{iогр}$ – удельная теплоемкость i-го материала, кДж/кг·град;

$t_{iогр}$ – средняя температура i-го материала, °C.

- 1.7. Тепло, вносимое теплоносителем:

$$Q_{1-7} = G_1 \cdot i_{п}$$

где G_1 – количество подаваемого теплоносителя в период подогрева;

$i_{п}$ – энтальпия теплоносителя при температуре его подачи в автоклав или при давлении в паропроводе.

- 1.8. Сумма приходных статей

$$Q_{1п} = \sum_{i=1}^n Q_{1-i}.$$

2. Расход тепла:

- 2.1. На нагрев сухих материалов

$$Q_{2-1} = G_c \cdot c_6 \cdot t_{(1-2)6}.$$

- 2.2. На нагрев воды в бетонной смеси

$$Q_{2-2} = G_w \cdot c_w \cdot t_{(1-2)6}.$$

- 2.3. На нагрев арматуры и закладных деталей

$$Q_{2-3} = G_{ap} \cdot c_a \cdot t_{(1-2)6}.$$

- 2.4. На нагрев форм-вагонеток

$$Q_{2-4} = G_m \cdot c_m \cdot t_{из}.$$

- 2.5. Тепло материалов ограждений

$$Q_{2-5} = \sum_{i=1}^n V_{i\text{огр}} \cdot \rho_{i\text{огр}} \cdot c_{i\text{огр}} \cdot t_{2i\text{огр}},$$

где $t_{2i\text{огр}}$ – средняя температура i -го слоя материала ограждения, °С.

2.6. Потери тепла в окружающую среду через стены автоклава

$$Q_{2-6} = 3,6 \cdot k \cdot F_{\text{н}} \cdot D_{\text{п}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{ос}});$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·град;

$D_{\text{п}}$ – время подъема температуры, ч;

$t_{\text{ст}}$ – температуры внутренней поверхности автоклава, °С;

$t_{\text{ос}}$ – температуры окружающей среды, °С;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющей среды к разделяющей стенке, Вт/м³·град;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде, Вт/м³·град,

$$\alpha_2 = 2,6 \cdot \sqrt{t_{\text{ст}} - t_{\text{ос}}} + 5,7 \cdot \frac{E \cdot \left[\left(\frac{t_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 + \left(\frac{t_{\text{ос}} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{ст}} - t_{\text{ос}}}.$$

где b_i – толщина слоев ограждения, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности слоев ограждающих конструкций, Вт/м·град;

$t_{\text{ст}}$ – температуры наружной поверхности стен, °С (должна находиться в интервале 40-60°С);

E – степень черноты.

2.7. Потери тепла через крышку

$$Q_{2-7} = 3,6 \cdot k \cdot F_{\text{кр}} \cdot D_{\text{п}} \cdot (t_{(1-2)\text{o}} - t_{\text{ос}});$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i}},$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·град;

$D_{\text{п}}$ – время подъема температуры, ч;

$F_{\text{кр}}$ – площадь крышки, м²;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от пара к крышке, Вт/м³·град,

$$\alpha_2 = 2,6 \cdot \alpha_{\text{к}},$$

где b_i – толщина слоев крышки, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности слоев крышки, Вт/м·град;

$t_{\text{ст}}$ – температура наружной поверхности крышки, °С;

$t_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды, °С;

$\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи от крышки к окружающей среде, Вт/м²·град (табл. П4.1).

Таблица П4.1

Коэффициент теплоотдачи от крышки к окружающей среде

Температура наружной поверхности, °С	Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·град
10	9,81
25	10,45
40	10,69
60	11,63

2.8. Тепло, уносимое конденсатом:

$$Q_{2-8} = G_K \cdot c_K \cdot t_{(1-2)_0};$$

$$G_K = G_1 - G_{CB} - G_{PP};$$

$$G_{CB} = \rho_{\pi} \cdot (V_K - V_{BK} - V_{\Phi}),$$

где c_K – удельная теплоемкость конденсата, кДж/кг·град; G_{CB} – масса пара, заполняющего свободный объем камеры; G_{PP} – потери пара через неплотности установки в атмосферу (0,01-0,03 от общего расхода пара за период); ρ_{π} – плотность пара при средней температуре в автоклаве в период подъема давления.

2.9. Потери тепла с паром, уходящие через неплотности установки:

$$Q_{2-9} = G_{PP} \cdot c_{\pi} \cdot t_{(1-2)_0},$$

где c_{π} – удельная теплоемкость пара, кДж/кг·град.

2.10. Сумма расходных статей

$$Q_{1p} = \sum_{i=1}^n Q_{2-i}.$$

Уравнение теплового баланса для периода подъема температуры

$$Q_{1п} = Q_{1р}.$$

Решая данное уравнение, определим расход теплоносителя, поданного в камеру в период подъема температуры, – G_1 .

Среднечасовой расход теплоносителя, кг/ч:

$$G_{1c} = \frac{G_1}{D_{\pi}}.$$

Тепловой баланс периода запаривания

3. Приход тепла:

3.1. Теплосодержание сухой части бетонной смеси

$$Q_{3-1} = Q_{2-1}.$$

3.2. Теплосодержание влаги, содержащейся в бетонной смеси

$$Q_{3-2} = .$$

3.3. Теплосодержание арматуры и закладных деталей изделий

$$Q_{3-3} = Q_{2-3}.$$

3.4. Теплосодержание форм

$$Q_{3-4} = Q_{2-4}.$$

3.5. Тепло материалов ограждений

$$Q_{3-5} = Q_{2-5}.$$

3.6. Тепло, вносимое теплоносителем

$$Q_{3-6} = G_2 \cdot i_{п},$$

где G – количество подаваемого теплоносителя в период запаривания.

3.7. Сумма приходных статей

$$Q_{2п} = \sum_{i=1}^n Q_{3-i}.$$

4. Расход тепла:

4.1. На нагрев материалов

$$Q_{4-1} = G_c \cdot c_b \cdot t_{(1-2)би}.$$

4.2. На нагрев воды в бетонной смеси

$$Q_{4-2} = (G_w - G_{ви} - G_{вг}) \cdot c_w \cdot t_{(1-2)би}.$$

4.3. На нагрев арматуры и закладных деталей

$$Q_{4-3} = G_{ар} \cdot c_a \cdot t_{(1-2)би}.$$

4.4. На нагрев форм

$$Q_{4-4} = Q_{2-4}.$$

4.5. На нагрев материалов ограждений

$$Q_{4-5} = \sum_{i=1}^n V_{iогр} \cdot \rho_{iогр} \cdot c_{iогр} \cdot t_{2iогр},$$

где $t_{2iогр}$ – средняя температура i -го слоя материала ограждения, °С.

4.6. Потери тепла в окружающую среду через цилиндр автоклава

$$Q_{4-6} = 3,6 \cdot k \cdot F_n \cdot D_{и} \cdot (t_{ст} - t_{ос}).$$

4.7. Потери тепла через крышку автоклава

$$Q_{4-7} = 3,6 \cdot k \cdot F_{кр} \cdot D_{и} \cdot (t_{ст} - t_{ос}).$$

4.8. Потери тепла на испарение части воды затворения и нагрев водяных паров

$$Q_{4-8} = G_{ви} \cdot (r + C_{вп} \cdot t_{(1-2)би}),$$

где r – скрытая теплота парообразования;

$C_{вп}$ – теплоемкость водяного пара.

4.9. Тепло, уносимое конденсатом:

$$Q_{4-9} = G_k \cdot c_k \cdot t_{(1-2)о},$$

4.10. Потери тепла с паром, уходящим через неплотности установки:

$$Q_{4-10} = G_{\text{пр}} \cdot c_{\text{п}} \cdot t_{(1-2)0},$$

где $c_{\text{п}}$ – удельная теплоемкость пара, кДж/кг·град.

4.11. Расход тепла на нагрев паровоздушной смеси, заполняющей свободный объем камеры:

$$Q_{4-11} = G_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot t_{\text{из}}.$$

4.12. Сумма расходных статей

$$Q_{2\text{р}} = \sum_{i=1}^n Q_{4-i}.$$

Уравнение теплового баланса для периода подъема температуры

$$Q_{2\text{п}} = Q_{2\text{р}}$$

Решая данное уравнение, определим расход теплоносителя, поданного в камеру в период подъема температуры, – G_2 .

Среднечасовой расход теплоносителя, кг/ч:

$$G_{2\text{с}} = \frac{G_2}{D_{\text{и}}}.$$

Удельный расход пара

$$G_{\text{уп}} = \frac{G_1 + G_2}{V_{\text{БК}}}.$$

При превышении удельного расхода пара 170 кг/м^3 изменяют конструктивное решение ограждений тепловой установки или режим тепловой обработки и расчет повторяют (СН 513-79, ОНТП-07-85).

НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ

Назначение режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий

Назначение режимов тепловой обработки заключается в установлении оптимальной продолжительности отдельных ее периодов с целью обеспечения фактических ритмов работы тепловых установок и получения требуемой прочности без ухудшения конечных физико-механических свойств бетона.

При тепловой обработке бетона в камерах периодического действия прогрев изделий осуществляется при непосредственном их контакте с теплоносителем или кондуктивным способом.

Структура режима тепловой обработки характеризуется длительно-стью предварительного выдерживания, температурой и скоростью разогрева, продолжительностью и способом выдерживания разогретых изделий и выражается как сумма времени отдельных её периодов в часах.

Выдерживание разогретых изделий в камерах периодического действия может осуществляться путем термосного или изотермического прогрева. С точки зрения достижения минимальных энергозатрат на тепловую обработку предпочтительным является использование термосного выдерживания. Изотермический прогрев должен приниматься в том случае, если термосное выдерживание не обеспечивает достижение требуемой прочности к моменту распалубки.

Изотермический прогрев осуществляется путем подвода тепловой энергии, термосное выдерживание – без дополнительного подвода тепла.

Расчетные режимы тепловой обработки с изотермическим прогревом

Максимальные по продолжительности расчетные режимы тепловой обработки изделий при использовании изотермического прогрева в камерах периодического действия и режимы тепловой обработки изделий в камерах непрерывного действия для достижения отпускной прочности бетонов на портландцементе после последующего 12-часового выдерживания приведены в табл. 4 и 5.

Максимально допустимая температура бетона к концу периода нагрева не должна превышать 80–85°С при использовании портландце-

мента (в том числе и с минеральными добавками) и 90–95°C при использовании шлакопортландцемента.

Применение пониженных температур разогрева, обеспечивающих достижение заданной прочности бетона в требуемые сроки, позволяет снизить расход энергии в 1,5–2 раза по сравнению с расходом при 80–85°C.

При назначении режимов тепловой обработки следует учитывать следующие положения:

- При применении шлакопортландцемента в бетонах марок М400 длительность изотермического выдерживания следует увеличивать по сравнению с величинами, приведенными в табл. 3 и 4, на 1,5 ч.
- Период предварительного выдерживания не предусмотрен и принимается дополнительно для стандового производства 1 ч, для агрегатно-поточного и конвейерного производства – 0,5 ч. При тепловой обработке с механическим пригрузом в малонапорных и индукционных камерах, в кассетных установках, а также при применении разогретых бетонных смесей предварительное выдерживание можно не предусматривать.
- Продолжительность отдельных этапов тепловой обработки при соответствующем обосновании может быть изменена в пределах общей длительности тепловой обработки.
- При изменении химических добавок – ускорителей твердения цикл тепловой обработки сокращается на 1 ч за счет времени изотермической выдержки.
- При тепловой обработке изделий в малонапорных камерах с избыточным давлением до 0,03 МПа, а также под механическим пригрузом длительность тепловой обработки сокращается за счет времени подъема температуры для изделий толщиной до 300 мм на 1,5 ч, толщиной более 300 мм – на 1 ч.
- При применении предварительно разогретых до температуры 55±5°C бетонных смесей суммарное время подъема температуры и изотермического выдерживания сокращается на 2 ч для марок бетона до М 300 и на 1 ч – для бетона марок М 400 и выше.
- При изготовлении предварительно напряженных конструкций с отпуском напряжений на горячий бетон режимы тепловой обработки принимаются по табл. 3 и 4.
- В зимнее время при отрицательных температурах воздуха на полигонах расчетные режимы тепловой обработки следует увеличить на 2 ч за счет периода подъема и охлаждения.

Расчетные режимы тепловой обработки изделий из тяжелого бетона при температуре изотермической выдержки 80–85°C приведены в табл. П5.1.

Расчетные режимы тепловой обработки изделий из тяжелых бетонов в кассетах (при разложении паровых отсеков через два рабочих отсека) и пакетах приведены в табл. П5.2.

Таблица П5.1

Расчетные режимы тепловой обработки изделий из тяжелого бетона при температуре изотермической выдержки 80–85°C

Проектная марка бетона	Режимы тепловой обработки в часах при толщине бетона в изделиях, мм, до		
	160	300	400
200	11(3.5+6.5+2)	12(3.5+6.5+2)	13(3.5+6.5+3)
300	9(3+4+2)	10(3+5+2)	11(3+5.5+2.5)
400	8.5(3+3.5+2)	9.5(3+5+2)	10.5(3+5+2.5)
500	8(3+3+2)	9(3+4+2)	10(3+4.5+2.5)
600	7(3+2+2)	8(3+3+2)	9(3+3.5+2.5)

Таблица П5.2

Расчетные режимы тепловой обработки изделий из тяжелых бетонов в кассетах и пакетах

Толщина бетона в изделиях, мм	Проектная марка бетона	Режим тепловой обработки при 90–95°C, ч
До 100	М 150	1+4+4
101...200	М 150	1+5+5
До 100	М 200	1+3.5+3.5
101...200	М 200	1+4+4.5
До 100	М 300	1+3+3
101...200	М 300	1+3.5+4

Примечания:

1. Режим тепловой обработки включает в себя время подъема температуры в тепловом отсеке + время изотермического выдерживания с подачей пара в отсеки + время выдерживания без подачи пара в отсеки.
2. При прогреве изделий с двух сторон общий цикл тепловой обработке уменьшается на 1 ч за счет изотермического выдерживания.

Расчетные режимы тепловой обработки с термосным выдерживанием

При термосном выдерживании температура бетона изделий принимается в зависимости от вида бетона, требуемой оборачиваемости камер в сутки n , заданной прочности бетона изделий к концу термосного цикла и показателя A , характеризующего тепловую инерцию блока камер с изделиями.

Температура бетона изделий при термосном выдерживании для цементов Коркинского и Катав-Ивановского цементных заводов приведена в табл. П5.3.

Таблица П5.3

Температура бетона изделий при термосном выдерживании

Класс (марка) бетона	Заданная прочность бетона, % от R ₂₈	Температура разогрева бетона, °C, при значениях показателя А		
		10–40	41–80	81–150
При оборачиваемости камер в сутки n = 1				
В 15 (200)	50	75	70	60
	60	–	80	70
В 22.5 (300)	50	60	55	45
	60	75	70	65
	70	–	85	80
В 30 (400)	50	45	50	40
	60	60	55	50
	70	80	75	70
В 37,5 (500)	50	40	35	30
	60	50	45	40
	70	70	65	60
При оборачиваемости камер в сутки n = 1.5				
В 15 (200)	50	85	80	75
	60	–	–	–
В 22.5 (300)	50	80	75	70
	60	–	–	85
В 30 (400)	50	70	65	65
	60	85	80	75
В 37.5 (500)	50	50	45	45
	60	70	65	60

В таблице приняты постоянные величины:

- Длительность оборота камеры при $n = 1 - 24$ ч,
при $n = 1.5 - 16$ ч.
- Предварительное выдерживание изделий в камере – 3 ч.
- Скорость подъема температуры – 10 град/ч.
- Суммарная длительность загрузки и выгрузки камеры – 2 ч.

Длительность подъема температуры в изделиях определяется по формуле:

$$\tau_p = t_p / 10,$$

где t_p – температура разогрева, принимаемая по табл. П5.2.

Длительность термосного выдерживания определяется по следующим формулам:

для $n = 1$

$$\tau_{\text{ТВ}} = 24 - (3 + \tau_p + 2);$$

для $n = 1.5$

$$\tau_{\text{ТВ}} = 16 - (3 + \tau_p + 2).$$

Показатель длительности остывания блока камер с изделиями А рассчитывается по формуле

$$A = \frac{(c\gamma)_6 V_6 + (c\gamma)_M V_M + (c\gamma)_{\text{ок}} V_{\text{ок}}}{3.6(K_1 F_1 + K_2 F_2 + K_3 F_3 + K_4 F_4)},$$

где $(c\gamma)_6 V_6$ – соответственно объемная теплоемкость (кДж/м³·град) и объем бетона изделий в плотном теле (м) в блоке камер;

$(c\gamma)_M V_M$ – то же ограждающих конструкций блока камер;

$(c\gamma)_{\text{ок}} V_{\text{ок}}$ – то же металла в блоке камер;

$$V_M = (g_{\text{ф}} + g_{\text{кр}} + g_{\text{п}} + g_{\text{сo}})/7800.$$

Здесь $g_{\text{ф}}$ – масса металла форм в блоке камер, кг;

$g_{\text{кр}}$ – масса металлических элементов крышек в блоке камер, кг;

$g_{\text{п}}$ – масса стальной обшивки при теплоизоляции ограждений, кг;

$K_1 F_1$ – соответственно коэффициент теплопередачи, Вт/м²·град, и площадь наружных стен блока камер выше нулевой отметки пола, м²;

$K_2 F_2$ – то же для наружных стен ниже нулевой отметки пола, м²;

$K_3 F_3$ – то же для днища блока камер, м²;

$K_4 F_4$ – то же для крышек блока камер, м².

Для расчета рекомендуется применять следующие значения объемных теплоемкостей: для тяжелого бетона изделий и ограждающих конструкций камер – 2500 кДж/м³·град, для керамзитобетона – 1600 кДж/м³·град, для металлических форм, стоек и т.п. – 3800 кДж/м³·град.

Значения коэффициентов теплопередачи в зависимости от вида конструкции и материала, из которого выполнены ограждения, приведены в табл. П5.4.

В случае утепления внутренней поверхности ограждений из тяжелого бетона слоями изоляции толщиной δ (м), с сопоставлением теплопередаче R_0 (м²·град/Вт), значение коэффициентов теплопередач принимаются по табл. П5.5.

Таблица П5.4

Значения коэффициентов теплопередачи

Коэффициент	Значение коэффициентов теплопередачи, Вт/м ² ·град		
	Элементы ограждений камеры	При ограждениях из	
		тяжелого бетона	керамзитобетона
K_1	Наружные стены блока камер выше нулевой отметки пола	5.8	2.6
K_2	Наружные стены ниже нулевой отметки пола	2.3	2.2
K_3	Днище	2.3	–
	из бетона пустотный настил		
K_4	Крышка	5.8	5.8

Таблица П5.5

Значение коэффициентов теплопередачи

Материал ограждений	Коэффициенты	Значение коэффициентов теплопередачи (Вт/м ² ·град), при сопротивлении передачи R_0 (м ² ·град/Вт)							
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
Тяжелый бетон	K_1, K_2 и	5.8	2.7	1.8	1.3	1.0	0.9	0.7	0.6
	K_3	2.3	1.6	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6	0.5
Керамзитобетон	K_1, K_2 и	2.6	1.7	1.3	1.01.	0.9	0.7	0.6	0.6
	K_3	2.2	1.6	1.2	0	0.8	0.7	0.6	0.5

Сопротивление теплопередачи рассчитывается по формуле

$$R_0 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right),$$

где δ_i – толщина i-го слоя ограждения (изоляции), м; λ_i – коэффициент теплопроводности материала i-го слоя ограждения, Вт/м·град;

Теплоизоляционные характеристики материалов приведены в табл. П5.6.

Таблица П5.6

Теплоизоляционные характеристики материалов

Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м·град	C , кДж/кг·°С	$\alpha \cdot 10^4$, м ² /ч
Бетон	2400	1.45	0.84	25.8
Железобетон	2400	1.56	0.84	27.9
Крупнозернистый бетон	1900	0.99	0.84	22.3
Шлакобетон	1860	0.82	0.83	19.2
Золобетон	1640	0.505	0.98	11.3
Керамзитобетон	1700	0.41	0.56	15.4
Силикатобетон	1850	0.63	0.84	14.7
Газобетон	940	0.241	0.82	11.2
Пенобетон	400	0.138	1.65	7.6
Строительный раствор	1800	0.93	0.84	22.2
Сталь	7800	56.0	0.48	538
Песок кварцевый	1500	0.60	1.09	13.0
Керамзит	900	0.408	0.88	18.6
Шлак гранулированный	600	0.151	0.75	14.4
Минеральная вата	300	0.063	0.75	10.0
Пеностекло	500	0.163	0.84	14.0
Стекланная вата	200	0.045	0.94	9.7
Шлаковая вата	100	0.046	0.74	22.4

Для конструкций ограждений с теплоизоляцией, имеющих воздушные прослойки, значения сопротивления теплопередаче каждой из воздушных прослоек приведены в табл. П5.7.

Таблица П5.7

Значения сопротивления теплопередаче

Толщина воздушной прослойки, м	0.03	0.04	0.05	0.1	0.15	0.2
R_0 , м ² ·град/Вт	0.28	0.3	0.32	0.38	0.41	0.45

Примечание. При наличии n воздушных прослоек величину R_0 следует умножить на n .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амбарцумян, С.А. Расчет энергозатрат при термообработке бетона монолитных конструкций / Амбарцумян С.А., Гурецкий Ю.Б., Сапожников М.А. // Бетон и железобетон. – 1998. – №5.
2. Булавин, И.А. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов / Булавин И.А. и др. – М.: Стройиздат, 1982. – 243 с.
3. Вознесенский, А.А. Тепловые установки в производствематериалов и изделий / А.А. Вознесенский. – М.: Стройиздат, 1964. – 439 с.
4. Волосян, Л.Я. Тепло- и массообмен при термообработке бетонных и железобетонных изделий / Л.Я. Волосян. – Минск: Наука и техника, 1979.
5. Долгова, О.А. Тепловой расчет автоклава для производства силикатного кирпича: методические указания к практическим занятиям / О.А. Долгова. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – 17 с.
6. Долгова, О.А. Теплотехника и теплотехническое оборудование технологии строительных материалов. Конспект лекций / О.А. Долгова. – Магнитогорск: МГТУ, 2005 – 80 с.
7. Долгова, О.А. Основы технической термодинамики и теории теплообмена: методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Теплотехника и теплотехническое оборудование технологии строительных изделий» для студентов специальности 270106 всех форм обучения / О.А. Долгова. – Магнитогорск: МГТУ, 2012. – 37 с.
8. Долгова, О.А. Методические указания по изучению дисциплины «Теплотехника и теплотехническое оборудование технологии строительных изделий» для студентов специальности 270106 заочной формы обучения / О.А. Долгова. – Магнитогорск: МГТУ, 2008 – 11 с.
9. Долгова, О.А. Теплотехнический расчет кассетных установок: методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Техническая термодинамика и теплотехника» для студентов специальности 290600 / О.А. Долгова. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – 17 с.
10. Долгова, О.А. Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Теплотехника и теплотехническое и оборудование технологии строительных изделий» для студентов специальности 270106 дневной формы обучения / О.А. Долгова, Е.А. Трошкина. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2011. – 17 с.
11. Долгова, О.А. Основы технической термодинамики и теории теплопередачи: методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Техническая термодинамика и теплотехника» для студентов специальности 240304 / Долгова О.А., Трошкина Е.А., Артамонов А.В. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И.Носова, 2007. – 41 с.

12. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона (СН277-80) / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1981. – 48 с.
13. Крылов, Б.А. Эффективные способы ускорения твердения бетона / Б.А. Крылов // Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Ч. II. Технология бетона и железобетона. – Белгород, 1991.
14. Крылов, Б.А. Основные направления развития и совершенствования способов тепловой обработки / Крылов Б.А., Ли А.И. // Технология и долговечность железобетонных конструкций. – М., 1983.
15. Лариков, Н.Н. Теплотехника / Н.Н. Лариков. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.
16. Мазуров, Д.Я. Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов / Д.Я. Мазуров. – М.: Стройиздат, 1982. – 288 с.
17. Малинина, Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона / Л.А. Малинина. – М.: Стройиздат, 1977. – 159 с.
18. Марьямов, Н.В. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона / Н.В. Марьямов. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.
19. Никифорова, Н.М. Теплотехника и теплотехническое оборудование предприятий промышленности строительных материалов и изделий / Н.М. Никифорова. – М.: Высш. шк., 1981. – 271 с.
20. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий сборного железобетона: ОНТП 07-85. – М.: Стройиздат, 1985. – 51 с.
21. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий по производству изделий из ячеистого и плотного бетонов автоклавного твердения (ОНТП-09-85) / Минстройматериалов СССР. – Таллин: Стройиздат, 1986. – 115 с.
22. Обьещенко, Г.А. Резервы экономии тепловой энергии при производстве сборного железобетона / Г.А. Обьещенко // Бетон и железобетон. – 1985. – № 3.
23. Павлов, В.Ф. Основы проектирования тепловых установок / В.Ф. Павлов, С.В. Павлов. – М.: ВШ, 1987. – 143 с.
24. Перегудов, В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей / В.В. Перегудов, М.И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с.
26. Пособие по тепловой обработке сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85). – М.: Стройиздат, 1989. – 49 с.
27. Производство сборных железобетонных изделий: справочник / Г.И. Бердичевский, А.П. Васильев, Л.А. Малинина и др.; под ред. К.В. Михайлова, К.М. Королева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989. – 447 с.
28. Роговой, М.И. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов / М.И. Роговой, М.Н. Кондакова, М.Н. Сагановский. – М.: СИ, 1975. – 320 с.

29. Руководство по тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1974. – 30 с.

30. Справочник по производству сборных железобетонных изделий / под ред. Б.Г. Скрамтаева и П.К. Балатьева Т. 1-2. – М.: Стройиздат, 1965. – 453 с.

31. Трембицкий, С.М. Энерго- и ресурсосбережение в заводской и строительной технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций / С.М. Трембицкий. – М.: Стройиздат, 2004. – 262 с.

32. Трембицкий, С.М. Энергоэффективные режимы теплотехнологии бетона и методы их реализации / С.М. Трембицкий // Бетон и железобетон. – 2005. – №2. – С.26.

33. Трембицкий, С.М. Энергосберегающие методы и оборудование для тепловой обработки сборных железобетонных изделий / С.М. Трембицкий, Г.А. Обьещенко // Промышленность строительных материалов. Сер. 3. Промышленность сборного железобетона / ВНИИ-ЭСМ. – М., 1990. – Вып. 3.

34. Ушеров-Маршак, А.В. Оценка вклада экзотермии в энергетический баланс твердения вяжущих и бетонов / А.В. Ушеров-Маршак, Л.А. Першина, П.В. Кривенко // Бетон и железобетон. – 1997. – №3.

35. Чумаков, Ю.М. Совершенствование теплофизических характеристик пропарочных камер / Ю.М. Чумаков, Р.В. Венгэр, Г.А. Обьещенко // Бетон и железобетон. – 1982. – № 10.

Учебное издание

Михаил Саулович ГАРКАВИ
Ольга Александровна ДОЛГОВА
Елена Анатольевна ТРОШКИНА

**ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА
БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Учебное пособие

Редактор Н.В. Кутекина
Оператор компьютерной правки Е.А. Назарова

Подписано в печать 23.05.2014. Рег. № 19-14. Формат 60х84/16. Бумага тип. № 1.
Плоская печать. Усл.печ.л. 6,5. Тираж 100 экз. Заказ 271.



Издательский центр ФГБОУ ВПО «МГТУ»
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Полиграфический участок ФГБОУ ВПО «МГТУ»