



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технологии вяжущих веществ, бетонов
и строительной керамики»

Курс лекций по дисциплине

«Ускоренные методы твердения»

Автор
Касторных Л.И.

Ростов-на-Дону, 2017

Аннотация

Курс лекций предназначен для студентов очной и заочной форм обучения направления 08.03.01 «Строительство» профиля «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» в качестве основного учебного материала.

Автор



доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры
«Технологии вяжущих
веществ, бетонов и
строительной керамики»
Касторных Любовь Ивановна



Оглавление

1 лекция	Способы ускорения твердения бетона.....	4
2 лекция	Факторы, влияющие на эффективность тепловой обработки.....	14
3 лекция	Технико-экономическое обоснование параметров теплового воздействия.....	24
4 лекция	Режимы тепловой обработки бетона.....	37
5 лекция	Установки для тепловой обработки бетона...	52
6 лекция	Особенности тепловой обработки железобетонных изделий и конструкций....	65
7 лекция	Повышение эффективности тепловой обработки.....	91
	Вопросы для контроля.....	100

Лекция 1

Способы ускорения твердения бетона





Эффективность производства сборных железобетонных изделий в значительной степени зависит от продолжительности общего технологического цикла.

Цель ускорения твердения бетона - создание условий, обеспечивающих такое протекание процессов твердения вяжущего, в результате которого бетон приобретает требуемые свойства (показатели назначения) в экономически целесообразный промежуток времени.



На практике применяются следующие способы ускорения твердения:

- химический;**
- физико-механический;**
- теплофизический.**

В технологии сборного бетона и железобетона применяются различные способы интенсификации твердения, наиболее эффективным из которых является повышение температуры (при использовании цементов общестроительного назначения по ГОСТ 10178).

Лекция 1_ Способы ускорения твердения бетона



При повышении температуры от 20 °С до 80 °С сроки достижения требуемой прочности бетона сокращаются в 8...10 раз, а за счет других технологических приемов только на 10...30 %.

Включение тепловой обработки в технологический процесс изготовления изделий дает возможность значительно увеличить оборачиваемость форм, а, следовательно, снизить металлоемкость производства, повысить коэффициент использования производственных площадей цеха, сократить длительность общего цикла производства.



При тепловой обработке свежесформованному изделию сообщается определенное количество тепла (для ускорения физико-химических реакций и структурообразования) и создаются условия, необходимые для сохранения в бетоне воды в жидкой фазе.

Эффективность тепловой обработки определяется количеством сообщаемого тепла (температурой твердения).



Сроки твердения бетона для достижения определенных величин показателей качества сокращаются при повышении температуры твердения: $t_{\text{макс}} \rightarrow T_{\text{мин}}$

Вследствие развития при тепловом воздействии деструктивных явлений (отрицательных процессов в твердеющем бетоне – образования капилляров и крупных пор) более высокий уровень качества продукции достигается при низких температурах твердения: $t_{\text{мин}} \rightarrow R_{\text{макс}}$



Наличие положительных явлений и отрицательных моментов в рассматриваемом процессе - существование **технологического противоречия – разрешимо:**

- **выбором рациональных параметров технологических факторов, влияющих на свойства пропаренного бетона;**
- **выбором целесообразных условий ускоренного твердения, получаемых в результате технико-экономического анализа возможных вариантов.**

Лекция 1_ Способы ускорения твердения бетона



Признаки		Способ ТО	Тепловые установки
Вид теплоносителя	Насыщенный водяной пар	1 Пропаривание	Камеры ямного, щелевого, туннельного, вертикального типа, кассеты, термоформы, термопосты
	Паровоздушная смесь пониженной влажности ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), горячий воздух ($T > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)	2 Прогрев в сухой среде, высокотемпературный прогрев	То же
	Продукты сгорания природного газа (ПСПГ)	То же	Камеры различного типа
	Высокотемпературные жидкости (масло, вода)	3 Масляный прогрев, прогрев в горячей воде	Кассеты, термоформы, термобассейны
	Электроэнергия	4 Электродный прогрев	Кассеты, термоформы
		5 Электрообогрев	Камеры с электронагревателями
		6 Индукционный прогрев	Электромагнитные (индукционные) камеры
	Солнечная энергия	7 Гелиотермообработка	Гелиоформы, покрытия на гелиополигоне
Смешанные	8 Разогрев бетонной смеси + (1) ... (7)	Камеры различного типа, кассеты, термоформы	

Лекция 1_ Способы ускорения твердения бетона



Признаки		Способ ТО	Тепловые установки
Температура и давление паровоздушной среды	Насыщенный водяной пар при $T > 100$ °С и избыточном давлении более 0,6 МПа	9 Запаривание	Автоклавы проходные и тупиковые
	Насыщенный водяной пар при $T < 100$ °С и нормальном атмосферном давлении	Пропаривание	Камеры различного типа
	Продукты сгорания природного газа и горячий воздух при $T > 100$ °С и нормальном атмосферном давлении	Высоко-температурный прогрев в сухой среде	Камеры различного типа

Лекция 1_ Способы ускорения твердения бетона



Признаки		Способ ТО	Тепловые установки
Способ передачи тепла	Контакт теплоносителя с открытой поверхностью бетона	Конвективный	Камеры различного типа
	Контакт теплоносителя со стенками формы, прогрев бетона от стенок	Кондуктивный	Кассеты, термоформы
	Контакт теплоносителя со стенками формы и открытой поверхностью бетона	Конвективно-кондуктивный	Камеры различного типа
	Выделение тепла при прохождении электрического тока через тело бетона	Электрохимический	Кассеты, термоформы
Периодичность действия тепловой установки	Формы перемещаются по температурным зонам камеры	Пропаривание, прогрев в сухой среде	Камеры непрерывного действия
	Формы неподвижны, изменяется температурный режим	Пропаривание, прогрев в сухой среде	Камеры периодического действия, кассеты, термоформы, термопосты

Лекция 2

Факторы, влияющие на эффективность тепловой обработки





1) Постоянные (внутренние) факторы, которые определяют эффективность процесса ускоренного твердения бетона – качество и количество применяемых материалов:

- - минералогический состав цемента.

Три группы эффективности цемента, определяемые коэффициентом $K_{II} = R_{II} / R_{II}^{28}$ (по ГОСТ 310.4-81*):

I группа - $K_{II} = 0,68$ и более;

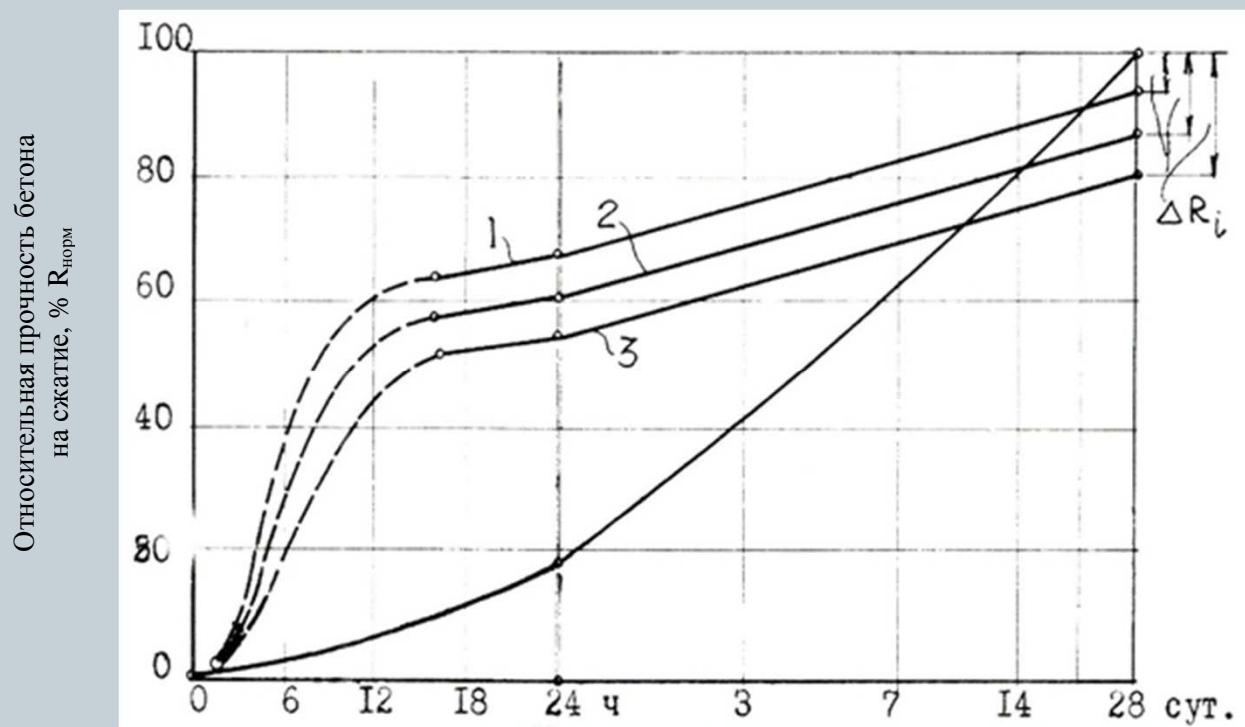
II группа - $K_{II} = 0,57 \dots 0,67$,

III группа - $K_{II} = 0,56$ и менее;

Лекция 2_Факторы, влияющие на эффективность ТО



Кривые нарастания прочности бетонов



--- при тепловой обработке;
1, 2, 3 – на цементах I, II, III группы эффективности соответственно;
— в нормальных условиях



- - **вид вяжущего;**
- - **состав и характеристики бетона (расходы Ц, В, В/Ц, Жесткость/Подвижность);**
- - **размер и профиль изделия.**

Качество материалов на данном предприятии остается постоянным, а количество устанавливается, исходя из условий обеспечения проектных показателей назначения бетона.



2 Вторая группа факторов - временные - параметры тепловлажностного воздействия на твердеющий бетон:

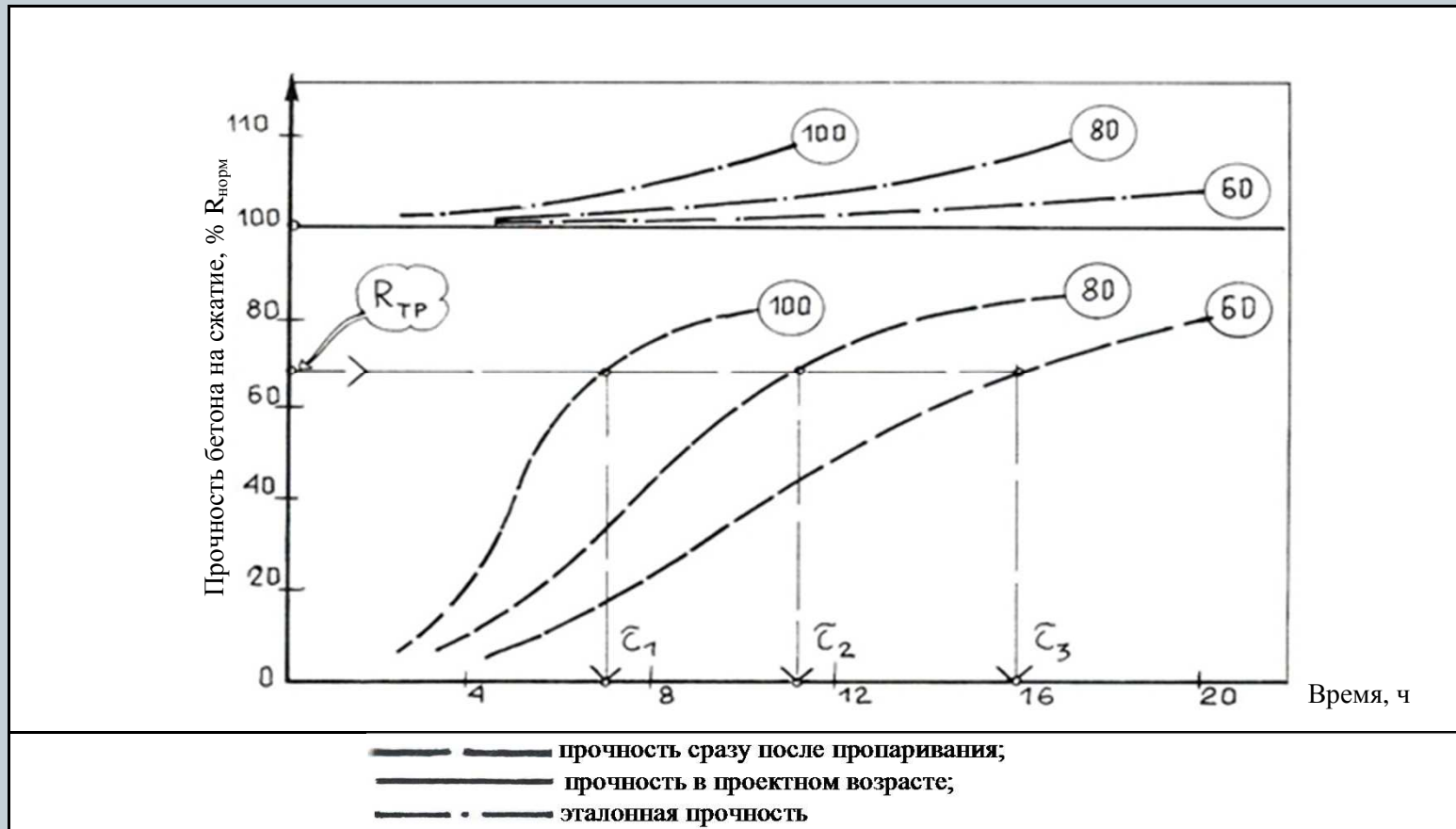
- - максимальная температура обогрева;
- - длительность ТО.

Основным фактором, определяющим характер греющей среды, способ тепловлажностной обработки и его эффективность, является максимальная температура обогрева в период изотермического выдерживания изделий в тепловом агрегате.

Группу переменных факторов можно и необходимо изменять и устанавливать **рациональный режим ускоренного твердения.**



Зависимость прочности бетона от длительности тепловой обработки



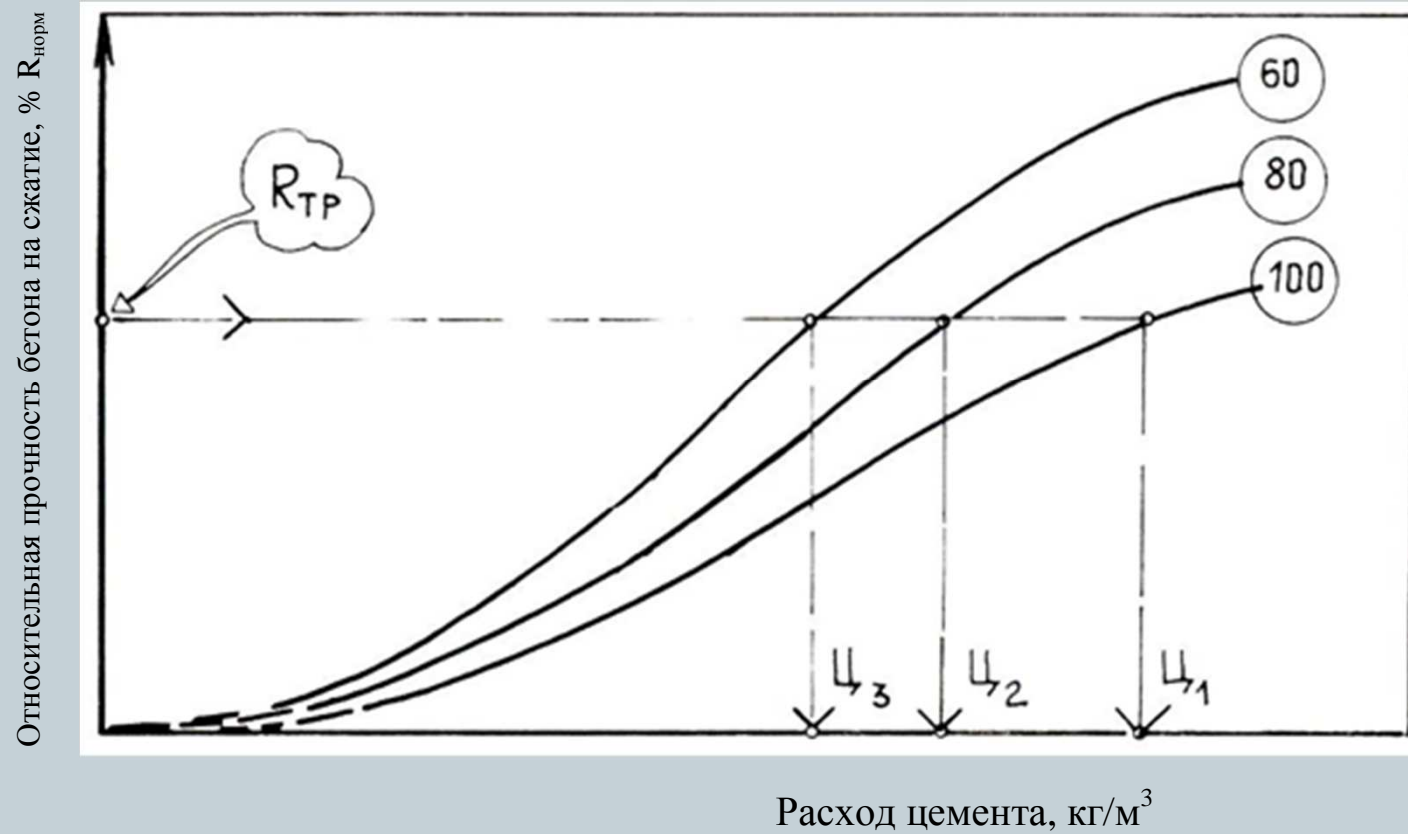


Экономически целесообразный вариант ТО при максимальной температуре изотермического обогрева в условиях действующего производства устанавливаются по критерию минимальной себестоимости выпускаемой продукции.

В процессе проектирования предприятий выбирается вариант, обеспечивающий наиболее рациональное сочетание текущих затрат и капитальных вложений - минимум затрат.



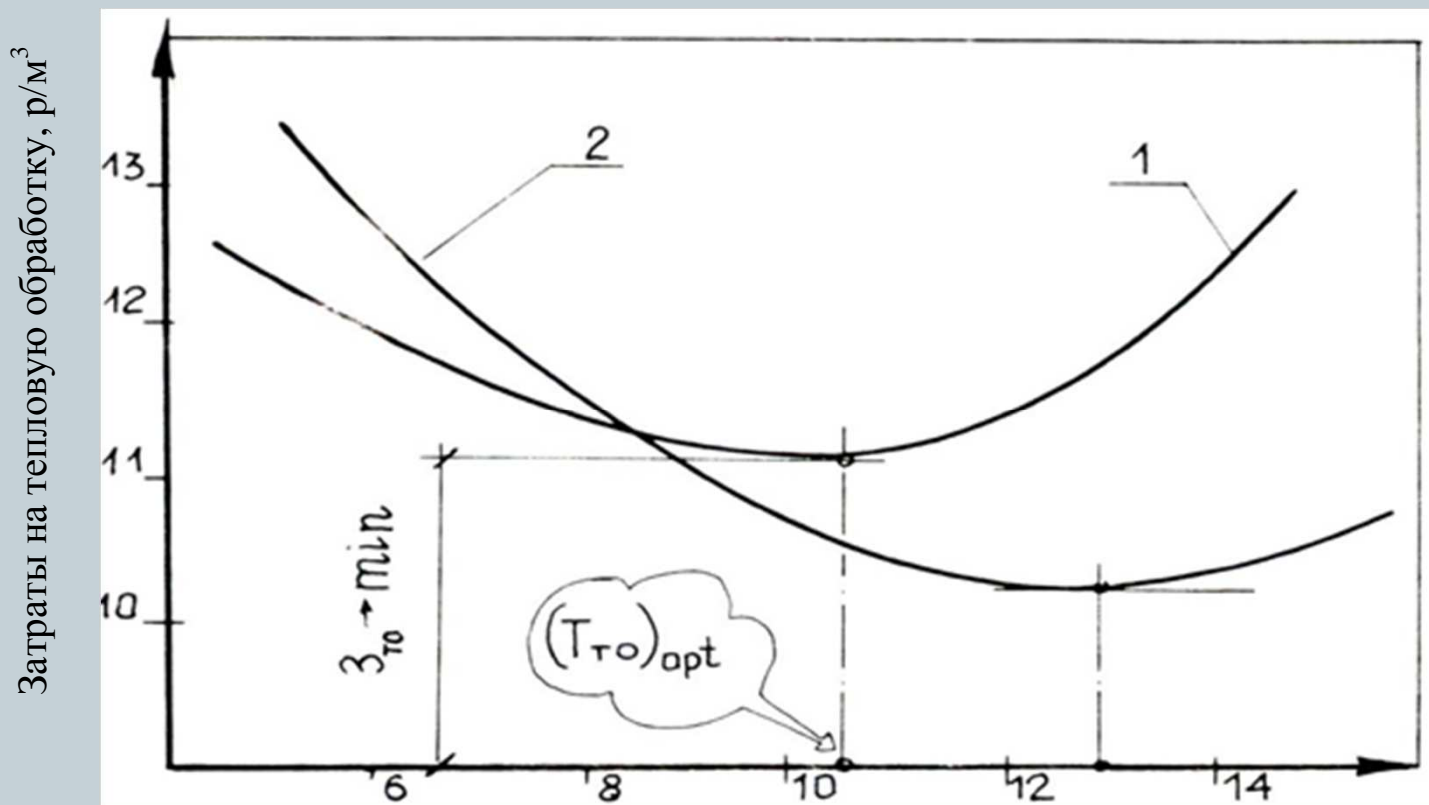
Влияние условий тепловой обработки на расход цемента



Лекция 2_Факторы, влияющие на эффективность ТО



Влияние длительности ТО на технико-экономические показатели производства



1 – бетон на портландцементе марки 400;
2 – то же на шлакопортландцементе

Продолжительность тепловой обработки, ч



Анализ работы предприятий сборного железобетона позволил обосновать нормативные режимы пропаривания бетонов

I: на портландцементе:

$$\tau = 13 ((2) + 3 + 6 + 2), \text{ при } t_{\text{из}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

II: на шлакопортландцементе:

$$\tau = 15 ((2) + 3 + 8 + 2), \text{ при } t_{\text{из}} = 95\text{-}100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Отмеченные режимы приняты за основу нормирования расхода цемента.

При изменении режима пропаривания следует производить перерасчет нормируемого количества цемента.

Лекция 3

Технико-экономическое обоснование параметров теплового воздействия





При назначении параметров тепловой обработки исходят из положений теории направленного структурообразования, что дает максимальный технический эффект от технологического воздействия на бетон.

При выборе режима ТО необходимо учитывать:

- момент воздействия,**
- рациональные интенсивность и**
- длительность теплового воздействия**



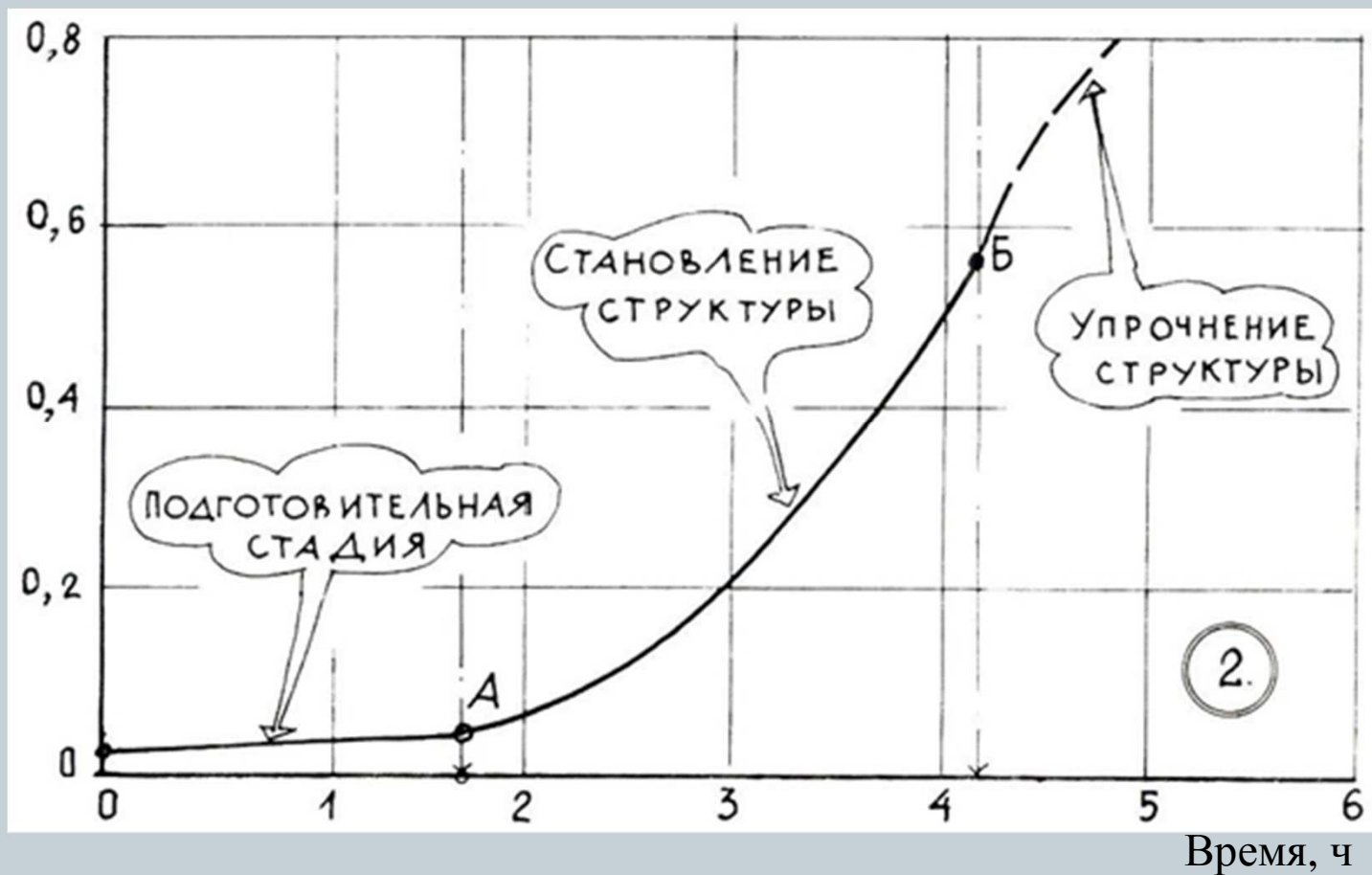
Основное назначение предварительного выдерживания свежеложенного бетона - приобретение структурой бетона свойств, обеспечивающих восприятие внешнего теплового воздействия без деструкции.

Выбор длительности предварительного выдерживания производят путем согласования момента начала теплового воздействия с характером процессов структурообразования.



Стадии структурообразования бетона

Пластическая прочность, ОЕП

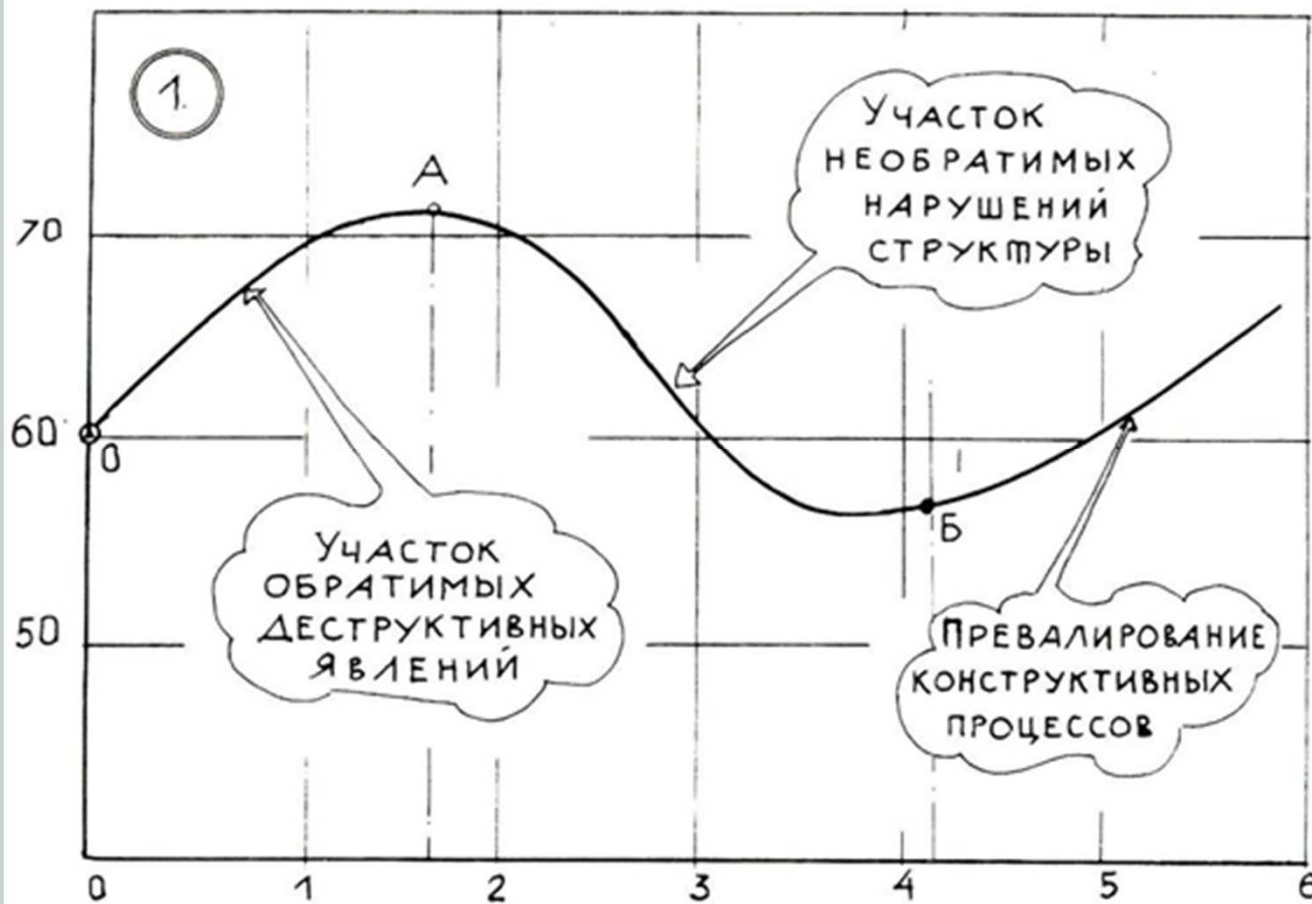


Лекция 3_ Технико-экономическое обоснование параметров ТО



Выбор длительности предварительного выдерживания перед подачей тепла

Относительная прочность бетона после ТО, %



Предварительное выдерживание, ч



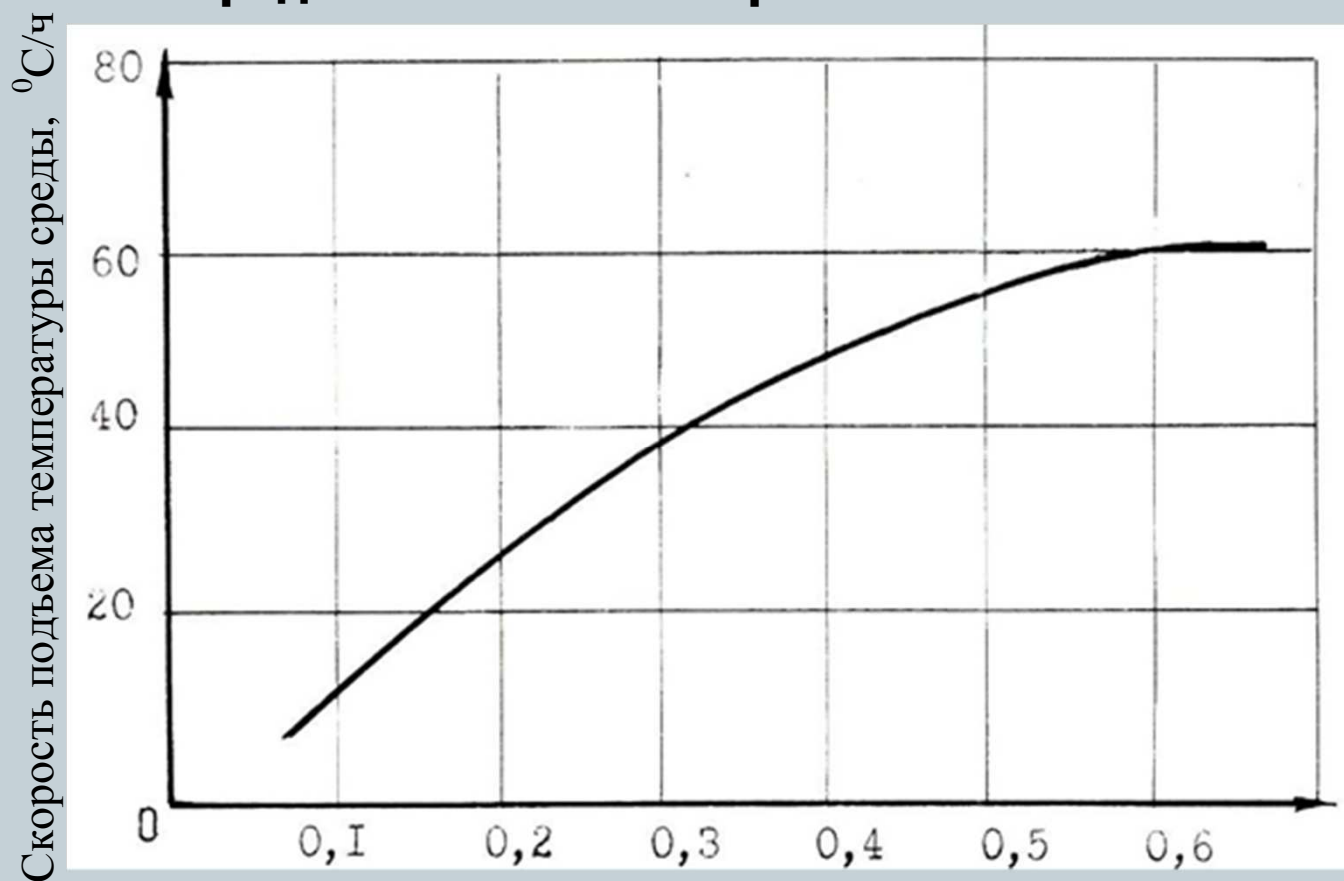
Интенсивность теплового воздействия в период подогрева изделий - скорость подъема температуры - не должна вызывать значительных температурных перепадов, напряжений и деформаций и приводить к превалированию деструктивных процессов в бетоне.

Бетону, имеющему определенную начальную прочность, соответствует своя допустимая скорость подъема температуры среды, выше которой в материале могут возникать необратимые нарушения в его структуре.

Лекция 3_ Техничко-экономическое обоснование параметров ТО



Зависимость допустимой скорости подъема температуры греющей среды от начальной прочности бетона



Начальная прочность бетона при сжатии, МПа



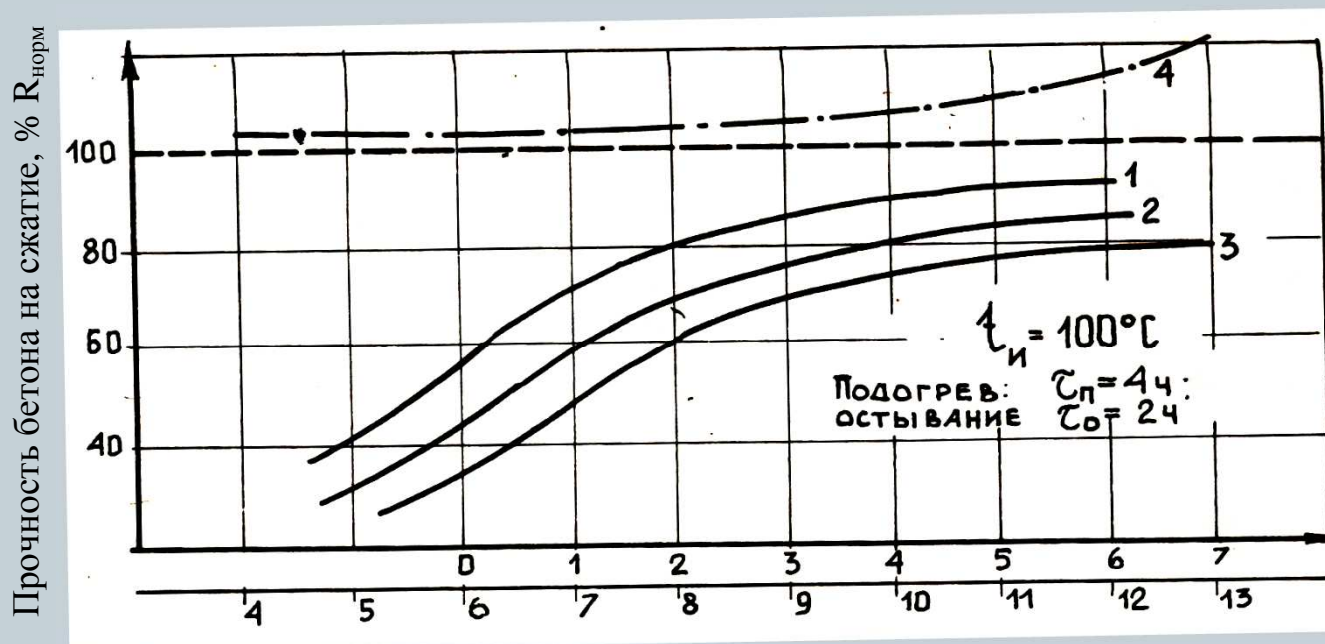
Длительность выдерживания бетона при максимальной температуре должна обеспечить приобретение бетоном после цикла тепловой обработки требуемой прочности:

- распалубочной (40-45 % $R_{\text{норм}}$),
- передаточной (70-80 % $R_{\text{норм}}$),
- отпускной (70-90 % $R_{\text{норм}}$)
- проектной (100 %).



Длительность изотермического обогрева устанавливается по графикам нарастания прочности бетона

Нарастание прочности бетонов при $t_{из} = 100\text{ }^\circ\text{C}$

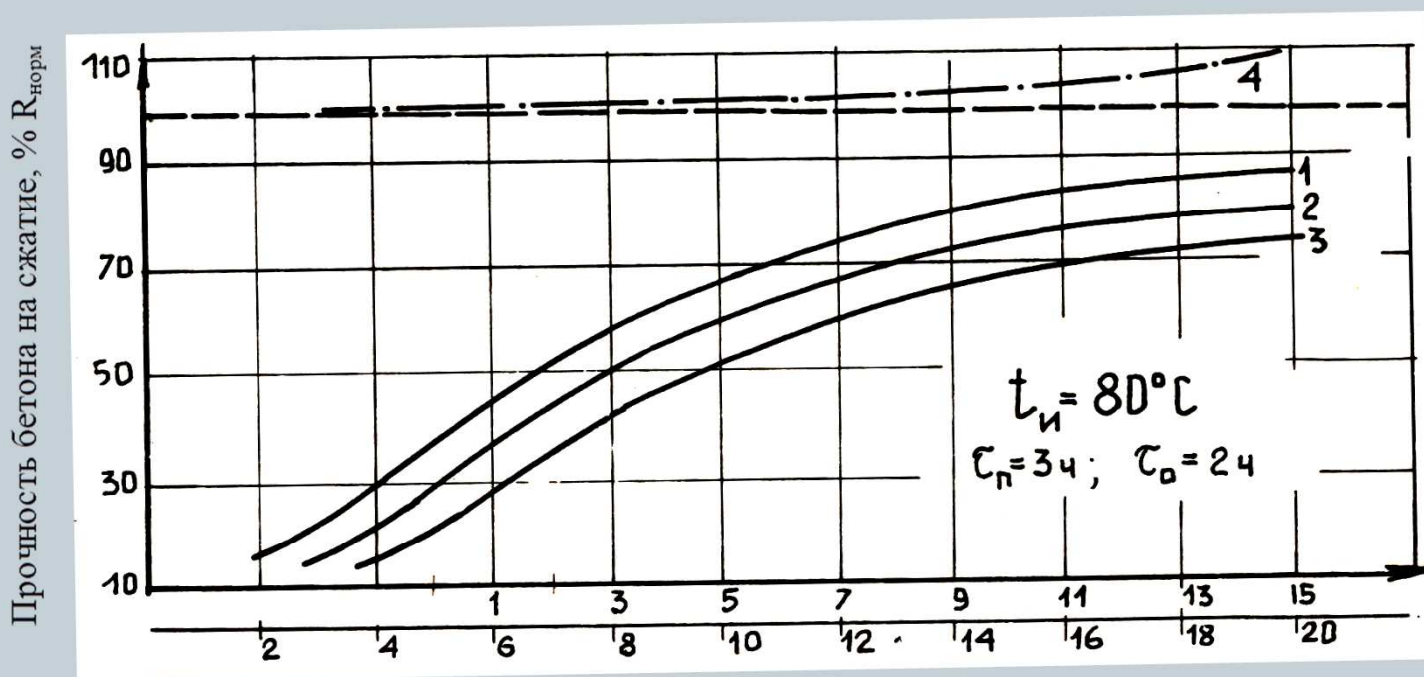


- 1 – прочность бетона сразу после пропаривания из жестких смесей;
- 2 – то же, из малоподвижных; 3 – то же, из подвижных;
- 4 – эталонная прочность

Длительность изотермического обогрева, ч
Продолжительность тепловой обработки, ч



Наращение прочности бетонов при $t_{из} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$



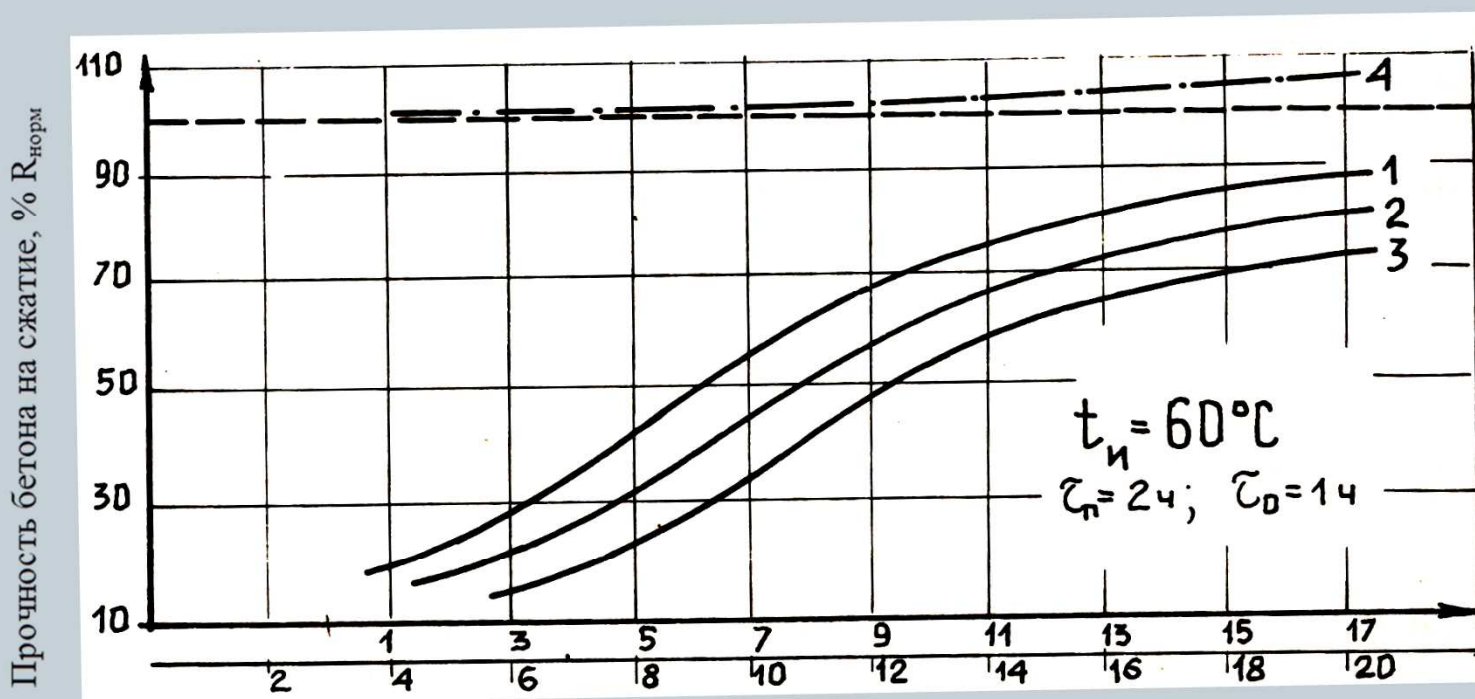
- 1 – прочность бетона сразу после пропаривания из жестких смесей;
2 – то же, из малоподвижных; 3 – то же, из подвижных;
4 – эталонная прочность

Длительность изотермического обогрева, ч
Продолжительность тепловой обработки, ч

Лекция 3_ Техничко-экономическое обоснование параметров ТО



Наращение прочности бетонов при $t_{из} = 60\text{ }^\circ\text{C}$



- 1 – прочность бетона сразу после пропаривания из жестких смесей;
- 2 – то же, из малоподвижных; 3 – то же, из подвижных;
- 4 – эталонная прочность

Длительность изотермического обогрева, ч
Продолжительность тепловой обработки, ч



Остывание изделий в камере (агрегате) должно осуществляться до температуры, не превышающей температуру окружающей среды на 40 °С.

В производстве сборного железобетона необходимо учитывать **момент оценки прочности** после тепловой обработки (момент контроля).

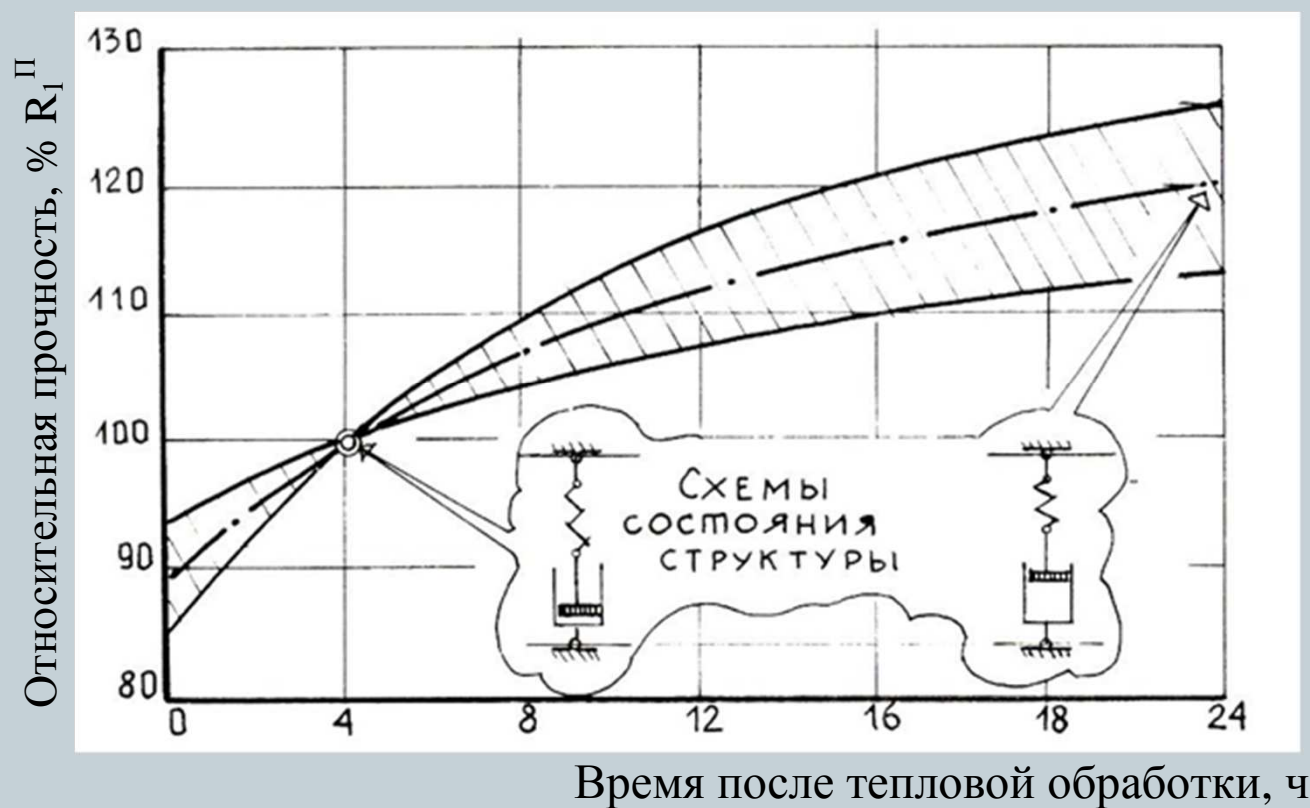
Интенсивное увеличение контролируемой прочности бетона после тепловой обработки объясняется:

- интенсификацией процессов гидратации;
- обратным тепловым последствием.

Учет эффекта нарастания прочности сразу после пропаривания позволяет повысить эффективность производственного процесса.



Изменение контролируемой прочности бетона после окончания цикла ТО



Лекция 4

Режимы тепловой обработки бетона



Лекция 4_Режимы ТО



Экономически целесообразный режим тепловой обработки при ускоренном твердении определяется в результате технико-экономического анализа:

- технологии формуемых изделий;**
- вида и назначения бетона;**
- используемого вяжущего;**
- применяемого теплоносителя;**
- вида и конструкции теплового агрегата;**
- наличия резервного времени для тепловой обработки в условиях производства.**

Лекция 4_Режимы ТО

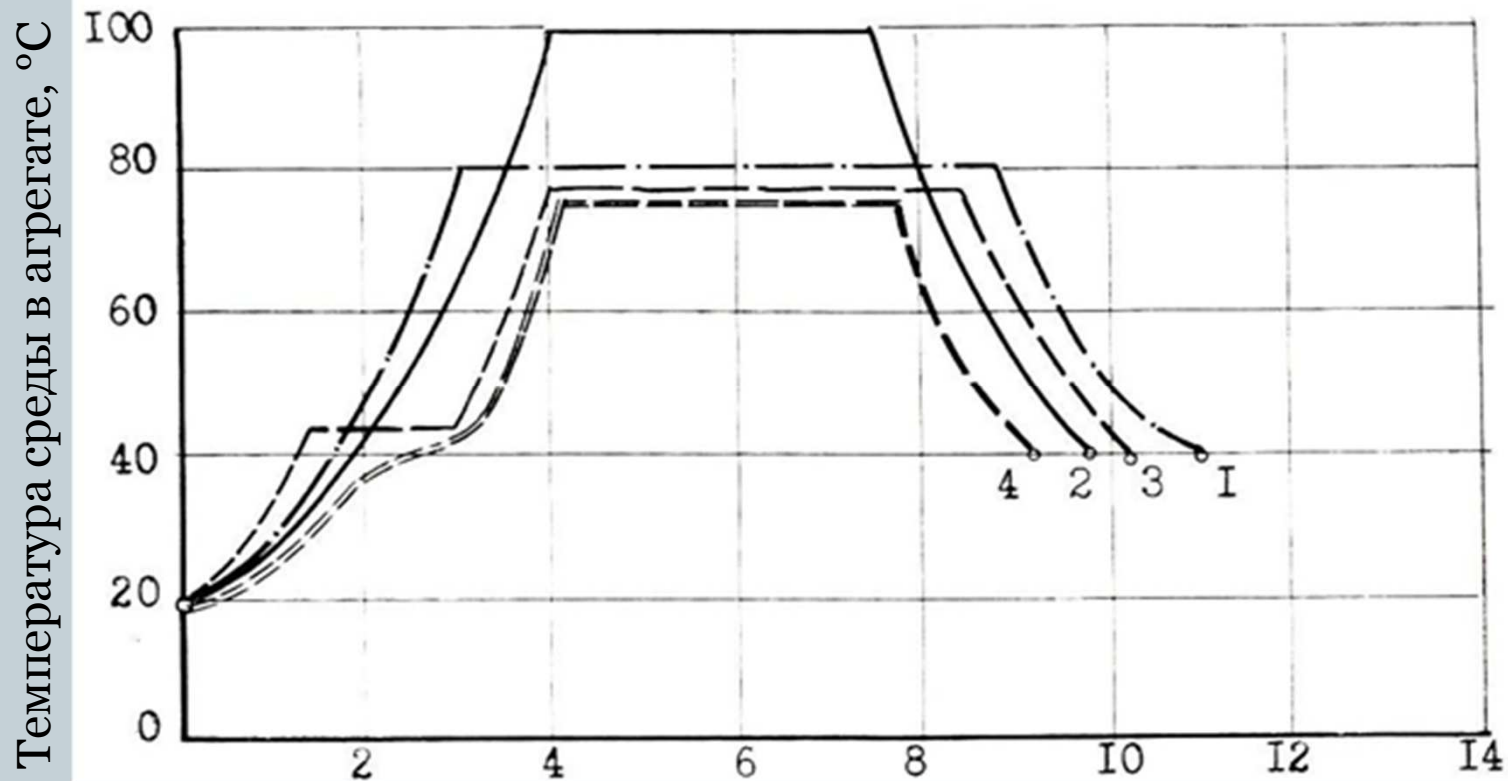


Для принимаемого режима ТО следует определить:

- максимальную температуру изотермического обогрева,**
- продолжительность отдельных периодов,**
- относительную влажность среды в камере.**

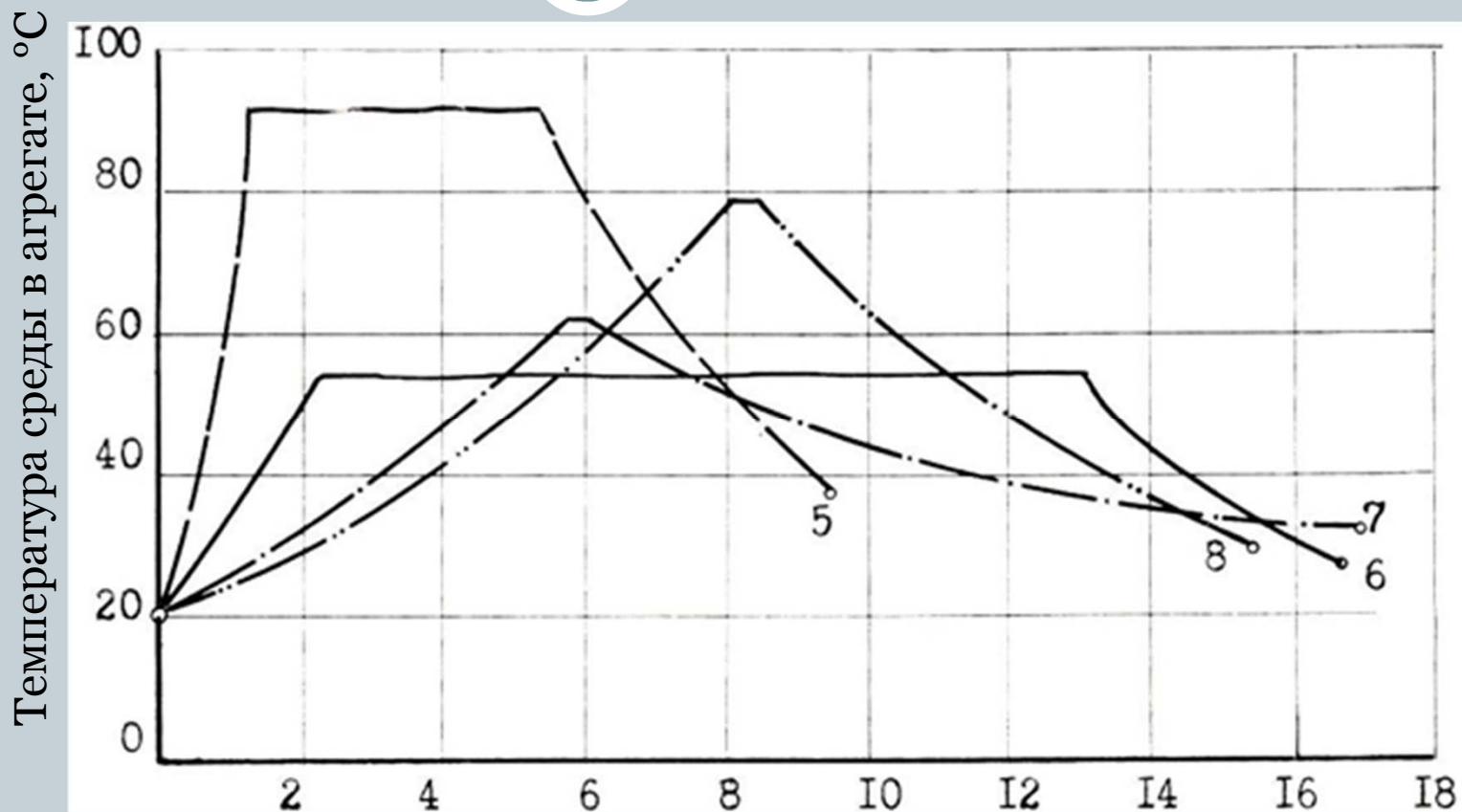
Температура изотермического обогрева, если она специально не обоснована в процессе технико-экономического анализа или экспериментальными исследованиями, принимается по данным норм технологического проектирования.

Лекция 4_Режимы ТО



1 – нормативный, 2 – пропаривание в среде чистого насыщенного пара, 3 – со ступенчатым подъемом температуры, 4 – в среде с регулируемой влажностью Время, ч

Лекция 4_Режимы ТО



5 – прогрев в кассетных формах,

Время, ч

6 – низкотемпературный, 7 – мягкий, 8 – термосный

Лекция 4_Режимы ТО



Для обычных бетонов общестроительного назначения, приготовленных на портландцементе, изотермическая выдержка осуществляется при температуре 80...85 °С,

бетонов на пуццолановом и шлакопортландцементе – при 90...95 °С,

бетонов с повышенными требованиями по морозостойкости и водонепроницаемости – при 60...70 °С.

Лекция 4_Режимы ТО



Длительность предварительного выдерживания отформованных изделий при нормальной температуре перед ТО на производстве устанавливает заводская лаборатория на основании экспериментального исследования процесса структурообразования бетона.

Начало теплового воздействия должно соответствовать моменту смены процессов формирования структуры цементного камня.

Лекция 4_Режимы ТО



Оптимальная **длительность предварительного выдерживания** для различных бетонов зависит от активности цемента, В/Ц, удобоукладываемости бетонной смеси, температуры окружающей среды и находится в пределах 1...5 ч.

Чем выше марка цемента и класс бетона, чем выше температура окружающей среды и жесткость смеси, тем короче может быть время предварительного выдерживания.

Чем подвижнее смесь, чем больше открытых поверхностей изделий, тем продолжительнее период выдерживания.

Лекция 4_Режимы ТО



Скорость подъема температуры в камерах и термоформах следует назначать с учетом конструктивных особенностей изделий (однослойные, многослойные и т. п.), их массивности, конкретных условий производства, но, как правило, не более **60°С/ч.**

Для изделий, к которым предъявляются повышенные требования по морозостойкости, скорость подъема температуры - не более **20°С/ч.**

Лекция 4_Режимы ТО



Длительность изотермического прогрева назначают в зависимости от требуемой прочности бетона сразу после ТО (распалубочной, передаточной, отпускной, нормируемой) и с учетом вида бетона, активности и эффективности цемента при пропаривании, его тепловыделения и массивности изделий.

Лекция 4_Режимы ТО



Скорость остывания среды в камере в период снижения температуры изделий из тяжелого бетона не должна превышать $30\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$, а при повышенных требованиях по морозостойкости и водонепроницаемости, а также при ТО изделий из мелкозернистого и напрягающего бетонов, многослойных и с отделочными слоями – должна быть не более $20\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$.

При выгрузке изделий из камеры температурный перепад между поверхностью изделий и температурой окружающей среды не должен превышать $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Лекция 4_Режимы ТО



Относительную влажность среды в период изотермического обогрева изделий из тяжелого, мелкозернистого, конструкционного легкого и напрягающего бетонов необходимо поддерживать на уровне 90...100 %.

Для изделий из теплоизоляционного и конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона относительную влажность среды следует поддерживать в пределах 20...60 %.

Лекция 4_Режимы ТО



При использовании **химических добавок-ускорителей твердения** цикл тепловой обработки сокращается на 1...2 ч (за счет периода изотермического обогрева) либо снижается максимальная температура на 10...20 °С.

При применении **добавок-пластификаторов**, в том числе и суперпластификаторов, корректировка режима ТО должна быть увязана с технологическим приемом и целью их введения.

При формовании **предварительно разогретых бетонных смесей** до температуры 55 ± 5 °С продолжительность ТО в камерах и кассетах сокращается на 2...4 ч.

Лекция 4_Режимы ТО



**Расчетные режимы тепловой обработки тяжелых бетонов с изотермическим обогревом при температуре 80...85 °С и 1,5...2 оборотах тепловых агрегатов
(отпускная прочность бетона 70 % проектной)**

Проектные классы бетона	Продолжительность цикла (периодов), ч, при толщине бетона в изделиях, мм		
	до 160	160...300	301...400
B15	11(3,5+5,5+2)	12(3,5+6,5+2)	13(3,5+6,5+3)
B22,5 (B25)	9(3+4+2)	10(3+5+2)	11(3+5,5+2,5)
B30	8,5(3+3,5+2)	9,5(3+4,5+2)	10,5(3+5+2,5)
B37,5 (B40)	8(3+3+2)	9(3+4+2)	10(3+4,5+2,5)
B45	7(3+2+2)	8(3+3+2)	9(3+3,5+2,5)

Лекция 4_Режимы ТО



Расчетные режимы тепловой обработки изделий из легких бетонов (отпускная прочность бетона 70...80 % проектной)

Проектные классы бетона	Способ ТО	Толщина бетона в изделии, мм	Время цикла (периодов), ч
В2,5...В7,5	Сухой прогрев при 120...150 °С, в том числе в продуктах сгорания природного газа	до 300	9(2+5+2)
		300 и более	10(2+6+2)
	Прогрев в термоформах или в камерах «глухим» паром при 90...95 °С	до 300	9(3+5+1)
		300 и более	11(3+6+2)
В10...В15	Тепловлажностная обработка паром и в продуктах сгорания природного газа при 80...85 °С	до 200	10(3+6+1)
		200...300	12(3+7+2)
		300 и более	13(3+8+2)
В22,5...30	То же	до 200	8(2,5+4,5+1)
		200...300	9,5(2,5+5+2)
		300 и более	10(2,5+5,5+2)

Лекция 5

Установки для тепловой обработки бетона



Лекция 5_Установки для ТО



Основные виды установок для ТО:

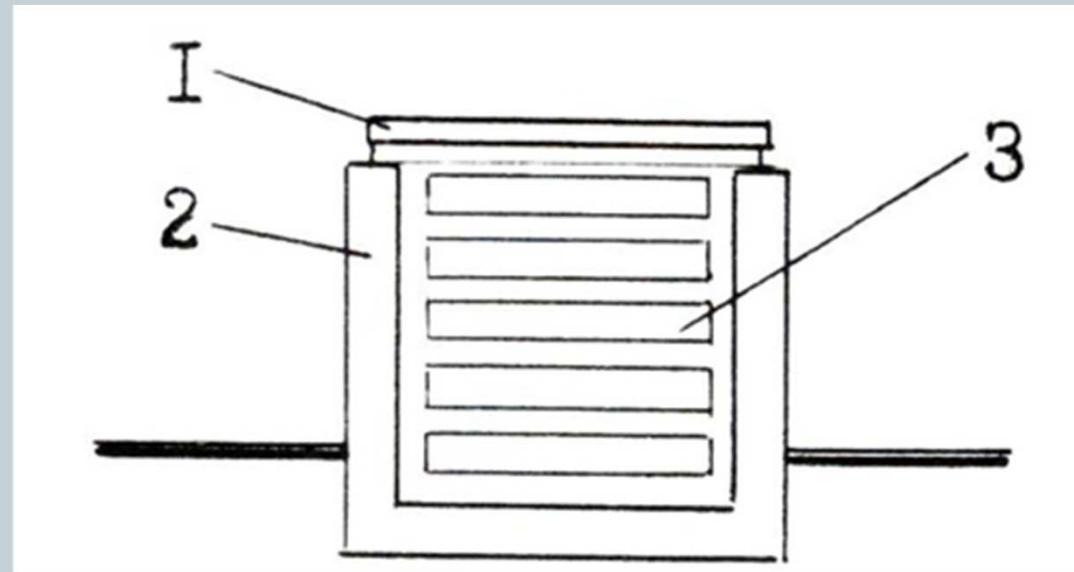
- камеры ямного типа (напольные и заглубленные);**
- камеры вертикального типа (башенные);**
- камеры горизонтальные многоярусные;**
- камеры щелевого типа;**
- термоформы с «паровой рубашкой»;**
- электромагнитные (индукционные) камеры туннельного типа;**
- кассетно-формующие установки;**
- стационарные формовочные столы с подогревом;**
- формовочные дорожки с подогревом для безопалубочного бетонирования.**

Лекция 5_Установки для ТО

Схема напольной камеры ямного типа

Область применения:

- агрегатно-поточное производство изделий из тяжелых, легких бетонов;
- ТО в паровоздушной среде

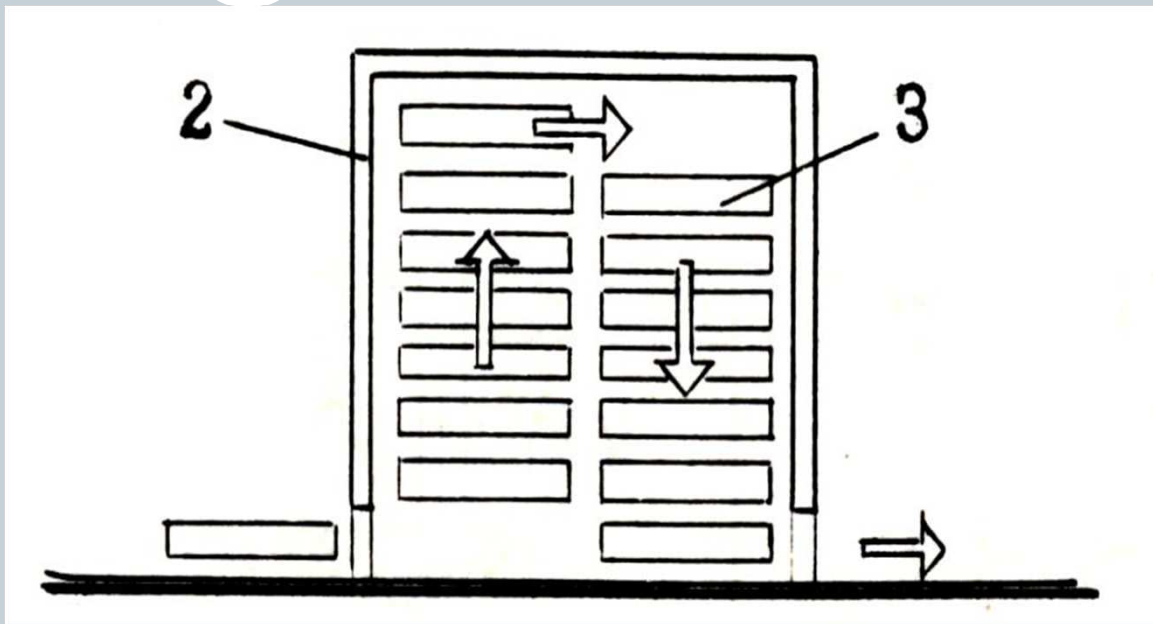


- 1- крышка камеры,
- 2 – ограждения камеры,
- 3 – формы с изделиями

Лекция 5_Установки для ТО

Схема вертикальной камеры

Область применения
- конвейерное
производство изделий
из тяжелых, легких
бетонов;
- ТО в среде чистого
насыщенного пара



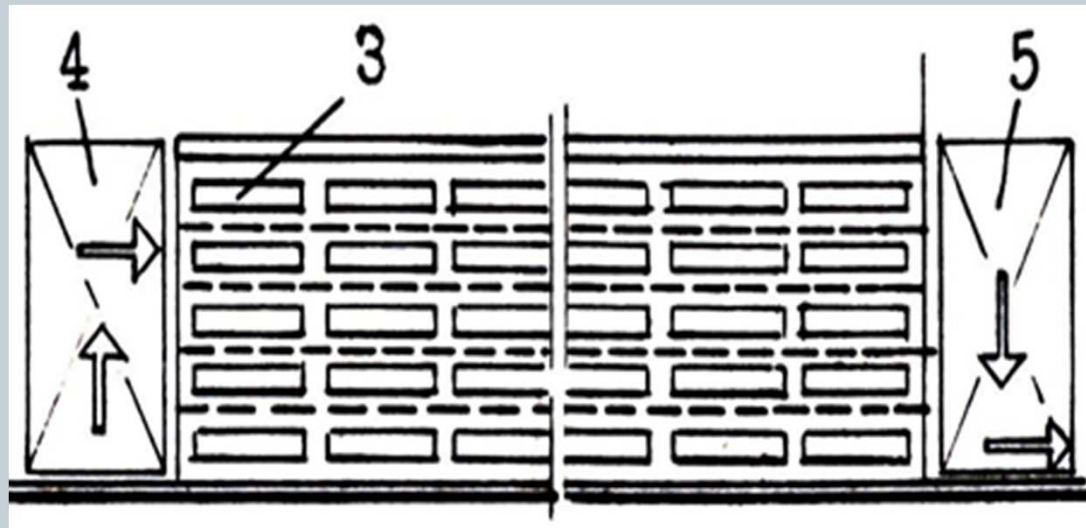
2 – ограждения камеры,
3 – формы с изделиями

Лекция 5_Установки для ТО

Схема многоярусной горизонтальной камеры

Область применения:

- конвейерное производство изделий из тяжелых, легких бетонов;
- ТО в паровоздушной среде



- 3 – формы с изделиями,
- 4 – подъемник,
- 5 – снижатель

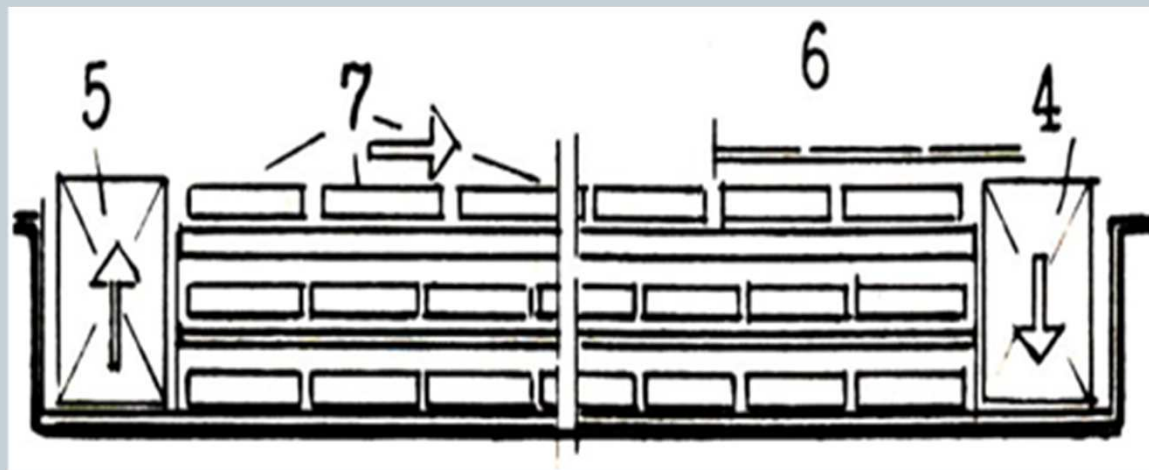
Лекция 5_Установки для ТО

Схема камеры щелевого типа

Область

применения

- конвейерное производство изделий из тяжелых, легких бетонов;
- ТО в паровоздушной среде



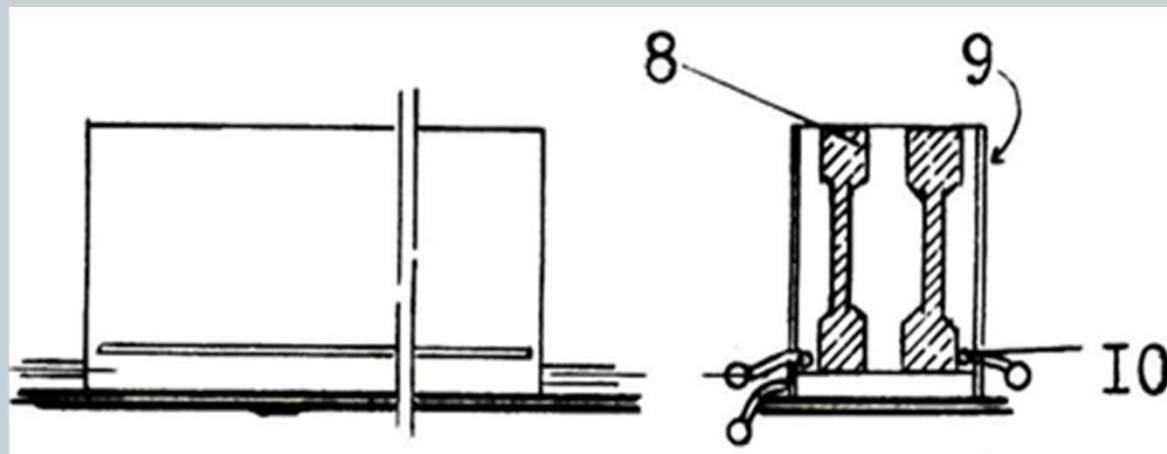
- 4 – снижатель, 5 – подъемник форм, 6 – фор-камера, 7 – посты конвейерной линии

Лекция 5_Установки для ТО

Схема термоформы с «паровой рубашкой»

Область применения:

- стендовое производство крупноразмерных изделий из тяжелого бетона;
- ТО с контактным обогревом.



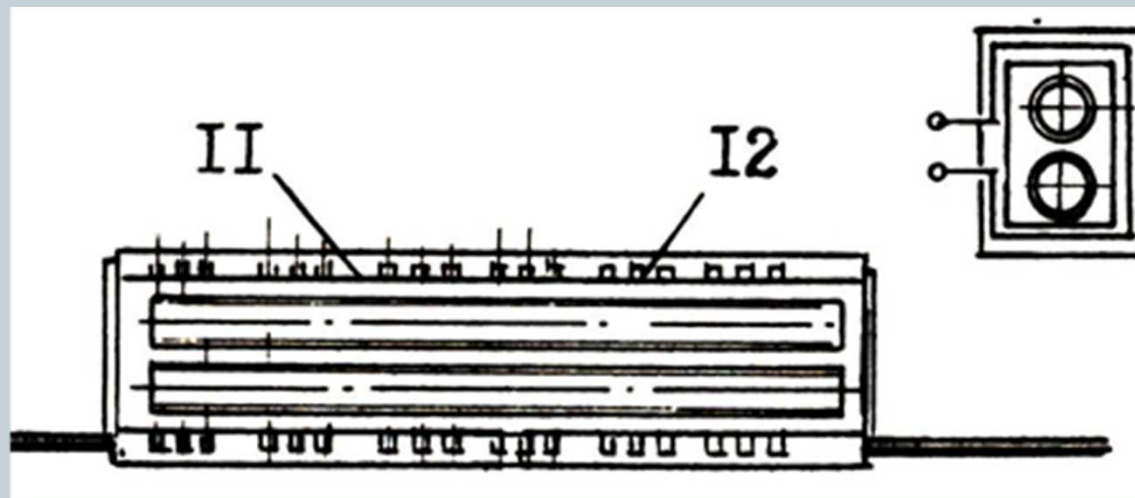
- 8 – изделия,
- 9 – теплоизоляция формы,
- 10 – перфорированный паропровод

Лекция 5_Установки для ТО

**Схема
электромагнитной
(индукционной)
камеры туннельного
типа**

**Область
применения:**

- агрегатно-поточное (полуконвейерное) производство изделий из тяжелого, легкого бетона в замкнутых формах;
- ТО с индукционным прогревом



**11 – металлическая камера,
12 – электрообмотка**

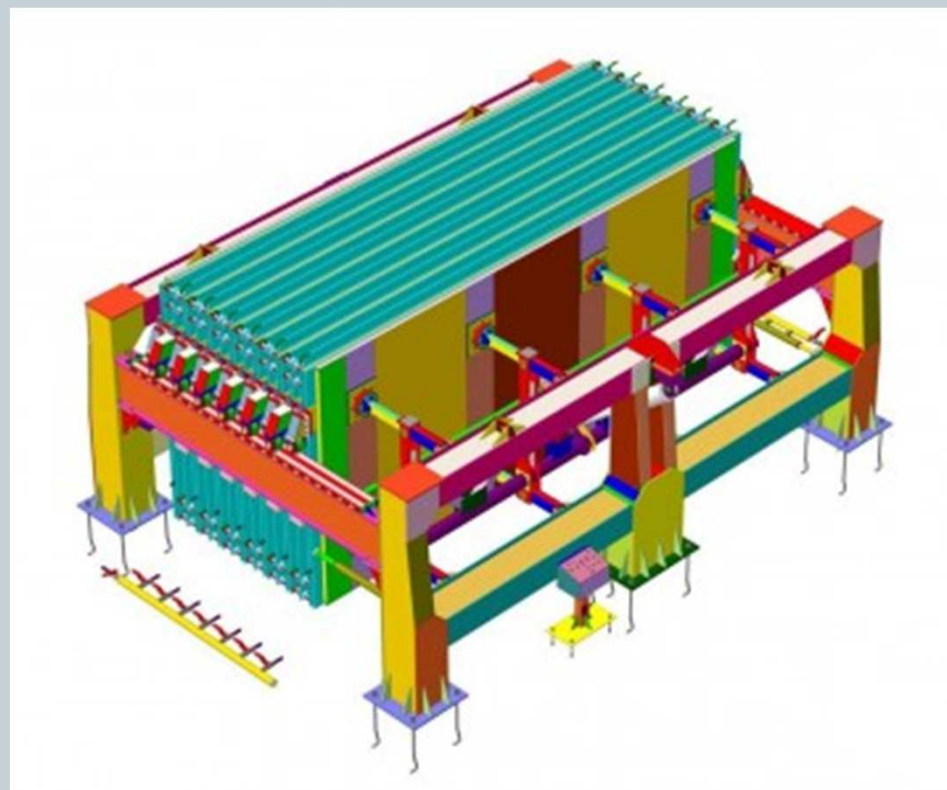
Лекция 5_Установки для ТО



Кассетно-формовочная установка

Область применения:

- стендовое производство изделий из тяжелого и мелкозернистого бетона в формовочных отсеках установки;
- ТО с контактным обогревом.



Лекция 5_Установки для ТО

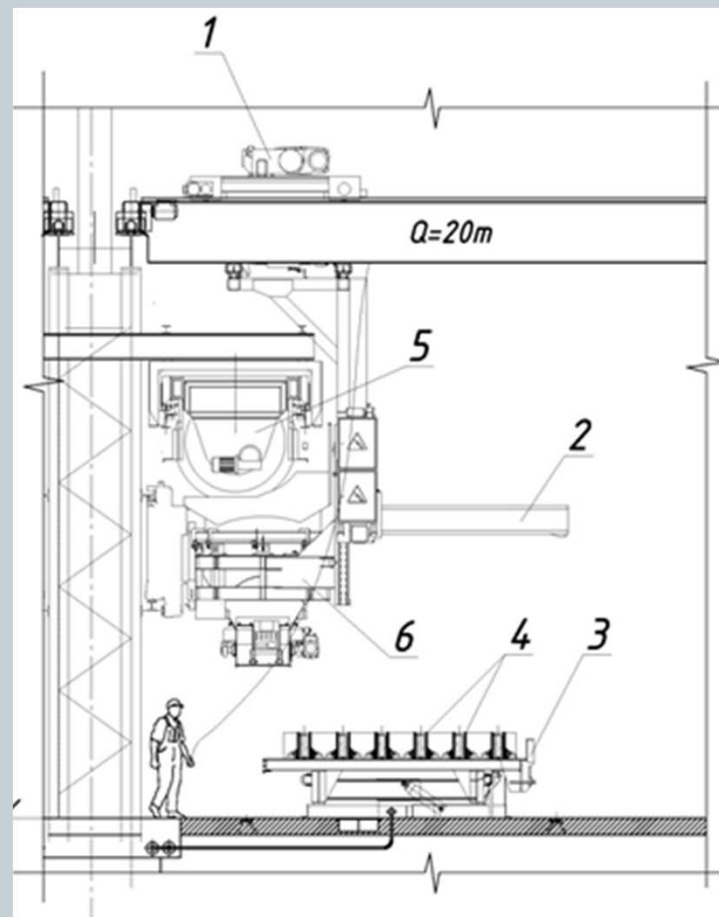


Схема стационарного наклоняемого формовочного стола

Область применения:

- станционное производство изделий из тяжелого, мелкозернистого и легкого бетона на формовочных столах с магнитной бортооснасткой;
- ТО с контактным обогревом.

1 - кран мостовой; 2 - кран консольный передвижной; 3 - стол формовочный наклоняемый с системой обогрева; 4 - бортовая оснастка; 5 - ковш-вагонетка адресной подачи смеси; 6 - бетонораздатчик



Лекция 5_Установки для ТО

Теплогенератор рециркуляционный газовый ТРГ

Область применения:

- обогрев бетонных и железобетонных изделий продуктами сгорания природного газа (ПСПГ) в камерах ямного или щелевого типа;
- ТО в среде пониженной влажности или в паровоздушной среде



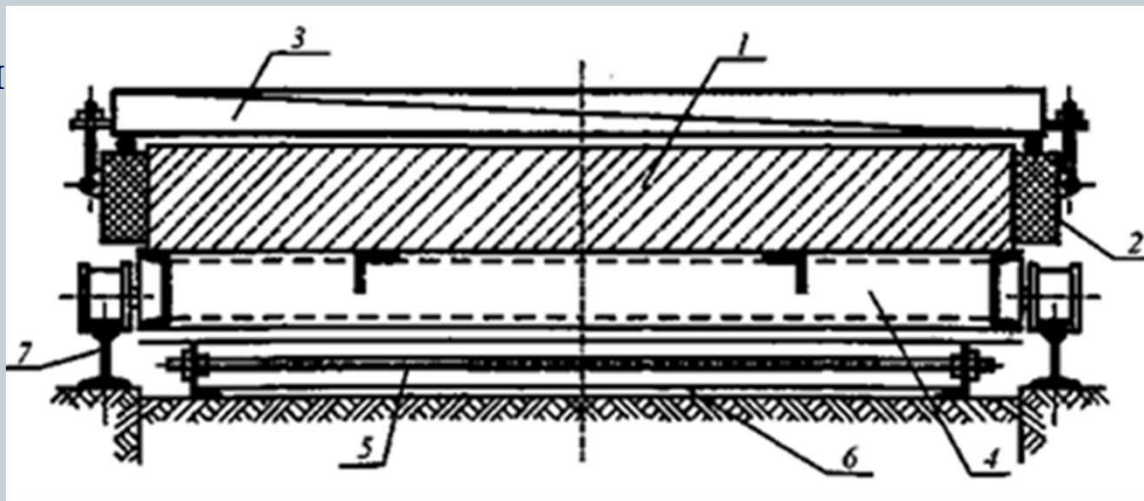
Лекция 5_Установки для ТО



**Гелиоформа с
солнцезабирающим
теплоаккумулирующим
покрытием (СВИТАП)**

Область применения:

**- использование
солнечной энергии для
ТО бетонных и
железобетонных изделий
на открытых полигонах,
расположенных южнее
50° северной широты**



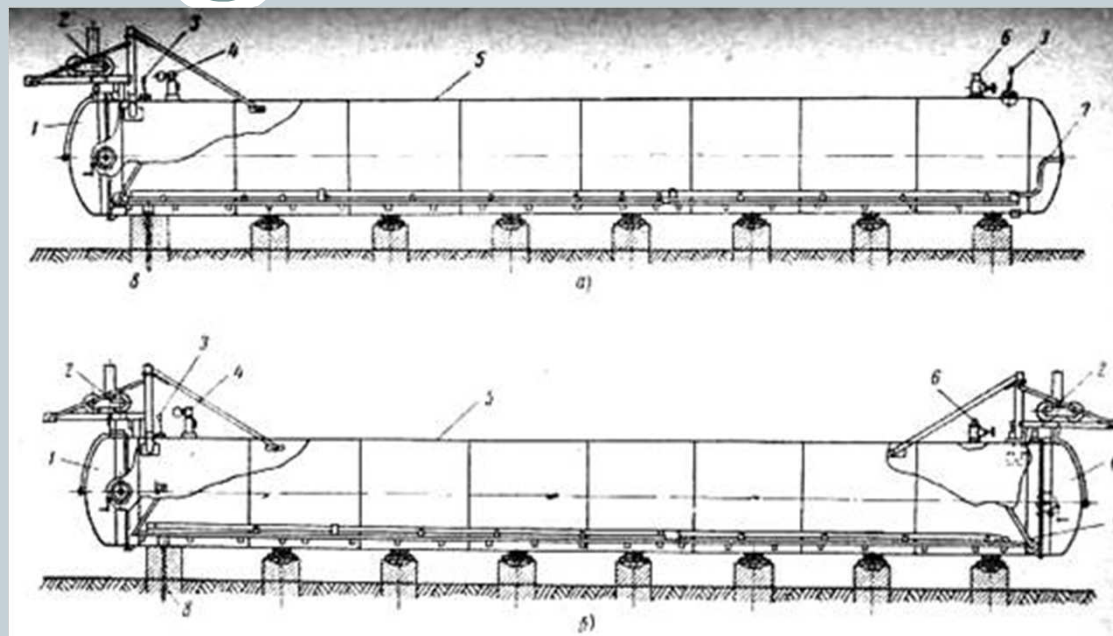
- 1 – железобетонное изделие;**
- 2 – борта формы с теплоизоляцией;**
- 3 – покрытие СВИТАП; 4 – поддон
формы; 5 – электронагреватель;**
- 6 – отражатель; 7- рельс**

Лекция 5_Установки для ТО

Схема автоклава тупикового и проходного

Область применения:

- агрегатно-поточное (конвейерное) производство изделий из плотного или ячеистого силикатного бетона;
- запаривание при избыточном давлении.



1 - крышка автоклава; 2 - механизм для подъема и опускания крышки, 3 - манометр, 4 - предохранительный клапан, 5 - корпус автоклава, 6 - паровыпускная магистраль, 7 - паровпускная магистраль, 8 - конденсационная магистраль

Лекция 6

Особенности тепловой обработки железобетонных изделий и конструкций



Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Особенности ТО изделий из бетонов на пористых заполнителях

При ТО легкобетонных изделий (например – стеновых панелей) необходимо обеспечить требуемый уровень - возможно минимальный - отпускной влажности, не превышающей, по объему:

13 % - для бетона панелей и блоков жилых и общественных зданий;

15 % - для панелей и блоков производственных зданий и бетонов на вспученном перлите и золах ТЭС.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Влажность конструкционно-теплоизоляционного бетона после тепловой обработки оценивается по формуле:

$$W = 0,1 [V - 0,15 Ц - i \tau (1/\Delta)],$$

где W - влажность бетона, % по объему;

V - полное количество воды в свежеприготовленной бетонной смеси, кг/м³;

$Ц$ - расход цемента, кг/м³;

i - интенсивность испарения воды из бетона, кг/м²·ч, определяемая в зависимости от начального водосодержания, температуры паровоздушной среды и относительной влажности;

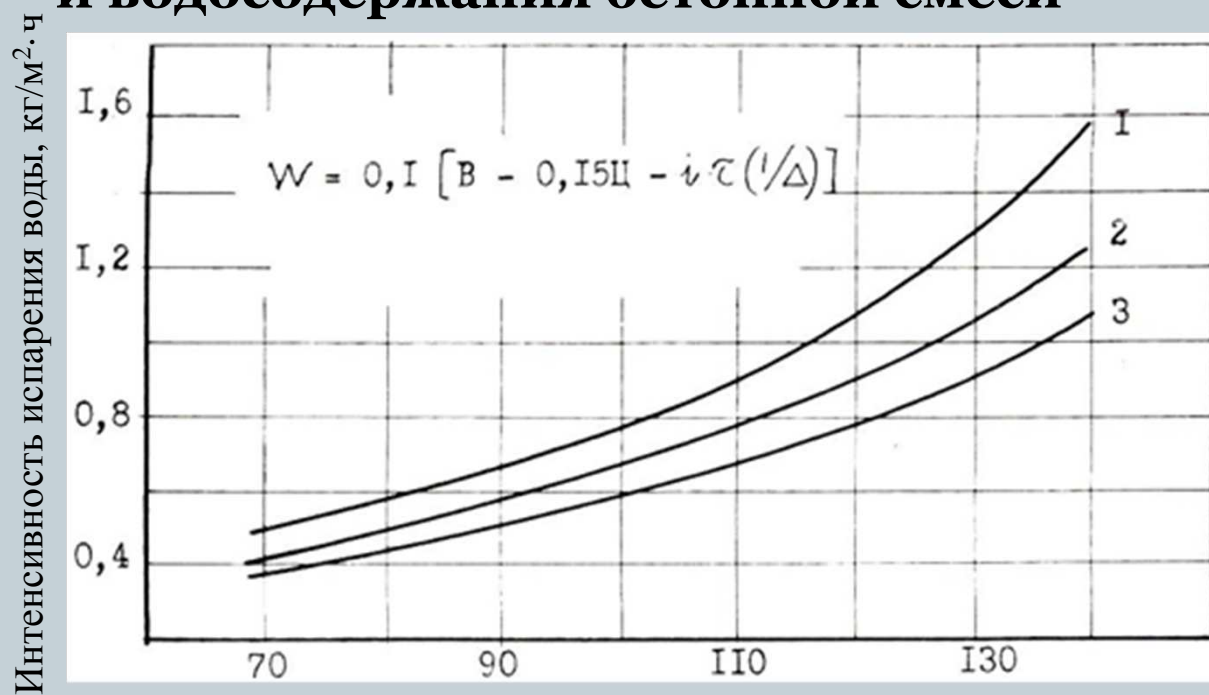
τ - общая продолжительность тепловой обработки, ч;

Δ - толщина изделия, м.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Зависимость интенсивности испарения воды от температуры и водосодержания бетонной смеси

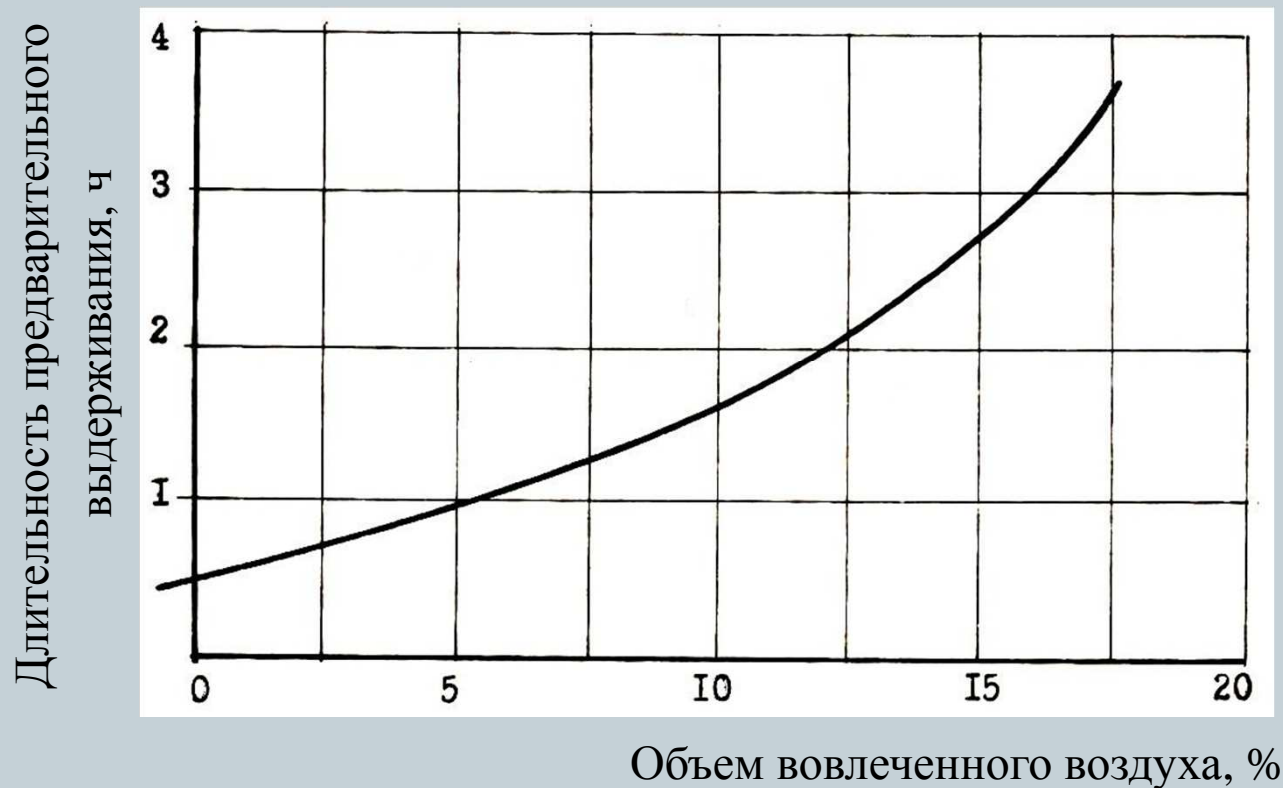


Средняя температура паровоздушной среды в камере, °С
Цифры у кривых – начальное водосодержание бетонной смеси: 1 – 240 л/м³;
2 – 210 л/м³; 3 – 175 л/м³; относительная влажность среды в камере – 40 %.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



При назначении длительности предварительного выдерживания легкобетонных изделий перед тепловой обработкой необходимо учитывать объем вовлеченного воздуха

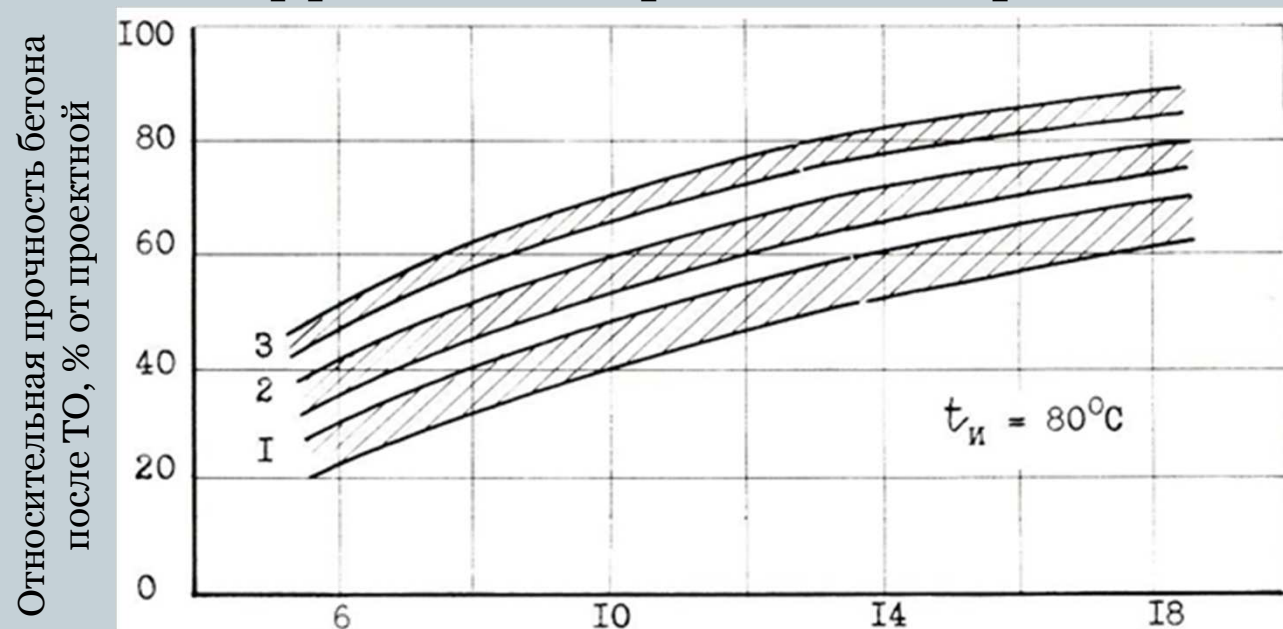


Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Продолжительность изотермического обогрева изделий из легкого бетона должна назначаться с учетом:

- вида и прочности пористого заполнителя;
- требуемой прочности легкого бетона;
- группы цемента по эффективности при тепловой обработке.



Длительность изотермического обогрева, ч

Цифры у кривых – вид мелкого заполнителя: 1 – песок пористый, 2 – зола ТЭС, 3 – песок плотный.

Верхние кривые – бетон на крупном пористом заполнителе марки по прочности П50, нижние – марки П100.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Зависимость прочности легкого бетона от температуры изотермического обогрева



Цифры у кривых – температура обогрева: 1 – 60 °С , 2 – 80 °С, 3 – 100 °С
Верхние кривые – для бетона прочности 5 МПа, нижние – 10 МПа.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Зависимость прочности легкого конструкционного бетона от длительности изотермического обогрева

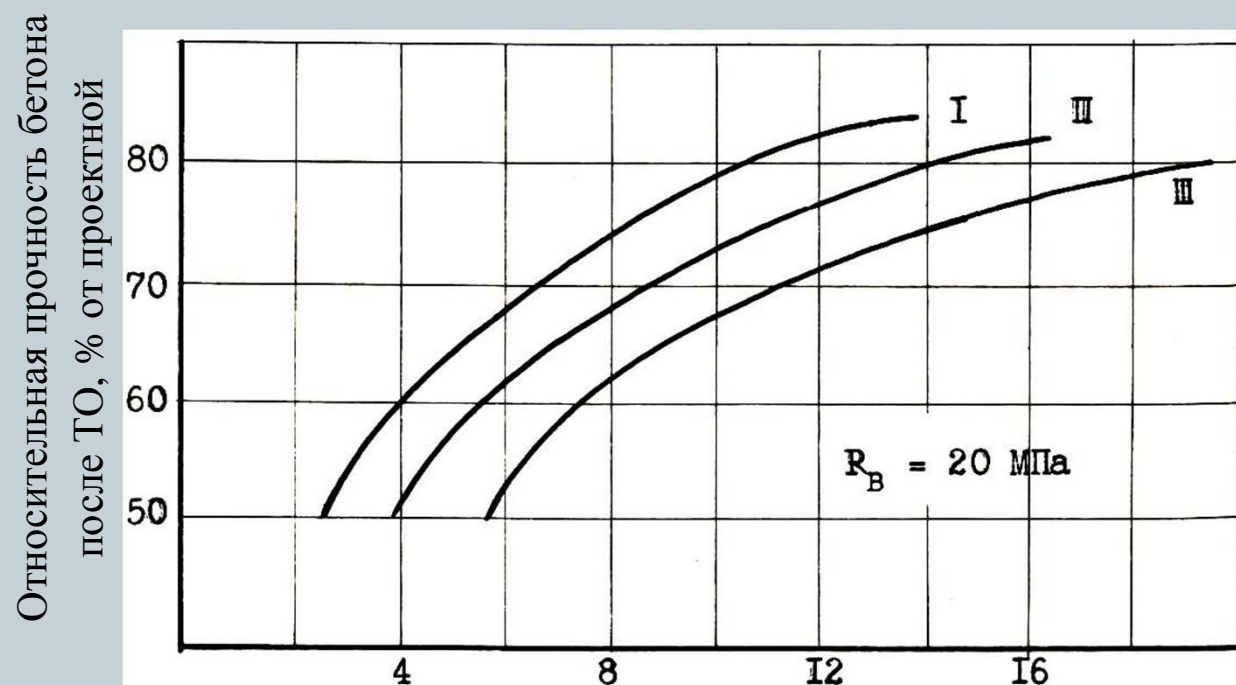


Цифры у кривых – бетон прочности: 1 – 35 МПа, 2 – 20 МПа, 3 – 15 МПа

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Влияние группы цемента на эффективность тепловой обработки легкого конструкционного бетона



Длительность изотермического обжига, ч

Цифры у кривых – группа цемента по эффективности при тепловой обработке.
Температура изотермического обжига – 80 °С.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Особенности ТО предварительно напряженных конструкций

Режимы ТО преднапряженных изделий, изготавливаемых на стендах, назначаются не только из условия обеспечения требуемой прочности бетона, но и сохранения необходимого уровня усилий в арматуре с учетом особенностей поведения материалов при повышенных температурах.

В процессе теплового воздействия происходит расширение бетона и арматуры. Растянутая арматура, закрепленная на упорах стенда, при нагревании не должна увеличивать свою длину, так как в ней могут уменьшиться предварительные напряжения. Бетон, наоборот, расширяется пропорционально приросту температуры.

При отсутствии сцепления бетона с арматурой созданные предварительные напряжения в затвердевшем изделии уменьшаются.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Величина потерь предварительного напряжения σ_n , МПа, определяется:

- температурным перепадом,
- начальной прочностью бетона,
- и видом арматурной стали.

$$\sigma_n = K_n \alpha_t E (t_{uz} - t_n) L_n / L_y \sim 2K_n \Delta t,$$

где K_n – коэффициент пропорциональности снижения потерь напряжений в арматуре за счет начального сцепления с бетоном;

α_t – коэффициент температурного (линейного) расширения стали;

E – модуль упругости стали, МПа;

t_{uz} – температура обогрева изделий, °С;

t_n – температура, при которой осуществляется натяжение арматуры, °С;

L_n – полная длина нагреваемых участков арматуры, м;

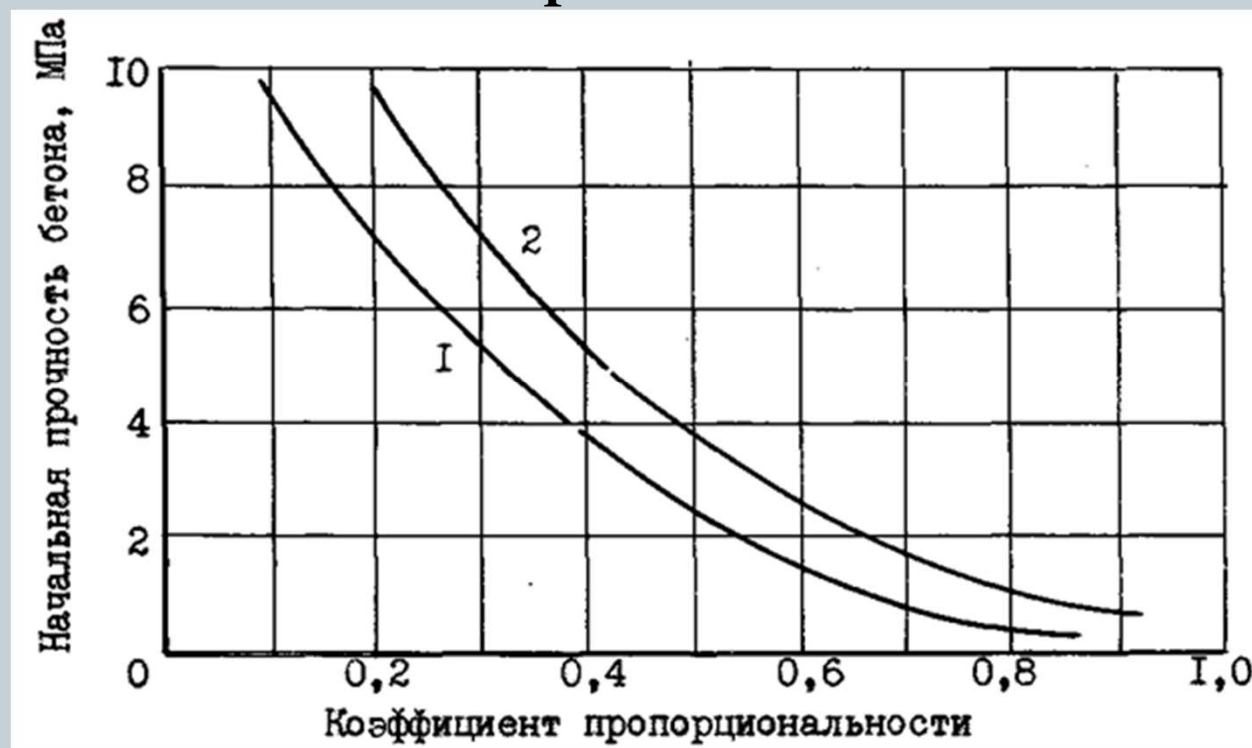
L_y – расстояние между упорами стенда, м;

Δt – разница между t_{uz} и t_n .

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Зависимость коэффициента пропорциональности (K_n) от начальной прочности бетона

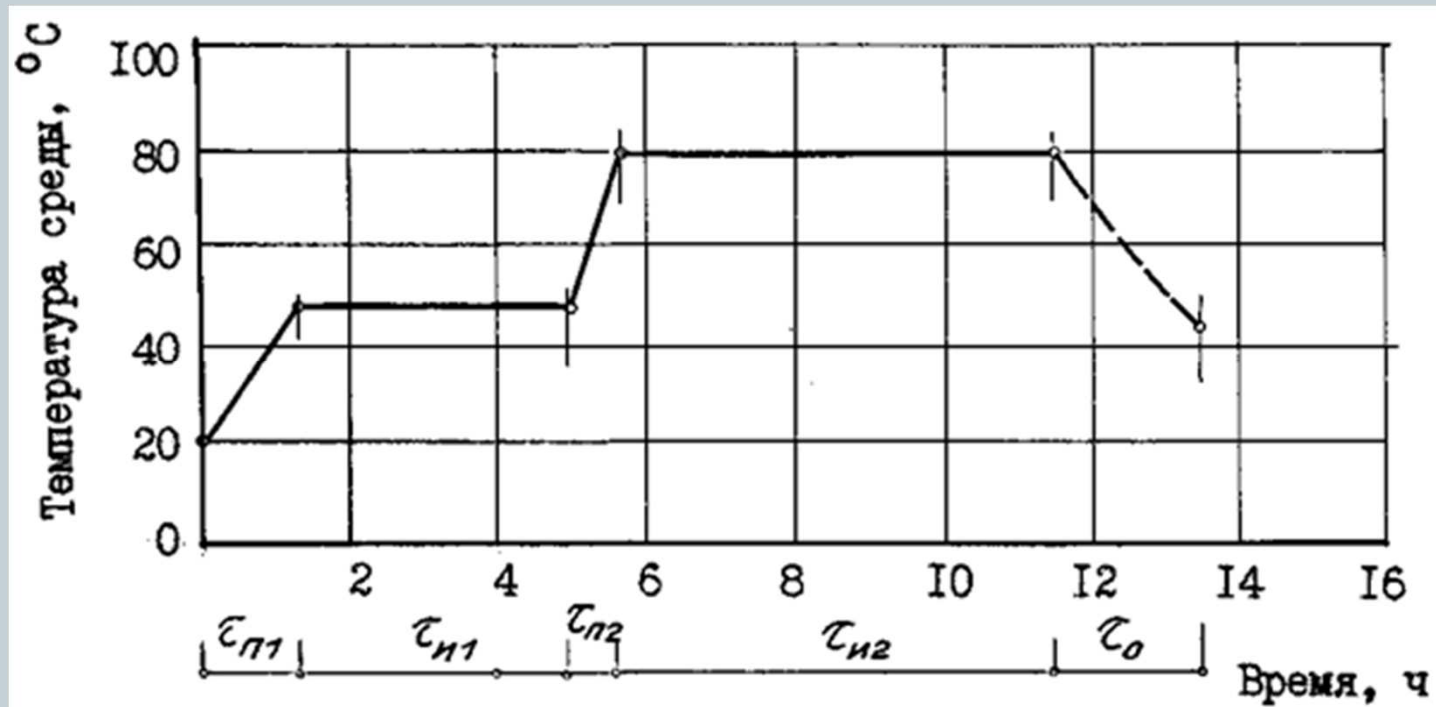


- 1 - для арматуры из высокопрочной проволоки и канатов;
2 - для арматуры стержневой, периодического профиля.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Эффективность тепловой обработки бетона при стендовом производстве предварительно напряженных изделий повышается при **ступенчатых режимах подъема температуры**



Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



В период первого подъема температуры до 40...45 °С падение напряжений будет пропорционально $K_n = 1$, так как в этот период начальная прочность бетона практически равна нулю.

На этапе выдерживания изделий при $t_{u1} = 40...45$ °С бетон приобретает начальную критическую прочность и падение напряжений в период второго подогрева изделий уменьшится.

Суммарные падения напряжений, МПа, при условии $L_n/L_y = 1$ составят:

$$\sigma_n = \sigma_{n1} + \sigma_{n2} = 2(t_{u1} - t_n) + 2K_n(t_{u2} - t_{u1}),$$

где σ_{n1} – падение напряжений на первом этапе подогрева, МПа;

σ_{n2} – то же, на втором этапе после выдерживания при t_{u1} , МПа;

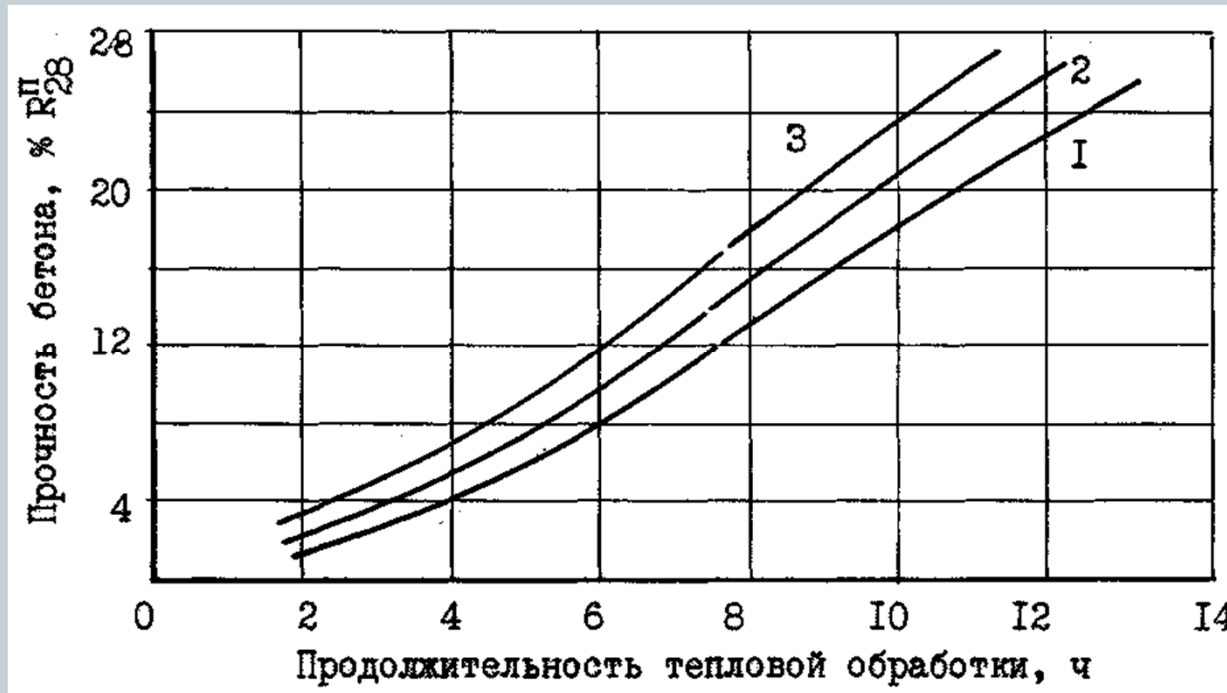
t_n – начальная температура, °С;

t_{u2} – температура второго изотермического обогрева, °С.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Длительность первого периода изотермического обогрева устанавливается в зависимости от требуемой величины прочности бетона к моменту начала подъема температуры второго периода



Цифры у кривых – температура обогрева: 1 – 35 °С; 2 – 40 °С; 3 – 50 °С

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Длительность второго периода изотермического обогрева устанавливается по графику нарастания прочности бетона при температуре 80 °С

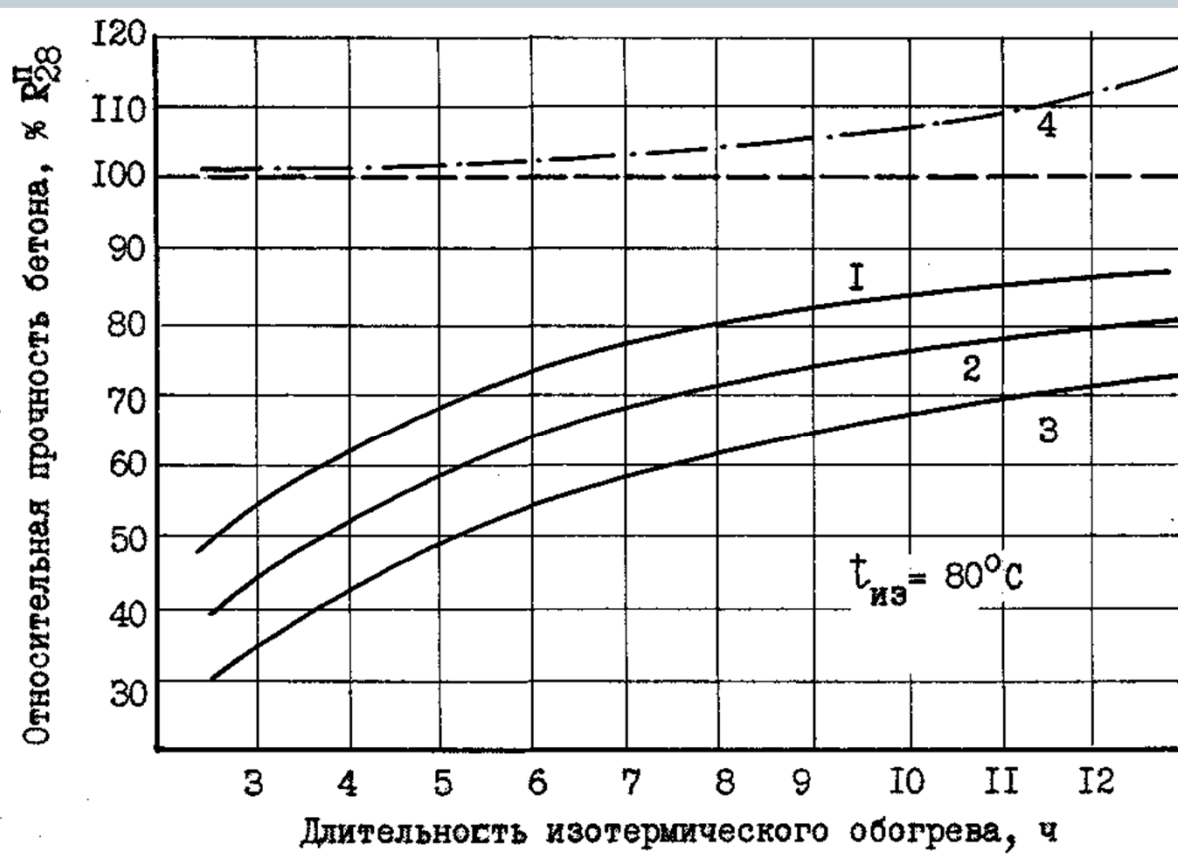
Цифры у кривых:

1 - бетоны из жестких смесей, повышенной прочности;

2 - бетоны из умеренно жестких и малоподвижных смесей;

3 - бетоны из подвижных смесей;

4 - эталонная прочность, % от прочности в проектном возрасте





Использование электрической энергии при ТО железобетонных изделий и конструкций

Электропрогрев бетона - метод тепловой обработки бетона при изготовлении наружных стеновых панелей из легкого и ячеистого бетона, блоков из тяжелого и легкого бетона, а также при производстве изделий в кассетных установках.

В практике производства сборного железобетона применение электропрогрева развивается в трех направлениях:

- 1 - электропрогрев отформованных изделий;**
- 2 - предварительный электропрогрев смесей из тяжелого и легкого бетона;**
- 3 - электропрогрев с применением внешних источников тепла.**

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Электропрогрев с применением внешних источников тепла (радиационно-конвективные способы)

Для этой цели используются:

- трубчатые электрические нагреватели (ТЭНы), смонтированные в щелевых или других камерах, а также в термоформах и кассетах;**
- электропечи или панели сопротивления, а также лампы инфракрасного облучения;**
- индукционные токи нормальной частоты в цельнометаллической индукционно-лучевой камере-сердечнике по типу Минского ДСК.**

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



При радиационно-конвективном электропрогреве совмещаются процессы разогрева и сушки, поэтому его целесообразно применять для ограждающих конструкций из легких бетонов, при изготовлении конструкций с большим модулем поверхности M_{Π} :

$$M_{\Pi} = S/V_{\Pi}, \text{ м}^{-1},$$

где S – площадь поверхности изделия, м^2 ;

V_{Π} – объем изделия, м^3 .

Нецелесообразно прогревать массивные конструкции с небольшим M_{Π} ввиду длительности проникновения тепла в ядро сечения и невыгодного распределения температуры, вызывающего термонапряженное состояние.

Недостатки электропрогрева:

нет заметного ускорения по сравнению с паропрогревом;

относительно большой расход электроэнергии **80 – 120 кВт·ч/м³**.



Электроиндукционная установка (электромагнитная камера) с излучающими поверхностями

При пропуске через наружную обмотку камеры электрического тока промышленной частоты 50 Гц напряжением 380/220 В образуется переменное электромагнитное поле, которое замыкается металлическими стенками камеры.

Магнитный поток, пронизывая стенки камеры, индуцирует в них ЭДС, вызывающую вихревые токи, за счет которых поверхности стальных стенок и арматуры нагреваются и передают тепло бетону.



Тепловая обработка с использованием солнечной энергии

При изготовлении бетонных и железобетонных изделий на открытых полигонах расположенных южнее 50° северной широты и особенно в районах с сухим жарким климатом весьма эффективным является использование солнечной энергии для тепловой обработки отформованных изделий.

Для этого используются специальные гелиоформы с солнцевоспринимающими теплоаккумулирующими покрытиями (СВИТАП). При этом восполнение дефицита солнечной энергии регулируется поступлением дополнительного тепла от дублирующих источников энергии.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Сочетание покрытий СВИТАП с низко-температурными электронагревателями обеспечивает экономию тепловой энергии в осенне-весенний период на 25-40 %, а в летнее время до 100 %. Покрытие СВИТАП позволяет использовать поток солнечной радиации естественной концентрации для повышения температуры бетона, способствует аккумулярованию тепла изделиями и защищает от теплопотерь в ночное время.

Продолжительность безобогревного выдерживания отформованных бетонных и железобетонных изделий зависит от средней (за время выдерживания) температуры твердеющего бетона, требуемой распалубочной и отпускной прочности, вида и состава бетона, активности применяемого цемента и ряда других факторов и определяется по графикам нарастания прочности, установленным экспериментально для каждого конкретного случая.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Тепловая обработка с использованием продуктов сгорания природного газа

В последнее время на заводах сборного железобетона все чаще применяется обогрев бетонных и железобетонных изделий продуктами сгорания природного газа. Сжигание природного газа осуществляется в теплогенераторах ТОК 1А, ТРГ и других.

Теплогенераторы предназначены для работы в установках (замкнутых системах), состоящих из камеры тепловой обработки, теплогенератора, рециркуляционного вентилятора, газоходов рециркуляции, вентиляционной системы, системы автоматике.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



При работе теплогенератора высокотемпературные продукты сгорания природного газа смешиваются с рециркулируемым воздухом. Образовавшаяся смесь заданной температуры поступает в камеру тепловой обработки, циркулирует через камеру, отдавая тепло изделиям, и вновь отбирается рециркуляционным вентилятором.

Требуемый тепловлажностный режим обработки обеспечивается системой автоматики теплогенератора и узлом увлажнения, который предназначен для повышения относительной влажности теплоносителя за счет распыления воды за теплогенератором.

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Автоклавная обработка бетона

Автоклавная обработка бетона – заключительная стадия технологического процесса производства многих строительных материалов: ячеистого бетона, силикатного кирпича и других.

При автоклавной обработке при давлении не ниже 0,8 МПа и температуре насыщенного водяного пара 175 – 200 °С происходят следующие процессы:

- химическое взаимодействие между оксидом кальция, содержащимся в извести или портландцементе, кремнеземом (SiO_2) молотого кварцевого песка и водой с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция;**
- ускоренное твердение образовавшегося цементирующего вещества и превращение силикатной массы в камневидный материал.**

Лекция 6_ Особенности тепловой обработки ЖБИиК



Твердение изделий в автоклавах проводят в автоматическом режиме в несколько стадий:

В начальный период из автоклава удаляют воздух продувкой паром (0,7 – 1,5 ч).

На втором этапе поднимают температуру до максимальной величины и давление до 0,8 МПа в течение 2 – 3 ч.

Затем следует изотермическая выдержка изделий в течение 8 – 12 ч при постоянной температуре и давлении 0,8 – 1,2 МПа.

Последний период автоклавной обработки бетона связан с плавным снижением давления и температуры в автоклаве за счет перепуска пара (2 – 3 ч).

Скорость снижения давления назначают из условия предотвращения разрушения изделий от интенсивного обезвоживания.

После завершения автоклавной обработки изделия, как правило, выдерживают до распалубки или разборки в течение 1,5 – 2,5 ч.

Лекция 7

Повышение эффективности тепловой обработки



Лекция 7_Повышение эффективности ТО



Повышение эффективности тепловой обработки и снижение энергетических затрат достигается следующими мероприятиями:

- выбор рационального режима и условий тепловой обработки в зависимости от организации технологического процесса и выпускаемой номенклатуры изделий;**
- применение низкотемпературных и термосных режимов в зависимости от величины резервного времени на технологическом комплексе;**
- совершенствование конструкции тепловых агрегатов (повышение теплозащитных свойств ограждений);**
- применение комплексной системы технических, технологических и организационных мероприятий, подчиняющих все звенья технологической цепи (от выбора цемента до административного аппарата) главной задаче – снижению энергоемкости сборного железобетона.**

Лекция 7_Повышение эффективности ТО



Условия тепловой обработки железобетонных изделий

Технологический прием	Цикл ТО, ч	Рекомендуемая технология	Рекомендуемая номенклатура изделий
1 Применение химических добавок - ускорителей твердения	$\frac{8 - 10}{7 - 9}$	Любая	Любые, кроме преднапряженных при ограничении по условиям коррозии
2 Применение предварительного паро- или электроразогрева	то же	Конвейерная, кассетная	Толщина изделий более 200 мм
3 Снижение величины отпускной прочности до 50-60 %	$\frac{9 - 10}{8 - 9}$	Любая	Любые, кроме преднапряженных, по согласованию с потребителем
4 Учет прироста прочности за 0,5 - 1 сут. последующего твердения	$\frac{10 - 11}{9 - 10}$	То же	Любые, при наличии в цехе площади
5 Двухстадийная тепловая обработка (после I стадии – распалубочная прочность, после II стадии – отпускная)	$\frac{5 - 7}{4 - 6}$ (I стад)	То же	Любые, кроме преднапряженных, после реконструкции, для вновь строящихся предприятий

Над чертой - при применении цемента марки ПЦ400-Д0, под чертой - ПЦ500-Д0.
Нормативный режим 13 ч = (2) + 3 + 6 + 2

Лекция 7_Повышение эффективности ТО



Технологический прием	Цикл ТО, ч	Рекомендуемая технология	Рекомендуемая номенклатура изделий
6 Тепловая обработка в малонапорной камере (P = 0,5 атм)	$\frac{9 - 10}{8 - 9}$	Агрегатная	Тонкостенные конструкции при специальной разработке камер
7 Тепловая обработка в среде с регулируемой влажностью	$\frac{10 - 11}{9 - 10}$	Агрегатная, конвейерная	То же, при переоборудовании камер
8 Тепловая обработка в электроиндукционных камерах	$\frac{9 - 10}{8 - 9}$	То же	Густоармированные изделия. При применении новых камер
9 Тепловая обработка в камерах инфракрасного прогрева	11 - 12	То же	Толщиной не более 250 мм, легкие бетоны

Над чертой - при применении цемента марки ПЦ400-Д0, под чертой - ПЦ500-Д0.

Нормативный режим 13 ч = (2) + 3 + 6 + 2

Лекция 7_Повышение эффективности ТО



Технологический прием	Цикл ТО, ч	Рекомендуемая технология	Рекомендуемая номенклатура изделий
10 Тепловая обработка в камерах высокотемпературного сухого прогрева	$\frac{8 - 10}{7 - 9}$	То же	Толщиной не более 250 мм, легкие бетоны. Густоармированные изделия
11 Форсированный электропрогрев смеси с повторным виброуплотнением	$\frac{8 - 9}{7 - 8}$	То же	Изделия неармированные, либо со специальным армированием
12 Применение быстротвердеющего цемента ПЦ550-Д0 - ПЦ600-Д0 и более эффективных способов уплотнения бетонных смесей	6 - 7	Любая	На действующих заводах
Над чертой - при применении цемента марки ПЦ400-Д0, под чертой - ПЦ500-Д0. Нормативный режим 13 ч = (2) + 3 + 6 + 2			

Лекция 7_Повышение эффективности ТО



В случаях, когда на технологической линии оборачиваемость теплового агрегата составляет один оборот в сутки, назначаются термосные или низкотемпературные режимы ТО.

Применение таких режимов позволяет получить изделия с требуемой прочностью при меньших расходах тепловой энергии. Одновременно низкотемпературные режимы обеспечивают снижение расхода цемента.

Длительность ускоренного твердения бетона в этих случаях назначается в зависимости от резервного времени τ_p для тепловой обработки:

$$\tau_p = \tau_{n+1} - \tau_n - \tau_3$$

где τ_n – текущее время суток начала технологического цикла, ч;

τ_{n+1} – то же, начала последующего технологического цикла, ч;

τ_3 – длительность загрузки камеры, ч.

Лекция 7_Повышение эффективности ТО



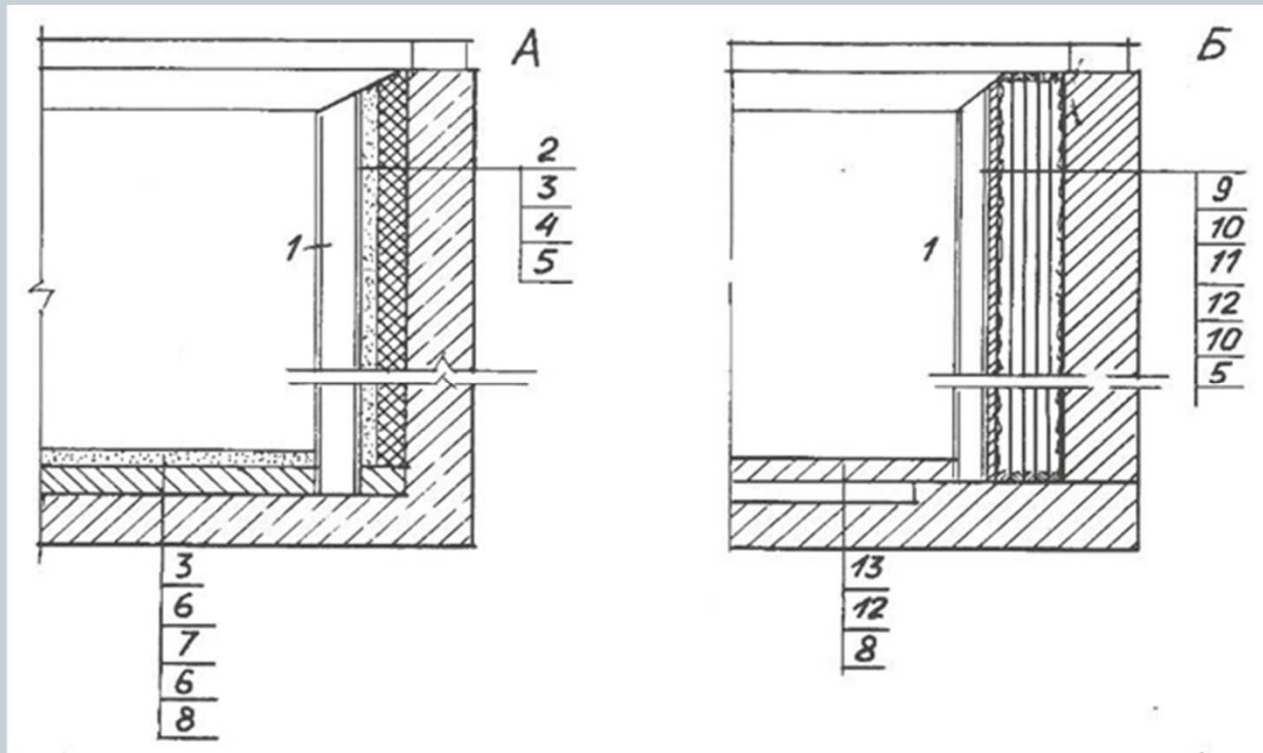
Термосные режимы тепловой обработки бетона

Проектные классы бетона	Температура разогрева бетона, °С	Режимы ТО, ч: подъем температуры + термосное выдерживание (без подачи пара) при толщине бетона в изделии, мм	
		до 160	160...400
B15...B25	80...85	19(4+15)	20(5+15)
B27,5; B30	70	18(3+15)	19(4+15)
B40; B45	60	17,5(2,5+15)	18(3+15)

Лекция 7_Повышение эффективности ТО



Схема устройства теплоизоляции ограждений камер ямного типа А – с латексной гидроизоляцией; Б – с экранной изоляцией



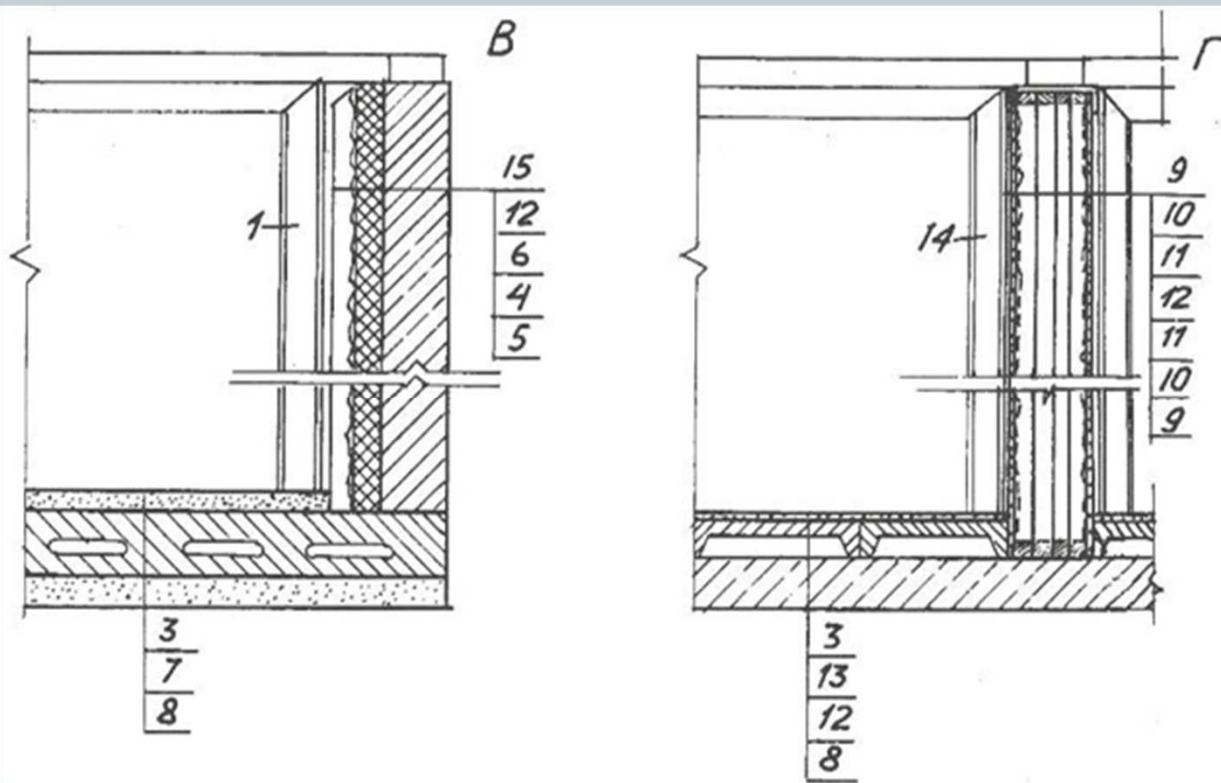
- 1 – защитные стойки,
- 2 – пароизоляция ЛСП-904,
- 3 – цементно-песчаная стяжка по сетке,
- 4 – теплоизоляция,
- 5 – железобетонная стена,
- 6 – гидроизоляция,
- 7 – керамзитобетонная плита,
- 8 – бетонная подготовка,
- 9 – асбестоцементный лист $\delta = 16$ мм,
- 10 – фольгоизол (алюминиевая фольга),
- 11 – экраны из пленки ПЭТФ,
- 12 – воздушные прослойки,
- 13 – панель перекрытия,
- 14 – стойка пакетировщика,
- 15 – стальной лист $\delta = 3$ мм

Лекция 7_Повышение эффективности ТО



В – с металлической гидроизоляцией;

Г – перегородка блока камер с экранной изоляцией



- 1 – защитные стойки,
- 2 – пароизоляция ЛСП-904,
- 3 – цементно-песчаная стяжка по сетке,
- 4 – теплоизоляция,
- 5 – железобетонная стена,
- 6 – гидроизоляция,
- 7 – керамзитобетонная плита,
- 8 – бетонная подготовка,
- 9 – асбестоцементный лист $\delta = 16$ мм,
- 10 – фольгоизол (алюминиевая фольга),
- 11 – экраны из пленки ПЭТФ,
- 12 – воздушные прослойки,
- 13 – панель перекрытия,
- 14 – стойка пакетировщика,
- 15 – стальной лист $\delta = 3$ мм

Вопросы для контроля

1. Способы ускорения твердения бетона
2. Положительное и отрицательное влияние тепловой обработки на бетон
3. Факторы, влияющие на эффективность тепловой обработки
4. Технико-экономическое обоснование параметров теплового воздействия
5. Нормативные режимы тепловой обработки
6. Выбор агрегатов тепловой обработки для ускорения твердения бетона
7. Особенности тепловой обработки предварительно напряженных изделий, изготавливаемых на стандах
8. Особенности тепловой обработки изделий из легкого бетона
9. Тепловая обработка изделий с повышенными требованиями по морозостойкости и водонепроницаемости
10. Тепловая обработка с контактным обогревом в замкнутых формах
11. Использование электрической энергии для ускоренного твердения бетона
12. Тепловая обработка изделий с использованием солнечной энергии и продуктов сгорания природного газа
13. Тепловая обработка изделий в автоклавах
14. Экономия энергии при тепловой обработке бетонов. Рациональные способы и режимы тепловой обработки
15. Применение низкотемпературных и термосных режимов ТО
16. Мероприятий по снижению энергоемкости производства железобетонных изделий



