

Н.П. Блещик, *канд.техн.наук*  
(ИСиА Госстроя БССР)

Б.А. Крылов, *д-р техн.наук*  
(НИИЖБ)

В.М. Солдаткин, *ст. инж.*  
(ИСиА Госстроя БССР)

## ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АГЛОПОРИТОБЕТОНА, ТЕРМООБРАБОТАННОГО В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СРЕДЕ

Эксперименты проводились на образцах-кубах с ребром 0,15 м из аглопоритобетона М200 и М300 жесткостью 20–30с следующих составов: М200 – Ц:П:Щ = 1:2,28:1,71; В/Ц=0,71, М300 – Ц:П:Щ=1:2,2:2,24; В/Ц= 0,625. Для приготовления аглопоритобетона М200 использовался аглопоритовый песок Минского завода строительных материалов. Образцы прогревались в камере с теплоизлучающими поверхностями. Контроль за процессом термообработки велся по температуре среды. Для моделирования условий разогрева плоской плиты боковая поверхность форм теплоизолировалась слоем минеральной ваты толщиной 60 мм. Образцы предварительно выдерживались во всех опытах 1,5 ч. Испытывались они через 8 ч после окончания термообработки и в 28-суточном возрасте.

Для изучения влияния различных факторов на прочность термообработанного бетона был применен метод математического планирования эксперимента [1]. Для чего использовалась 1/8 реплика полного факторного плана первого порядка типа  $2^6$ . В качестве варьируемых факторов были выбраны: продолжительность подъема температуры среды  $X_1$ , изотермической выдержки  $X_2$  и охлаждения  $X_3$ , температура среды камеры  $X_4$ , наличие добавки ускорителя твердения  $\text{CaCl}_2$  (1% от веса цемента для М300 и 1,5% для М200).  $X_5$ , наличие укрытия  $X_6$  (металлический лист для бетона М300 и лак этиноль для бетона М200).

В качестве параметра оптимизации  $Y_1$  выбрана прочность на сжатие аглопоритобетона в 28-суточном возрасте, а в качестве ограничения  $Y_2$  – прочность на сжатие после тепловой обработки.

Каждый из факторов варьировался на двух уровнях: верхнем и нижнем, – закодированных в матрице планирования знаками плюс (+) и минус (-). Каждая строка матрицы определяет условия проведения опыта.

Основной уровень, интервалы варьирования факторов, матрица планирования и результаты экспериментов приведены в табл. 1,2.

После обработки результатов экспериментов были получены следующие уравнения регрессии:

$$M200 \hat{Y}_1 = 21,5 + 2,3X_1;$$

$$\hat{Y}_2 = 13,3 + 1,48X_1 + 0,94X_2 + 1,3X_3 + 1,29X_4 + 0,8X_6;$$

$$M300 \hat{Y}_1 = 26,5 - 2,25X_1 - 1,65X_2 - 1,824X_4;$$

$$\hat{Y}_2 = 18,23 + 1,63X_2 + 1,2X_3.$$

Для определения области оптимума был реализован ряд опытов крутого восхождения. Для этого определялся градиент функции отклика в точке эксперимента, соответствующей нулевым значениям значимых факторов уравнения регрессии.

Расчет составляющих градиента, шага движения и результатов опытов приведены в табл. 1 и 2.

Наилучшие результаты при движении по градиенту были получены в опытах 11 и 12 – для аглопоритобетона М200 и в опытах 10 и 11 – для М300, которые приняты за оптимальные.

Абсолютные значения величин коэффициентов регрессии указывают на степень влияния каждого фактора на исследуемый процесс. Таким образом, по степени влияния на рост прочности аглопоритобетона М200 в процессе его высокотемпературного прогрева все факторы располагаются в приведенной ниже последовательности:

$X_0, X_1, X_2, X_3, X_4, X_6, X_5$  и по степени влияния на 28-дневную прочность  $X_0, X_1, X_6, X_4, X_5, X_3, X_2$ , а для аглопоритобетона М300  $X_0, X_3, X_6, X_1, X_4, X_5$  и  $X_0, X_1, X_4, X_2, X_5, X_6, X_3$  соответственно.

Существенно влияют на изменение прочности бетона только те факторы, которые оказались значимыми, а именно:  $X_1, X_0, X_1, X_2, X_3, X_4, X_6$  и  $X_0, X_1, X_2, X_4$ , а также  $X_0, X_2, X_3$  соответственно для бетона М200 и М300 при определении величин  $Y_1$  и  $Y_2$ .

Незначимость факторов свидетельствует о том, что управление процессом тепловой обработки бетона путем изменения их значения в исследуемых пределах неэффективно.

Анализ приведенных уравнений регрессии для 28-суточной прочности показывает, что три фактора  $X_3, X_5$  и  $X_6$  (продолжительность охлаждения, наличие добавки ускорителя твердения и наличие укрытия) оказались незначимыми для обеих марок. Это говорит о том, что эти факторы не влияют на изменение 28-дневной прочности независимо от марки бетона.

Неэффективность применения ускорителя твердения  $CaCl_2$  можно объяснить усиленным его связыванием при повышенных температурах, а применения в качестве укрытия металлического листа и лака этиноль – неплотностью их прилегания к поверхности бетона, плохим сцеплением с ней из-за появления между ними цементного молока при виброуплотнении.

Т а б л и ц а 1. Матрица планирования аглопоритобетона М300

Уровень	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>
Основной (0)	2	4	2	130	—	—
Интервал варьирования	1	2	1	20	—	—
Верхний (+1)	3	6	3	150	с до- бавкой	с укры- тием
Нижний (-1)	1	2	1	110	без до- бавки	без ук- рытия

Опыты	Кодированные значения факторов						Y <sub>1</sub> , МПа	Y <sub>2</sub> , МПа
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>		

1	-	-	-	-	+	+	30,6	13,5
2	+	+	-	-	+	-	26,4	21,0
3	-	-	+	+	+	-	32,4	18,9
4	+	-	+	-	-	+	27,3	19,0
5	-	+	+	-	-	-	29,0	20,0
6	+	-	-	+	-	-	22,3	15,0
7	-	+	-	+	-	+	23,0	18,6
8	+	+	+	+	+	+	21,0	19,8

b <sub>j</sub>	-2,25	-1,65	0,925	1,825	1,1	-1,025		
----------------	-------	-------	-------	-------	-----	--------	--	--

b <sub>j</sub> I <sub>j</sub>	-2,25	-3,3	0,925	-36,5	-	-		
-------------------------------	-------	------	-------	-------	---	---	--	--

Шаг при измене- нии X <sub>4</sub> на 5 <sup>0</sup> С	-19мин	-27мин	-	5 <sup>0</sup>	-	-		
---	--------	--------	---	----------------	---	---	--	--

Округле- ние	-20мин	-30мин	-	5 <sup>0</sup>	-	-		
-----------------	--------	--------	---	----------------	---	---	--	--

Опыты								
9	100	210	120	125	-	-	27,4	18,6
10	80	18	120	120	-	-	32,7	19,6
11	60	150	120	115	-	-	31,1	18,5
12	40	120	120	110	-	-	30,0	17,4
13	20	90	120	105	-	-	28,9	13,5

Т а б л и ц а 2. Матрица планирования аглопоритобетона М200

Уровень	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$		
Основной (0)	1,5	3	2	130	—	—		
Интервал варьирования	0,5	1	1	20	—	—		
Верхний (+1)	2	4	3	150	с до- бавкой	с укры- тием		
Нижний (-1)	1	2	1	110	без до- бавки	без укры- тия		

  

Опыты	Кодированные значения факторов						$Y_1$ , МПа	$Y_2$ , МПа
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$		
1	—	—	—	—	+	+	20,85	9,6
2	+	+	—	—	+	—	23,7	12,0
3	—	—	+	+	+	—	18,6	12,3
4	+	—	+	—	—	+	24,75	14,2
5	—	+	+	+	—	—	19,05	12,4
6	+	—	—	+	—	—	22,1	13,5
7	—	+	—	+	—	+	16,25	13,1
8	+	+	+	+	+	+	24,65	19,6
$b_j$	2,3	- 0,081	0,268	- 0,594	0,456	0,631		
$b_j I_j$	1,15	- 0,081	0,268	11,88	—	—		
Шаг	15мин		--	--	--	--		
9	105	180	120	130	—	—	22,7	15,0
10	120	180	120	130	—	—	23,5	15,3
11	135	180	120	130	—	—	24,7	16,4
12	150	180	120	130	—	—	25,3	18,7
13	165	180	120	130	—	—	23,4	19,1

Однако для прочности бетона после тепловой обработки фактор  $X_3$  оказался значимым в обоих случаях. Это объясняется тем, что прочность бетона после тепловой обработки в значительной степени зависит от времени теплового воздействия на бетон: чем оно больше, тем больше прочность, так как при этом сильно ускоряются химические реакции цемента с водой и образование кристаллического сростка. Для 28-суточной прочности бетона это влияние выражается в том, что при охлаждении наименьшим образом нарушалась его структура от возникающих при этом температурно-усадочных

напряжений. К концу изотермического прогрева бетон успевает набрать значительную прочность, которая намного превосходит термовлажностные напряжения. Кроме того, скорость охлаждения бетона невелика и составляет  $5-10^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  для всех случаев охлаждения, поэтому влияние фактора  $X_3$  для 28-суточной прочности бетона незначительно.

Интересно, что знак фактора  $X_1$  для математической модели 28-суточной прочности аглопоритобетона М200 оказался положительным знаком этого же фактора для аглопоритобетона М300. Такое различие может быть объяснено сужением интервалов варьирования по этому фактору для аглопоритобетона М200, а также отличием его структуры. Это отличие заключается в наличии мелкого пористого заполнителя — аглопоритового песка, из-за которого уменьшается коэффициент теплопроводности бетона, что в свою очередь приводит к большим температурным перепадам, а также к увеличению объема воздуха, содержащегося в бетоне. Воздух при прогреве стремится расширяться, при этом возникают внутренние давления и раздвижка составляющих бетона.

Интересен тот факт, что прочность бетонов, прогретых по оптимальным режимам, оказалась равной прочности образцов нормального твердения. Это объясняется тем, что при испарении влаги из бетона происходит ее перемещение из глубинных слоев к поверхности. Перемещающаяся влага представляет собой раствор минералов цемента, и при ее испарении выпадает осадок, колюматизирующий поры. Здесь также играет определенную роль коэффициент размягчения цементного камня и легкого заполнителя, который равен 0,8.

## Л и т е р а т у р а

1. А д л е р Ю.П., М а р к о в а Е.В., Г р а н о в с к и й Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М., 1976. — 275 с.

УДК 666.97.035

В.М. Солдаткин, *ст. инж.*  
(ИСиА Госстроя БССР)

### ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА И СКОРОСТИ РАЗОГРЕВА ЛЕГКОГО БЕТОНА ПРИ ЕГО ПРОГРЕВЕ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СРЕДЕ С ПОНИЖЕННОЙ ВЛАЖНОСТЬЮ

Исследования проводились на аглопоритобетоне М200 и М300 таких составов: Ц:П:Щ=1:2,28:1,71.  $\frac{B}{C}=0,71$  и Ц:П:Щ=1:2,2:2,4  $\frac{B}{C}=0,625$ .

Для приготовления аглопоритобетона использовался портландцемент М500 Волковыского цементного завода с  $H_T = 27,5\%$  и для М200-аглопори-