

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТА

В предыдущих работах нами были представлены зависимости, в комплексе образующие некую математическую модель, позволяющую на стадии проектирования состава рассчитывать основные характеристики бетона: прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, устойчивость к агрессивным воздействиям. В основе модели лежит представление о решающем влиянии изменяющейся во времени структуры цементного камня, прямым образом зависящей от степени гидратации цемента, на свойства бетона. Таким образом, прогнозируя степень гидратации цемента, можно прогнозировать и параметры бетона на различных стадиях его твердения.

Получена система зависимостей для расчета степени гидратации цемента, твердеющего при температуре от 0 до 30 °С. Как оказалось, в аналитических выражениях удобно оперировать предложенным Ахвердовым И.Н. понятием относительного водосодержания цементного теста X

$$X = \frac{(B/C)_m}{\frac{HG}{100}} \quad (1)$$

где: $(B/C)_m$ — водоцементное отношение цементного теста;
 HG — нормальная плотность цемента, %.

Для цементного теста, твердеющего в течение 28 суток при температуре 20 °С, получена зависимость для расчета степени гидратации цемента α_{28}^{20} , причем характер зависимости зависит от численного значения X :

Так, при $X \leq 1,65$

$$\alpha_{28}^{20} = 60 \cdot X - (1,65 \cdot X)^{0,67} \cdot \exp(1,65 \cdot X), \% \quad (2)$$

А при $X > 1,65$

$$\alpha_{28}^{20} = 70 + 5 \cdot (X - 1,65) \cdot \% \quad (3)$$

Зная величину α_{28}^{20} , можно, используя поправочный коэффициент ζ , перейти к степени гидратации цемента в возрасте 28 суток при любой температуре: α_{28}^t

$$\alpha_{28}^t = \alpha_{28}^{20} \cdot \zeta, \% \quad (4)$$

Коэффициент ζ можно рассчитать по

$$\zeta = 1,02 - 0,00015 \cdot \exp(0,3 \cdot X) \cdot (30 - t)^2 \quad (5)$$

где t — температура твердения, °С.

В промежуточном возрасте (до 28 суток) степень гидратации цемента зависит от достаточно широкой гаммы влияющих факторов, в первую очередь времени и температуры.

По аналогии с [1] получена зависимость для расчета относительной степени гидратации (в долях единицы) $\alpha_{отн}$, причем степень гидратации цемента в возрасте 28 суток при каждой определенной температуре принимается равной единице.

$$\alpha_{\text{отн}} = \frac{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot \tau \cdot k_t \cdot k_w \cdot k_M) - (1 - \frac{C_3S}{100}) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \tau \cdot k_t \cdot k_w)}{1 - \frac{C_3S}{100} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot 28 \cdot k_t \cdot k_w \cdot k_M) - (1 - \frac{C_3S}{100}) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot 28 \cdot k_t \cdot k_w)}, \quad (6)$$

где: τ — время твердения, сутки;

$\beta_1, \beta_2, k_t, k_w, k_M$ — коэффициенты.

В (4) и последующих выражениях содержание основных минералов цемента (C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF) дано в %.

Коэффициент β_1 для портландцемента может быть принят равным единице. β_2 может быть рассчитан по

$$\beta_2 = 1,25 \cdot \frac{C_3A}{100} + 0,05. \quad (7)$$

Коэффициент k_t зависит от температуры твердения бетона

$$k_t = (0,6 + 0,02 \cdot t)^2. \quad (8)$$

Коэффициент k_w зависит от относительного водосодержания цементного теста.

$$k_w = \frac{0,876}{X} + 0,5. \quad (9)$$

А величина коэффициента k_M определяется маркой цемента M_u

$$k_M = 1 + \frac{M_u - 400}{1700}. \quad (10)$$

И, наконец, величина степени гидратации цемента в любом возрасте и при любой температуре α_t^t может быть получена как

$$\alpha_t^t = \alpha_{28}^{28} \cdot \alpha_{\text{отн}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

Для оценки кинетики изменения прочности бетона предлагается выражение

$$R_b = \frac{0,3 \cdot k_3 \cdot R_u}{(B/L)_b - 0,1} \cdot \left(\frac{\alpha_t^t}{\alpha_{28}^{20}} \right)^2, \text{ МПа}, \quad (12)$$

где: R_u — активность цемента, МПа;

k_3 — коэффициент, зависящий от свойств и вида заполнителей (для чистого гранитного щебня равен 1);

$(B/L)_b$ — водоцементное отношение бетонной смеси;

В возрасте 28 суток для бетона, твердеющего при температуре 20 °С, (12) приводится к

$$R_b = \frac{0,3 \cdot k_3 \cdot R_u}{(B/L)_b - 0,1}, \text{ МПа}. \quad (13)$$

Попытаемся увязать степень гидратации цемента с таким противоречивым и трудным в определении параметром, характеризующим твердеющий бетон, как его тепловыделение. В литературе есть множество рекомендаций по назначению удельного тепловыделения цемента, которое связывают с видом и активностью цемента, водоцементным отношением бетонной смеси, видом и количеством вводимых химических добавок и множеством иных факторов. На наш взгляд, все значительно упрощается, если связать тепловыделение цемента с ясным, имеющим физический смысл параметром, — со степенью гидратации цемента.

В [2] приведены многочисленные данные по тепловыделению цемента нормальной густоты различного минералогического состава. Эти данные ценны тем, что параллельно определялось количество химически связанной воды. В результате

обработки приведенных результатов (в возрасте 28 суток твердения) применительно к возможной степени гидратации цемента, определяемой по (2), получено выражение для расчета удельного тепловыделения цемента q_0 , приходящегося на 1% гидратации цемента

$$q_0 = 0,7691 \cdot C_3S + 0,3631 \cdot C_2S + 0,3352 \cdot C_3A + 0,65 \cdot C_4AF, \text{ ккал/(кг \%)} \quad (14)$$

Тогда удельное тепловыделение цемента при любой степени гидратации цемента может быть рассчитано как

$$q_a = a_0 \cdot \alpha_r^t, \text{ ккал/кг} \quad (15)$$

Для примера рассчитаем степень гидратации и удельное тепловыделение цемента марок 400 и 500 (принято $C_3S = 56\%$, $C_2S = 21\%$, $C_3A = 4\%$ и $C_4AF = 15\%$). Результаты приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Степень гидратации (в %) и удельное тепловыделение цемента (в кДж/кг) тяжелого бетона марки 250, приготовленного на портландцементе марки 400

τ, сутки	Средняя температура воздуха, °C									
	0		5		10		20		30	
	α_r^t	q_a	α_r^t	q_a	α_r^t	q_a	α_r^t	q_a	α_r^t	q_a
2	22	54	28	69	34	84	45	109	52	126
3	28	70	35	87	41	102	50	125	56	139
5	37	91	43	107	49	120	57	141	62	154
7	42	104	48	118	53	130	59	150	65	162
14	49	123	55	136	59	148	67	165	70	174
28	56	138	61	150	64	159	70	172	71	177

Таблица 2.

Степень гидратации (в %) и удельное тепловыделение цемента (в кДж/кг) тяжелого бетона марки 450, приготовленного на портландцементе марки 500

τ, сутки	Средняя температура воздуха, °C									
	0		5		10		20		30	
	α_r^t	q_a	α_r^t	q_a	α_r^t	q_a	α_r^t	q_a	α_r^t	q_a
1	14	34	18	44	22	55	31	77	38	93
2	22	55	28	69	33	82	42	104	47	117
3	29	71	34	85	39	97	47	116	52	127
5	36	88	41	101	45	111	52	128	56	139
7	39	99	44	109	48	119	55	136	59	146
14	46	113	50	124	54	134	60	148	62	154
28	51	126	55	135	58	143	62	152	63	156

Сопоставим полученные результаты (в части удельного тепловыделения) с данными [3], приведенными в таблицах 3 и 4.

Естественно, о полном соответствии результатов речь не идет, поскольку данные в таблицах 3 и 4 не привязаны к конкретному бетону, но тенденции и порядок изменения удельного тепловыделения цемента имеют место.

Оценим также и кинетику изменения прочности бетона. В таблицах 5 и 6 представлены данные, полученные из [4] — $R_{фr}$, а также результаты расчета по выражению (12) — R_p .

Таблица 3. Тепло (ккал/кг) и тепловыделение (кДж/кг) портландцемента марки 400, кДж/кг

Время твердения, сутки	Температура, °С			
	5	10	20	40
1	29	50	105	188
2	63	105	167	230
3	109	146	209	272
7	188	209	272	314
14	209	251	314	335
28	251	293	335	

Таблица 4. Тепловыделение портландцемента марок 500 и 600, кДж/кг

Время твердения, сутки	Температура, °С			
	5	10	20	40
1	42	63	125	209
2	165	1105	188	272
3	89	167	251	293
7	188	251	292	356
14	230	293	335	377
28	272	314	377	

Таблица 5. Относительная прочность тяжелого бетона (в %), марок 200..300, приготовленного на портландцементе марок 400..500

τ , сутки	Средняя температура воздуха, °С									
	0		5		10		20		30	
	R_{ϕ}	R_p	R_{ϕ}	R_p	R_{ϕ}	R_p	R_{ϕ}	R_p	R_{ϕ}	R_p
1	4	3	9	6	14	10	20	20	30	31
2	10	10	19	16	25	23	40	40	55	53
3	18	16	27	25	37	34	50	52	65	65
5	28	28	38	38	50	48	65	66	80	79
7	35	36	48	46	58	56	70	75	90	88
14	50	50	62	61	72	73	90	91	100	101
28	65	64	77	75	85	85	100	99	102	104
$V_R, \%$	3,60		5,68		5,16		3,71		2,12	

Таблица 6. Относительная прочность тяжелого бетона марок 400..500, приготовленного на портландцементе марок 500..600

τ , сутки	Средняя температура воздуха, °С									
	0		5		10		20		30	
	R_{ϕ}	R_p	R_{ϕ}	R_p	R_{ϕ}	R_p	R_{ϕ}	R_p	R_{ϕ}	R_p
1	7	5	12	8	15	13	30	25	40	37
2	15	13	20	21	30	29	45	46	60	58
3	20	21	30	31	40	40	55	57	70	69
5	30	33	40	43	55	53	70	71	80	83
7	37	41	50	51	65	61	80	79	90	91
14	50	55	70	66	83	76	98	94	100	102
28	70	68	80	78	95	87	100	100	102	104
$V_R, \%$	9,90		6,55		8,76		4,14		2,98	

Достаточно низкие значения коэффициента вариации V_R показывают приемлемость полученной математической модели, описывающей кинетику гидратации цемента.

В перспективе, на наш взгляд, полученную модель необходимо дополнить влиянием различных химических добавок, в первую очередь ускорителей твердения, а температурный диапазон расширить до $+50..+60$ °С. Кроме того, следует предусмотреть возможность разбиения всего процесса твердения на этапы, характеризующиеся различной температурой и продолжительностью, что существенно повысит достоверность расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабицкий В.В. Оценка кинетики твердения бетона. Эффективные строительные материалы, конструкции и технологии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции./ Под ред. Блещика Н.П. - Мн., «Технопринт»Б 2000. - 609 с.
2. Запорожец И.Д., Огороков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона - Л.: Стройиздат, 1966. - 316 с.
3. Бетонные и железобетонные работы/ К.И.Башлай, В.Я.Гендин, Н.И.Евдокимов и др.; Под ред. В.Д.Топчия. - 2-е изд., перераб. И доп. - М.: Стройиздат, 1987. - 320 с.
4. Справочник по производству сборных железобетонных изделий/ Бердический Г.И., Васильев А.П., Иванов Ф.М. и др.; Под ред. Михайлова К.В., Фоломеева А.А. - М.: Стройиздат, 1982. - 440 с.

УДК 624.012.46:666.972.16

Блещик Н.П., Мазуренок Г.В., Щербицкая Е.В.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО – МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОННОЙ СМЕСИ НА ЕЕ ЖЕСТКОСТЬ

Большинство известных расчетно–экспериментальных методик проектирования состава бетона, как правило, учитывают влияние состава и физико–механических свойств исходных материалов – нормальной плотности цементного теста, крупности и пустотности заполнителей, соотношения их масс, расхода цемента и др. – на технологические свойства бетона поправочными коэффициентами, которые в связи с дискретным и эмпирическим характером не всегда адекватно отражают взаимосвязь структурно – механических и технологических свойств бетонной смеси.

В связи с появившимися возможностями компьютерного проектирования состава бетона исходя из многофакторных математических моделей возникла необходимость получения таких моделей, наиболее полно учитывающих свойства исходных материалов и состава бетонной смеси на ее качественные характеристики и механические свойства бетона.

В [1] была предпринята попытка разработать рекомендации по определению составов обычного и пластифицированного бетонов с учетом указанных факторов. По разработанным рекомендациям проектирование состава осуществляется путем совместного решения уравнений удобоукладываемости (подвижности или жесткости) бетонной смеси и прочности бетона, из которого находится рациональное соот-