

Вълв Николаев Вълв

Висшият институт по архитектура и строителству - София, НРБ

МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕЗПРОПАРОЧНОГО УСКОРЕННОГО ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

Streszczenie. Wysoka energochłonność obróbki cieplnej betonów w celu przyspieszenia wzrostu ich wytrzymałości ukierunkowała autora do podjęcia prac nad obróbką cieplną innymi mniej energochłonnymi metodami. Założono przy tym, że beton powinien uzyskać wytrzymałość pozwalającą na rozformowanie po 24 - 36 h od zabetonowania (zależnie od temperatury otoczenia). Referat zawiera wyczerpujące dane do projektowania przebiegu procesów twardnienia przy: stosowaniu ciepłych mieszanek, zwiększonej ilości cementu, stosowaniu wysokoaktywnych cementów oraz szczególnie szybko twardniejących cementów, stosowaniu chemicznych dodatków. Wymagane jest przy tym izolowanie cieplne twardniejącego betonu. Bardzo wartościowe są ustalenia (ogólne i na konkretnych przykładach) dotyczące techniczno-ekonomicznej efektywności metod bezparowego przyspieszania twardnienia betonu.

1. Общие положения

В зависимости от характера железобетонных изделий и технологических методов тепловой обработки для ускоренного твердения бетона затрачивается от 3,75 до 9,25 раз больше энергии, чем для всех остальных производственных процессов. Возникает вопрос отыскания условий, при которых безпропарочное твердение бетона будет рационально.

Здесь ставлена задача на основании технологического анализа и экспериментальных исследований ускоренного твердения бетона без теплового воздействия разработать метод проектирования его при следующих условиях: применения технологических способов безпропарочного ускоренного твердения; получении заданной распалубочной прочности в течение 24 - 36 часов после формования; изменении температуры воздуха в цехах в течение года; осуществлении процесса твердения без водородания.

Можно применять отдельно или в комбинации несколько способов для безпропарочного ускоренного твердения: использование теплых бетонных смесей; приготовление бетона с перерасходом цемента; вкладывание в бетон химических добавок с ускоряющим эффектом; приготовление бетона с высококачественными (высокоактивными и быстротвердеющими) цементами; теплоизолирование поверхностей элементов и спалубочных форм. Каждая из этих способов или комбинация из них представляет технологический вариант (решение) для безпропарочного ускоренного твердения бетона.

Состоятельность технологических вариантов будет предопределять условиями: обеспечением прочностей - технологической (распалубочной)

$R_T \geq R_{до}$ ($R_{до}$ - заданная распалубочная прочность);

в заданном сроке твердения Z h и конечной прочности $R_{28K} \geq R_{28}$

(R_{28} - марочная прочность бетона); без водородания ускоренного твердения по сравнению с твердением тепловой обработкой.

Безпропарочное ускоренное твердение бетона здесь рассматривается как непрерывно совершающийся процесс в течение года в крытых цехах.

Температура воздуха в цехах железобетонной промышленности в условиях НРБ можно принять $t_{в} \geq 6^{\circ}\text{C}$. При этом положении безпропарочное ускоренное твердение бетона будет применяться и на открытых полигонах, когда $t_{в} \geq 6^{\circ}\text{C}$ или от 55 до 80 % года.

Из-за различия прочностного эффекта способ безпропарочного ускоренного твердения бетона и необходимости для рационального их применения разграничиваем три температурные интервалы $t_{в}$: при

I $6 \leq t_{в} \leq 15^{\circ}\text{C}$; при II $16 \leq t_{в} \leq 25^{\circ}\text{C}$; при III $t_{в} \geq 26^{\circ}\text{C}$.

С учетом обеспеченности процесса твердения как вычислительную температуру $t_{вн}$ при проектировании принимаем нижнюю границу температурных интервалов.

Себестоимости безпропарочного ускорения твердения $C_{6п}$ и твердения тепловой обработкой $C_{то}$ зависят от разных факторов. При одинаковых прочностных требованиях в этом исследовании имеется ввиду условие $C_{6п} \leq C_{то}$.

Выходящий состав бетона тот, который проектирован для ускоренного твердения тепловой обработкой. При твердении этого бетона до распалубки ($Z h$) в среде с $t_{вн}$ соответственного температурного интервала получается выходящая прочность $R_{н}$, которая меньше заданной распалубочной прочности $R_{до}$. Вследствие применения данного технологического способа безпропарочного твердения прочность бетона увеличивается на ΔR_1 МПа. При проектировании отыскивается такая комбинация из технологических способов (технологическое решение) безпропарочного ускоренного твердения, при которой

$$R_{т} = R_{н} + \sum_{i=1}^m \Delta R_i \geq R_{до} \quad (1)$$

где m количество способов и комбинации.

2. Прочностный эффект технологических способов безпропарочного ускоренного твердения бетона

А. Использование теплых смесей. Здесь имеется ввиду получение теплых бетонных смесей приготовлением с предварительно разогретой до 80°C водой. В этом случае определяются параметры: t_6 - температура бетонной смеси во время ее приготовления и $t_{6н}$ - начальная температура ее в конце укладки в опалубочную форму. Для определения t_6 и $t_{6н}$ предлагаем формулы

$$t_{в} = 1,05 t_{вн} + 1,52 (T_{в} - t_{вн}) B - 2,8 \quad ^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

$$\text{и} \quad t_{6н} = t_6 + \frac{T_{в} - t_{вн}}{80} (7,6 - 0,1 t_{вн}) \quad ^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

где T - температура, до которой разогревается вода, °C;

V - расход воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$ бетона.

Вследствие твердения бетона при более высокой температуре выходящая прочность $R_{\text{и}}$ увеличится на ΔR_t

$$\Delta R_t = \left[\frac{R_{tz}^0}{R_{zi}^0} - 1 \right] R_{\text{и}} \quad \text{МПа} \quad (4)$$

где R_{tz}^0 и R_{zi}^0 относительные прочности соответственного теплового и выходящего бетона на возраст Z суток, % от R_{28} (табл.1).

Таблица 1

Относительные прочности бетона R_{zi}^0 в % от R_{28}

Вид цемента	Возраст Z , сутки	Вычислительная температура $t_{\text{ви}}$, °C			
		6	16	26	36
Обычный цемент $R_{\text{ц}} = 35$	0,5	4	9	13	23
	1	10	18	26	38
	1,5	13	25	37	52
	2	18	32	47	63
Сверх быстро твердеющий цемент (СВТЦ) $R_{\text{ц}} = 35$	0,5	13	25	40	50
	1	33	45	55	65
	1,5	40	55	65	75
	2	45	60	70	80

В. Приготовление бетона с перерасходом цемента. Перерасход цемента $\Delta \text{Ц}$ по сравнению с проектным расходом Ц при постоянной удобоукладываемости доводит до уменьшения водоцементного отношения W , вследствие которого прочность бетона повышается на ΔR_{28}

$$\Delta R_{28} = (96 \Delta \text{Ц} - 191 \Delta \text{Ц}^2) \frac{0,65}{W_1} \quad \text{МПа} \quad (5)$$

где W_1 водоцементное отношение при $\text{Ц}_1 = \text{Ц} + \Delta \text{Ц}$.

Выходящая расщепочная прочность увеличится на $\Delta R_{\Delta \text{Ц}}$

$$\Delta R_{\Delta \text{Ц}} = R_{\text{и}} \left[\frac{\Delta R_{28}}{R_{28}} + \frac{0,5 \Delta \text{Ц}}{\text{Ц}} \right] \quad \text{МПа} \quad (6)$$

С. Приготовление бетона с более высокоактивными цементами.

Здесь вопрос рассматривается при условии одинакового расхода цемента, одинаковой удобоукладываемости и выходящей марки цемента $R_{\text{ц}} = 35$.

В обычных границах расхода цемента ($C = 250 - 400 \text{ kg/m}^3$) прочность бетона прямо пропорциональна активности $R_{ц}$. При употреблении цемента с $R_{ц} > 35$ будет получаться соответственное нарастание прочности на ΔR_{28} . Для определения на основании формулы Болонья для R_{28} получается

$$\Delta R_{28} = a \left(\frac{1}{W} - 0,50 \right) (R_{ц}^* - 35) \quad \text{МПа} \quad (7)$$

где $R_{ц}$ - активность (марка) употребляемого цемента, МПа ($R_{ц} > 35$)

Нарастание выходящей технологической прочности на $\Delta R_{R_{ц}}$ при этом способе ускоренного твердения бетона будет определять по формуле

$$\Delta R_{R_{ц}} = R_{и} \frac{\Delta R_{28}}{R_{28}} \quad \text{МПа} \quad (8)$$

Д. Приготовление бетона с сверхбыстро твердеющим цементом (СБТЦ).

При употреблении СБТЦ прочность $R_{и}$ увеличится на $\Delta R_{сц}$

$$\Delta R_{сц} = R_{зи}^0 R_{28} - R_{и} \quad \text{МПа} \quad (9)$$

где $R_{зи}^0$ как при форм. (4) (табл. 1).

Е. Вкладывание химических добавок в бетон. Здесь имеются ввиду три группы химических добавок: ускоряющие, суперпластифицирующие и пластифицирующе-ускоряющие. Употребление их рассматривается при условии одинаковой удобоукладываемости и одинакового расхода цемента как при выходящем составе бетона. Эти добавки ускоряют твердение бетона в различной степени в ранний возраст и до 28 - суточного вызревания. Этот процесс характеризуем показателем "прочностный эффект добавки δ_z "

$$\delta_z = \frac{R_{зд}}{R_z} > 1 \quad (10)$$

где R_z и $R_{зд}$ прочности бетона без и с добавками на возрасте суток.

При ускоренном твердении бетона без теплового воздействия имеют значение стоимости δ_z при $Z=0,5; 1; 1,5; 2$ и 28 суток (табл. 2).

Ожидаемое при бетоне с добавками увеличение выходящей распалубочной прочности $\Delta R_{д}$ будет определять по формуле

$$\Delta R_{д} = (\delta_z - 1) R_{и} \quad \text{МПа} \quad (11)$$

Ф. Теплоизоляция бетона. Теплоизоляция бетона становится необходимым при употреблении теплых бетонных смесей для температурных интервалов I и II и холодных бетонных смесей для температурного интервала I. Лучшим способом оно можно осуществить стиропорными плоскостями (с толщиной 4 - 6 см) к опалубочным обшивкам и настилкой их непосредственно сверху открытые поверхности элементов во время бетонирования. Когда способы беспарочного ускоренного твердения применяются комбинированно, каждый очередной способ будет иметь как выходящий бетон (по составу, прочности и температуре вызревания) тот,

Таблица 2

Данные для прочностного эффекта химических добавок δ_j

Группы и название химических добавок		Доза в сухом веществе D, % от Ц	$\delta_{0,5}$	δ_1	$\delta_{1,5}$	δ_2	δ_{28}
Ускопяющие	Ускоритель А	2,5-3,5	1,45	1,30	1,30	1,25	0,97
	Ускоритель Б	2,5-3,5	1,75	1,60	1,60	1,50	0,90
	Нитрат натрия	2 - 3	1,55	1,40	1,40	1,30	1,03
	Сульфат натрия	0,7-1,0	1,45	1,32	1,32	1,25	1,03
Суперпластифицирующие	БП - 1	0,5-1,5	1,25	1,45	1,55	1,55	1,15
	Склеромент 10	0,7-0,9	1,20	1,40	1,50	1,50	1,15
	К - 12	0,25-0,5	1,15	1,35	1,45	1,45	1,15
Пластифицирующие	Т - 3	1,6-2,5	1,50	1,65	1,70	1,65	1,20
	БП - 3	1,5-2,0	1,75	1,90	1,95	1,90	1,25
	Лутон К	1,3-1,5	1,30	1,40	1,45	1,40	1,07
	Лутон КН	1,6-2,2	1,30	1,40	1,45	1,40	1,15
	Лукрет Б	1,2-1,7	1,20	1,30	1,35	1,30	1,12
	Лукрет С	1,0-1,5	1,20	1,30	1,35	1,30	1,12
	КК - Т	0,5-1,0	1,40	1,50	1,55	1,50	1,12
	КК - Н	0,5-1,0	1,20	1,27	1,35	1,30	1,10
	Соварол	1,2-2,2	1,40	1,50	1,55	1,50	1,10

в котором отражены соответствующие перемены из предшествующих способов комбинированного варианта. Получаемая выходящая прочность в этом случае $R_{нi}$ будет

$$R_{нi} = R_{я} + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta R_j \quad (12)$$

3. Технико-экономическая эффективность

Эффект при беспарочном ускоренном твердении бетона исследовали отдельно для всех способов твердения и комплексно.

Здесь проводим окончательные результаты для его определения.

Эффект ΔC выражается разницей

$$\Delta C = C_{то} - C_{оп} \geq 0 \quad \text{лв/м}^3 \quad (13)$$

где $C_{оп}$ и $C_{то}$ себестоимости ускоренного твердения бетона соответственно без теплового воздействия и тепловой обработкой, лв/м³

Себестоимости $C_{оп}$ и $C_{то}$ определяются по формулам

$$C_{6п} = \Delta C_{\bar{6}} + \Delta C_{\phi} + C_{то} = 27 Q \quad \text{лв/м}^3, \quad (14)$$

где $\Delta C_{\bar{6}}$ — водорозажи бетона при безпропарочном ускоренном твердении вследствие изменения состава и температуры бетонной смеси, лв/м³;

C_{ϕ} — тоже самое, но вследствие необходимости большего количества опалубочных форм и теплоизоляции, лв/м³;

Q — расход пара при тепловой обработке бетона, т/м³ ($Q=0,25-0,80$).

$C_{\bar{6}}$ и C_{ϕ} вычисляются по формулам

$$C_{\bar{6}} = (T_{в} - t_{ви}) m_{лв} V + \Delta C m_{ц0} + C(m_{ц} - m_{ц0}) + 0,01(C + \Delta C) D m_{д} \quad \text{лв/м}^3, \quad (15)$$

$$\text{и} \quad \Delta C_{\phi} = m_{\phi} (2 n_{\phi} - 1) + M_{п} m_{ти} \quad \text{лв/м}^3, \quad (16)$$

где $m_{ц0}$, $m_{ц}$ и $m_{д}$ — стоимости соответственно обычного (выходящей марки) цемента ($R_{ц} = 35$), высокоактивного и СБТ цемента и химических добавок, лв/т ($m_{ц0} = 39 - 42$; $m_{ц} = 43 - 54$; $m_{д} = 125 - 282$);

$m_{лв}$ — стоимость разогрева воды бетона, лв/(м³·°C) ($m_{лв} = 0,042 - 0,05$);

m_{ϕ} — расход для опалубочных форм при твердении бетона тепловой обработкой, лв/м³ ($m_{\phi} = 2 - 3$);

$m_{ти}$ — расход для теплоизоляции опалубочных форм и бетона, лв/м² ($m_{ти} = 0,03 - 0,04$);

$M_{п}$ — модуль поверхности элемента, м⁻¹;

Z — длительность безпропарочного ускоренного твердения бетона, сутки ($Z = 0,5 - 1,5$);

n_{ϕ} — оборачиваемость опалубочных форм при тепловой обработке бетона, раз/сутки ($n_{\phi} = 1 - 2$);

D — доза химической добавки, % от $(C + \Delta C)$ (табл. 2);

C и ΔC — проектный (выходящий) расход и перерасход цемента, т/м³.

4. Пример для применения метода

Проектировать безпропарочное ускоренное твердение бетона при следующих производственных условиях: производство внутренних стеновых панелей конвейерной технологией; $M_{п} = 14,30 \text{ м}^{-1}$; $R_{до} = 20 \text{ МПа}$; $C = 0,322 \text{ т/м}^3$; $V = 0,198 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $t_{в} = 18^{\circ}\text{C}$; $n_{\phi} = 1,5 \text{ раз/сутки}$; $R_{до} = 12 \text{ МПа}$; $Z = 1 \text{ сутки}$; $Q = 0,33 \text{ т/м}^3$; $m_{ц0} = 41 \text{ лв/т}$; $m_{ц} = 46 \text{ лв/т}$; для СБТЦ марки $R_{ц} = 35$ $m_{ц} = 48 \text{ лв/т}$; $m_{д} = 252$ (добавки БП-1) и $m_{д} = 282$ (добавки БП-3) лв/т; речное валовнятели бетона.

Решение примера представлено в табл. 3

Экономическая эффективность вариантов представлена в табл. 4

Из таблицы 3 и 4 видно, что при всех вариантах выполняются условия

$$R_{т} \geq R_{до} \text{ и } C_{6п} \leq C_{то}.$$

Таблица 3

Варианты и способы безпропарочного твердения	Приняты и вычислены параметры	Результаты
Общие вычисления Вариант А 1. При теплой бетонной смеси 2. При перерасходе цемента 3. При высокоактивном цемента 4. При химической добавке БП-1	$T_{\text{в}} = 80^{\circ}\text{C}; R_{\text{tz}}^{\circ} = 28 \%$ $R_{\text{зи}}^{\circ} = 18 \%; R_{\text{н}} = 3,6 \text{ МПа}$ $\Delta \Pi = 0,032 \text{ т/м}^3; W_1 = 0,56$ $R_{\text{н}} = 5,6 \text{ МПа}$ $R_{\text{ц}} = 45 \text{ МПа}; a = 0,50;$ $W = 0,56; R_{\text{н}} = 6,81 \text{ МПа}$ $\delta_z = 1,45; D=3 \%; R_{\text{н}} = 9 \text{ МПа}$	$t = 16^{\circ}\text{C}; R = 3,6 \text{ МПа}$ $t = 33^{\circ}\text{C}; t_{\text{бн}} = 28^{\circ}\text{C}$ $\Delta R_{\text{т}} = 2 \text{ МПа}$ $\Delta R_{28} = 3,34 \text{ МПа}$ $\Delta R_{\Delta \Pi} = 1,21 \text{ МПа}$ $\Delta R_{28} = 6,44 \text{ МПа}$ $\Delta R_{\text{Ru}} = 2,19 \text{ МПа}$ $\Delta R_{\text{д}} = 4,05 \text{ МПа}$
$R_{\text{т}} = R_{\text{н}} + \sum_1^4 \Delta R_i$		$R_{\text{т}} = 13,05 > R_{\text{до}} = 12 \text{ МПа}$
Вариант В 1. При теплой бетонной смеси 2. При высокоактивном цемента 3. При химической добавке БП-3	$T_{\text{в}} = 80^{\circ}\text{C}; R_{\text{tz}}^{\circ} = 28 \%$ $R_{\text{зи}}^{\circ} = 18 \%; R_{\text{н}} = 3,6 \text{ МПа}$ $R_{\text{ц}} = 45 \text{ МПа}; a = 0,50;$ $W = 0,615; R_{\text{н}} = 5,60 \text{ МПа}$ $\delta_z = 1,9; D=4,5 \%; R_{\text{н}} = 1,78 \text{ МПа}$	$\Delta R_{\text{т}} = 2 \text{ МПа}$ $\Delta R_{28} = 5,63 \text{ МПа}$ $\Delta R_{\text{Ru}} = 1,58 \text{ МПа}$ $\Delta R_{\text{д}} = 6,46 \text{ МПа}$
$R_{\text{т}} = R_{\text{н}} + \sum_1^3 \Delta R_i$		$R_{\text{т}} = 13,64 > R_{\text{до}} = 12 \text{ МПа}$
Вариант С 1. При СВТЦ 2. При перерасходе цемента	$R_{\text{ц}} = 35 \text{ МПа}; R_{\text{зи}}^{\circ} = 45 \%$ $\Delta \Pi = 0,05 \text{ т/м}^3; W_1 = 0,533$ $R_{\text{н}} = 9,0 \text{ МПа}$	$\Delta R_{\text{cu}} = 5,4 \text{ МПа}$ $\Delta R_{28} = 5,27 \text{ МПа}$ $\Delta R_{\Delta \Pi} = 3,07 \text{ МПа}$
$R_{\text{т}} = R_{\text{н}} + \sum_1^2 \Delta R_i$		$R_{\text{т}} = 12,07 > R_{\text{до}} = 12 \text{ МПа}$

Таблица 4

Вариант безпропарочного твердения	Результаты,		Эффективность $\Delta C,$
	лв/м ³		
Вариант А	$C_{\text{то}} = 8,91;$ $\Delta C_{\text{ф}} = 1,97;$	$\Delta C_{\text{б}} = 6,33;$ $C_{\text{бп}} = 8,30$	0,61
Вариант В	$C_{\text{то}} = 8,91;$ $\Delta C_{\text{ф}} = 1,97;$	$\Delta C_{\text{б}} = 5,29;$ $C_{\text{бп}} = 8,26$	0,85
Вариант С	$C_{\text{то}} = 8,91;$ $\Delta C_{\text{ф}} = 1,40;$	$\Delta C_{\text{б}} = 4,66;$ $C_{\text{бп}} = 6,06$	2,85

A DESIGN METHOD OF THE NO - STEAM ACCELERATED CONCRETE CURING

S u m m a r y

High energy consumption of the thermal curing of concrete for its accelerated hardening has directed the present writer to start work on the thermal curing with use of the low energy consuming methods.

It has been assumed that the 24 - 36 h strenght should be high enough for demoulding, depending on the surrounding temperature.

In the paper there are presented comprehensive data for the hardening processes design for: application of hot mixes, increased cement volume, use of extra - rapid - strength cement and cements of high activity, usage of chemical admixtures. At the same time the thermal insulation of hardening concrete is stipulated. Very valuable are conclusions /of general nature and some particular examples/ concerning the technical - economical effectiveness of the no - steam accelerated concrete curing methods.

МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСПРОПАРЧНОГО УСКОРЕННОГО ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

Р е з ю м е

Здесь ставлена вадача на основании технологического анализа и экспериментальных исследований ускоренного твердения бетона без теплового воздействия разработать метод проектирования его при следующих условиях: применения технологических способов беспропарочного ускоренного твердения; получения заданной распалубочной прочности в течение 24 - 36 часов после формования; изменении температуры воздуха в цехах в течение года; осуществлении процесса твердения без вздорования.

Wpłynęło do Redakcji 20.03.1988 r.