

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

MODES OPTIMIZATION OF REINFORCE CONCRETE WARES AND CONSTRUCTIONS TREATMENT WARMLY HUMIDITY

Бибик М.С., к.т.н, директор (ОАО «Завод СЖБ № 1»), **Тулугов И.И.**, к.т.н, вед. инженер (ОАО «Завод СЖБ № 1»), **Бабицкий В.В.**, д.т.н., профессор (Белорусский национальный технический университет), **Семенюк С.Д.**, д.т.н., зав. каф. (Белорусско-Российский университет, Республика Беларусь)

Bibik M.S., candidate of engineerings sciences, director, **Tulupov I.I.**, candidate of engineerings sciences, leading engineer (an open corporation is «Factory of collapsible of reinforce concrete №1»), **Babickiy V.V.**, doctor of technical sciences, professor (Belarusian national technical university), **Semenyuk S.D.**, doctor of technical sciences, professor (Belarusian-Russian University, Mogilev, the Republic of Belarus)

Представлены результаты оптимизации режимов тепловлажностной обработки железобетонных изделий и конструкций, выполненной с использованием математического планирования экспериментов. Получены уравнения регрессии, отражающие влияние основных параметров режима тепловой обработки бетона на его прочность.

Results of optimisation of modes of a thermal treatment of concrete products and the designs, executed with use of mathematical mapping out of experiments are presented. The equations of regress reflecting influence of key parametres of a mode of a thermal treatment of concrete on its durability are received.

Тепловлажностная обработка сборных железобетонных изделий и конструкций на предприятиях стройиндустрии все еще остается одним из наиболее распространенных способов ускорения твердения бетона [1,2]. В последние годы, с появлением и расширением объемов применения современных эффективных химических добавок-ускорителей твердения и комплексов на их основе ее эффективность значительно возросла.

В настоящее время в технологии бетона в основном используется, так называемый, трапецидальный режим тепловлажностной обработки, в состав которого входят периоды предварительного выдерживания, подъема температуры, изотермического прогрева и охлаждения, а график, изображающий такой режим, по очертаниям напоминает трапецию. Данный

режим характеризуется простотой и сравнительно легко поддается автоматизации. При этом именно для этого режима создана информационная база, которая позволяет назначать вышеупомянутые стадии тепловлажностной обработки с учетом проектной и отпускной прочности бетона, толщины изделия, эффективности цемента при пропаривании и т.п..

Обычно инженеры-технологи ориентировочно назначают по имеющимся различным таблицам, собственным данным варианты режимов тепловлажностной обработки бетона с последующей экспериментальной проверкой этих режимов [3,4]. При этом в качестве основного критерия принимается получение заданной прочности бетона, а успех при решении данной задачи предопределяется как правильным подбором состава бетона, так и технически обоснованным установлением основных параметров тепловлажностной обработки. При этом неизбежно обязательным элементом становится экспериментальная проверка назначенного режима, его оптимизация, что требует значительных материальных затрат и времени. В принципе, можно режим и не оптимизировать, а применять уже отработанный на данном конкретном предприятии вне зависимости от свойств поступающего вяжущего и состава бетона, чем зачастую и грешат технологи. Однако такой путь чреват либо снижением прочности после тепловой обработки, либо перерасходом теплоносителя.

В Республике Беларусь в последнее время ведутся достаточно интенсивные работы с целью практически полного устранения дополнительных экспериментов для оптимизации режима тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий и конструкций [5-10]. Целью их является комплексное проектирование как состава бетона, так и режима твердения. Результатом этих работ явилась разработка компьютерной программы, реализующей представленную на рис. 1 схему расчетов. В системе расчетов органично сочетаются технологические и теплотехнические влияющие факторы.

В целом, в ряде случаев компьютерная программа позволяет спроектировать состав бетона и режим тепловой обработки с минимальной суммарной стоимостью, причем получаемая после пропарки прочность бетона соответствует заданному значению. Однако, как известно [11], при тепловых процессах действуют и факторы, не отраженные на рис. 1. В частности, какое, например, влияние оказывает добавка ускорителя твердения на прочность бетона в проектном возрасте? Или как сочетаются количество такой добавки и длительность предварительной выдержки? Эти и многие иные вопросы вряд ли могут быть описаны математически в настоящее время. Поэтому в приведенную схему расчетов следует ввести некие эмпирические коэффициенты, которые могут быть получены только в результате проведения экспериментов.

Для изучения влияния вышеупомянутых факторов и назначения оптимальных режимов тепловлажностной обработки железобетонных

изделий и конструкций, обеспечивающих получение требуемой прочности бетона, на ОАО «Завод сборного железобетона №1» был выполнен комплекс исследований с использованием математического планирования экспериментов. Была поставлена задача выявления оптимальных параметров основных этапов тепловлажностной обработки, а также оптимальных значений водоцементного отношения (В/Ц) бетонных смесей и содержания ускорителя твердения – сульфата натрия (СН).

Для решения данной задачи был поставлен и реализован пятифакторный план второго порядка. В качестве основных факторов были выбраны длительность предварительной выдержки бетона перед пропариванием ($\phi_{пв}$), длительность ($\phi_{ив}$) и температура ($t_{ив}$) изотермической выдержки, а также параметры бетонной смеси – водоцементное отношение и содержание ускорителя твердения СН. Скорость подъема температуры в камере была принята постоянной и составляла 15 °С/ч. Условия опытов для оптимизации режимов тепловлажностной обработки и выбранных параметров бетонной смеси приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия опытов для оптимизации режимов тепловлажностной обработки и выбранных параметров бетонной смеси

Код	Значение кода	Значения факторов				
		x_1 (В/Ц)	x_2 (СН, %)	x_3 ($\phi_{пв}$, ч)	x_4 ($\phi_{ив}$, ч)	x_5 ($t_{ив}$, °С)
Основной уровень	0	0,5	0,5	3	6	60
Интервал варьирования	Дхi	0,1	0,5	3	3	10
Верхний уровень	+	0,6	1	6	9	70
Нижний уровень	-	0,4	0	0	3	50

В экспериментах были использованы следующие материалы:

- в качестве вяжущего – Костюковичский поргланцемент ПЦ 500-Д20 производства Белорусского цементного завода с нормальной плотностью 27%, второй группы активности при пропаривании;
- в качестве крупного заполнителя – щебень гранитный фракции 5-20 мм Микашевичского месторождения производства РУПП «Гранит»;
- в качестве мелкого заполнителя – природный песок карьера «Крапужино» Логойского района Минской области;
- в качестве ускорителя твердения – сульфат натрия (СН).

Для проведения экспериментов были спроектированы составы бетона, приведенные в таблице 2.

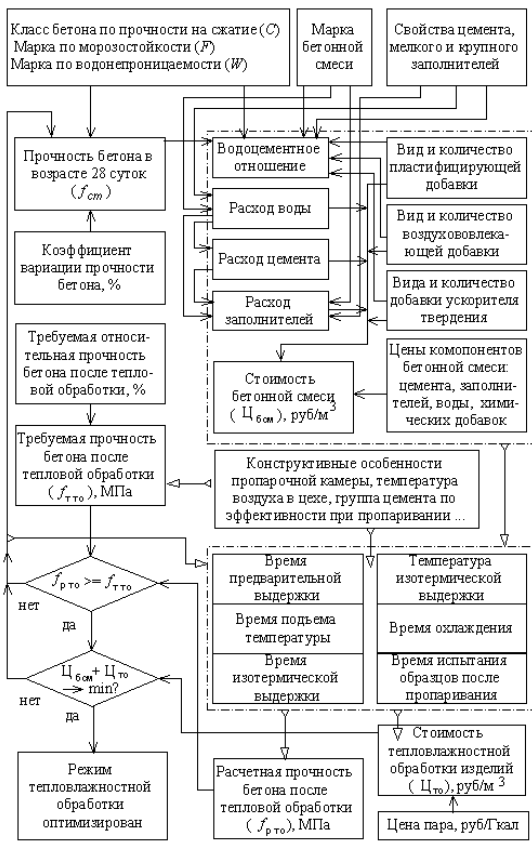


Рис. 1. Схема оптимизации составов и режимов тепловлажностной обработки бетона

Таблица 2
Составы и результаты на сжатие бетона нормально-влажностного твердения в возрасте 28 суток

№ состава	Расход материалов на 1 м³ бетона, кг				В/Ц	Прочность при сжатии бетона нормально-влажностного твердения в возрасте 28 сут., МПа
	цемент	щебень	песок	вода		
1	468	1133	620	188	0,4	48,7
2	364	1171	696	182	0,5	37,2
3	300	1177	742	180	0,6	30,2

Образцы-кубы с размером ребра 100 мм подвергали тепловлажностной обработке в соответствии с планом экспериментов в лабораторной пропарочной камере с автоматическим регулированием и испытывали на

сжатие через 4 часа и 28 суток после пропаривания. В таблице 3 представлены матрица планирования и результаты экспериментов.

Таблица 3

Матрица планирования (в натуральных значениях) и результаты экспериментов в задаче оптимизации режимов тепловлажностной обработки бетона с ускорителем твердения СН

№ опы- та	План в значениях					Результаты опытов	
	x_1 (В/Ц)	x_2 (СН, %)	x_3 ($\phi_{пв}$, ч)	x_4 ($\phi_{ив}$, ч)	x_5 ($t_{пв}$, °С)	$f_{4ч}$, МПа	$f_{28с}$, МПа
1	0,6	1	6	10	70	31,9	29,8
2	0,4	1	6	10	50	35,7	35,9
3	0,6	0	6	10	50	15,4	35,2
4	0,4	0	6	10	70	35,9	42,0
5	0,6	1	0	10	50	15,2	17,4
6	0,4	1	0	9	70	43,1	42,9
7	0,6	0	0	9	70	16,8	31,0
8	0,4	0	0	9	50	21,2	30,5
9	0,6	1	6	3	50	13,9	23,6
10	0,4	1	6	3	70	38,0	50,4
11	0,6	0	6	3	70	12,4	38,7
12	0,4	0	6	3	50	15,8	35,8
13	0,6	1	0	3	70	14,4	23,8
14	0,4	1	0	3	50	20,7	34,1
15	0,6	0	0	3	50	18,7	42,5
16	0,4	0	0	3	70	19,1	39,1
17	0,6	0,5	3	6	60	20,4	31,1
18	0,4	0,5	3	6	60	31,8	39,7
19	0,5	1	3	6	60	29,4	33,3
20	0,5	0	3	6	60	22,2	37,9
21	0,5	0,5	6	6	60	27,5	37,3
22	0,5	0,5	0	6	60	23,7	33,6
23	0,5	0,5	3	9	60	30,3	34,1
24	0,5	0,5	3	3	60	22,6	37,0
25	0,5	0,5	3	6	70	29,7	38,1
26	0,5	0,5	3	6	50	22,8	32,7
27	0,5	0,5	3	6	60	26,2	36,9
28	0,5	0,5	3	6	60	24,7	37,4
29	0,5	0,5	3	6	60	24,9	32,8
30	0,5	0,5	3	6	60	25,1	33,8
31	0,5	0,5	3	6	60	26,9	35,2
32	0,5	0,5	3	6	60	23,2	36,1

Функциональная связь между прочностью бетона, установленной через 4 часа после тепловлажностной обработки ($f_{4ч}$) и в возрасте 28 суток после нее ($f_{28с}$) и независимыми переменными факторами может быть математически описана следующими зависимостями:

$$f_{4ч}(f_{28с}) = \Phi(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5), \text{ МПа} \quad (1)$$

или в натуральных значениях факторов:

$$f_{4ч}(f_{28с}) = \Phi\left(\frac{B}{C}, CH, \tau_{ПВ}, t_{ПВ}, \tau_{ИВ}\right), \text{ МПа} \quad (2)$$

После обработки результатов экспериментов были получены адекватные полиномиальные математические модели второго порядка, описывающие изменение кубиковой прочности пропаренных образцов бетона в зависимости от принятых переменных факторов. Полученные модели после исключения незначимых коэффициентов записываются в виде следующих уравнений регрессии:

- для прочности через 4 часа после тепловлажностной обработки:

$$\begin{aligned} f_{4ч} = & 26,08 - 5,66 \cdot x_1 + 3,60 \cdot x_2 + 1,88 \cdot x_3 + 3,89 \cdot x_4 + \\ & + 3,44 \cdot x_5 - 0,44 \cdot x_1^2 - 0,73 \cdot x_2^2 - 0,95 \cdot x_3^2 - 0,10 \cdot x_4^2 - \\ & - 0,31 \cdot x_5^2 - 2,10 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,40 \cdot x_1 \cdot x_4 - 1,90 \cdot x_1 \cdot x_5 + \\ & + 1,40 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,98 \cdot x_2 \cdot x_4 + 1,80 \cdot x_2 \cdot x_5 + \\ & + 0,96 \cdot x_3 \cdot x_4 + 1,23 \cdot x_3 \cdot x_5 + 1,58 \cdot x_4 \cdot x_5 \end{aligned}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

- а для прочности через 28 суток после тепловлажностной обработки:

$$\begin{aligned} f_{28с} = & 35,65 - 4,30 \cdot x_1 - 2,30 \cdot x_2 + 1,88 \cdot x_3 - 1,45 \cdot x_4 + \\ & + 2,67 \cdot x_5 - 0,19 \cdot x_1^2 + 0,05 \cdot x_2^2 - 0,10 \cdot x_3^2 - 0,17 \cdot x_5^2 - \\ & - 4,30 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2,10 \cdot x_1 \cdot x_5 + 1,80 \cdot x_2 \cdot x_5 \end{aligned}, \text{ МПа} \quad (4)$$

Результаты выполненных расчетов и проверка статистической значимости по полученным математическим моделям (3) и (4) подтвердили, что полученные уравнения регрессии пригодны для описания этих моделей (таблица 4).

Таблица 4

Проверка пригодности уравнений (3) и (4)

Параметры	Модель (3)	Модель (4)
Число значимых коэффициентов	15	9
Число степеней свободы в нулевой точке	5	5
Число степеней свободы для уравнения	12	18
Дисперсия в нулевой точке	1,647	3,219
Дисперсия адекватности	1,670	1,350
Расчетное значение критерия Фишера (F_p)	1,014	2,383
Табличное значение критерия Фишера (F_T)	4,678	4,578

Полученные полиномиальные математические модели описывают связь прочности при сжатии бетонов без добавки ускорителя твердения СН и с этой добавкой в зависимости от основных параметров процесса тепловлажностной обработки. Уравнения (3) и (4) с определенной степенью точности могут быть использованы для получения пропаренного бетона с комплексом заданных свойств. Задавая конкретным численным значением переменных факторов и используя эти модели, можно априори оценить его основные физико-механические свойства. Это существенно облегчает выбор необходимого режима тепловлажностной обработки при производстве сборных железобетонных изделий и конструкций.

При этом взаимное влияние различных факторов достаточно интересно и может быть основой для получения эмпирических коэффициентов - примеры приведены на рис. 2 и рис. 3 (остальные факторы представлены на основном уровне).

Интерпретация полученных моделей по знакам и значениям коэффициентов регрессии позволяет сделать следующие технологические выводы:

- например, из модели (3) следует, что увеличение длительности периода предварительной выдержки, а также длительности и температуры изотермического прогрева способствует повышению прочности бетона в возрасте четырех часов после пропаривания; увеличение водоцементного отношения закономерно приводит к снижению прочности бетона; при одновременном его увеличении с увеличением содержания добавки СН влияние водоцементного отношения превалирует над влиянием ускорителя твердения и проявляется также в снижении прочности бетона, о чем свидетельствует знак «минус» у эффекта взаимодействия факторов $x_1 \cdot x_2$; аналогичное снижение прочности бетона наблюдается у эффекта взаимодействия факторов $x_1 \cdot x_5$, при котором даже повышение температуры изотермического прогрева не компенсирует негативное влияния повышения водоцементного отношения и т.д.

- из модели (4) видно, что увеличению прочности бетона в возрасте 28 суток после тепловлажностной обработки способствует, как и в первом случае, увеличение длительности предварительной выдержки бетона перед пропариванием и температуры изотермического прогрева, а также взаимодействие факторов x_2x_5 , т.е. повышения температуры изотермического прогрева одновременно с увеличением содержания ускорителя твердения СН; снижение же прочности, главным образом, обуславливается увеличением водоцементного отношения.

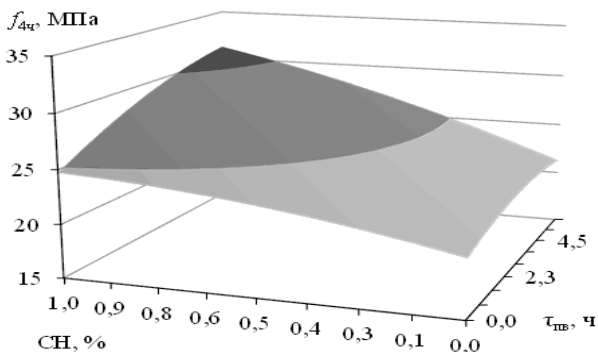


Рис. 2. Влияние расхода добавки ускорителя твердения (СН, % от массы цемента) и длительность предварительной выдержки бетона перед пропариванием ($\tau_{пв}$, ч) на прочность бетона через 4 часа после пропаривания

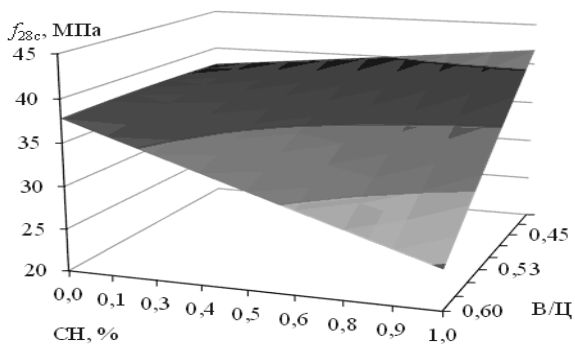


Рис. 3. Влияние расхода добавки ускорителя твердения (СН, % от массы цемента) и водоцементного отношения бетонной смеси на прочность бетона через 28 суток после пропаривания

Анализ полученных математических моделей и результатов экспериментов показывает, что, в зависимости от режимов тепловлажностной обработки конечная прочность бетона постоянного состава может колебаться в широких пределах при влиянии взаимосвязанных факторов. И это реализовано нами при получении влияющих эмпирических коэффициентов. Следовательно, для получения бетона с заданной структурой и свойствами в каждом конкретном случае нет необходимости экспериментально подбирать параметры тепловлажностной обработки, при которой достигается минимальная стоимость бетонной смеси и теплоносителя при получении заданной прочности.

Таким образом, анализ активного эксперимента, интерпретация полученных адекватных полиномиальных моделей (3) и (4) и проведение дополнительных экспериментов позволили уточнить схему оптимизации расчетов составов бетона и режимов тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

1. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1977. – 160 с.
2. Миронов С.А., Френкель И.М., Малинина Л.А. и др. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении. – М.: Стройиздат, 1973. – 96 с.
3. Справочник по производству сборных железобетонных изделий / Г.И. Бердичевский, А.П. Васильев, Ф.М. Иванов и др. – М.: Стройиздат, 1982. – 440 с.
4. ТКП 45-5.03-13-2005. Изделия бетонные и железобетонные сборные. Правила тепловлажностной обработки. – Минск: Стройтехнорм Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2006. – 59 с.
5. Блещик Н.П., Бабицкий В.В., Дрозд А.А., Щербицкая Е.В. Проектирование состава бетона и режимов тепловой обработки железобетонных конструкций // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3(6). – с. 37-42.
6. Бабицкий В.В., Суходоева Н.В. Элементы проектирования режима тепловлажностной обработки бетона // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Сб. трудов XV Международного научно-методического семинара. – Новополоцк, 2008. – С. 139-143.
7. Суходоева Н.В., Бибик М.С., Бабицкий В.В., Оптимизация режимов тепловлажностной обработки тяжелого бетона // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Сб. трудов XVI Международного научно-методического семинара. – Брест, 2009. – С. 67-71.
8. Бибик М.С., Суходоева Н.В., Бабицкий В.В. К возможности проектирования режима тепловой обработки бетона в ямных пропарочных камерах // Строительная наука и техника. – 2009. – №2(23). – с. 58-63.
9. Бибик М.С., Бабицкий В.В., Семенюк С.Д. Определение основных периодов трапецеидального режима тепловлажностной обработки бетона // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 22. – Рівне, 2011. – с. 22-28.
10. Бибик М.С., Бабицкий В.В., Семенюк С.Д. Расчет характеристик бетона, твердеющего при тепловлажностной обработке изделий в камерах циклического действия // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 22. – Рівне, 2011. – с. 29-36.
11. Марцинкевич, В.Л. Энергосберегающая технология ускоренного твердения бетона/ В.Л. Марцинкевич. - Минск. – «Навука і тэхніка», 1990. – С. 24-26.