

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-

ношение исходных материалов, обеспечивающих наименьший расход цемента при заданной отпускной или передаточной и проектной прочностях бетона, удобоукладываемости бетонной смеси, вида химических добавок, режимов тепловой обработки.

Рекомендации были разработаны на основе структурно-механических зависимостей, представленных в работе [3].

Накопленный опыт практического использования расчетной методики проектирования состава бетона выявил необходимость уточнения ее отдельных положений, в том числе и математической модели жесткости бетонной смеси. Необходимость получения уточненной модели обусловлена также промышленным внедрением беспрогревной и малоэнергоёмкой технологий производства предварительно напряженных железобетонных конструкций, которые основываются на снижении водоцементного отношения за счет применения эффективных пластификаторов и ускорителей твердения бетона, а также на использовании экзотермии цемента.

В качестве основных факторов, обуславливающих жесткость бетонной смеси, как и в [1] приняты следующие структурные характеристики смеси:

- относительное водосодержание бетонной смеси  $X'_6$  без учета воды, поглощенной заполнителем;
- объемная концентрация цементного теста и воды, иммобилизованной заполнителем,  $m_{ТВ}$ , идущих на раздвижку зерен заполнителя;
- объемная концентрация цементного теста  $m_{Т2}$  в межзерновом пространстве;
- объемное относительное содержание воздуха в стандартно уплотненной бетонной смеси –  $m_{в.см}$ ;
- относительное снижение коэффициента нормальной плотности  $K_{н2}$  цементного теста при введении добавки –  $K_{пл}$ .

Указанные характеристики рассчитываются по следующим зависимостям:

$$X'_6 = \frac{B - B_{погл}}{Ц \cdot K_{н2}}; \quad (1)$$

$$m_{ТВ} = m_{ТВ} - m_{Т2}; \quad (2)$$

$$m_{Т2} = m_{пз} - m_{в.см}; \quad (3)$$

$$K_{пл} = \frac{\Delta K_{н2}}{K_{н2}} = \frac{i_{пл} \cdot m_{д}}{K_{н2}}; \quad (4)$$

где:  $Ц$  и  $B$  – содержание цемента и воды в  $1 м^3$  бетонной смеси;

$B_{погл}$  – количество воды, поглощенной заполнителем в  $1 м^3$  бетонной смеси, определяемое по зависимости:

$$B_{погл} = (\Pi \cdot W_{п} + \Psi(\Gamma p) \cdot W_{щ(гр)}) \cdot 10^{-2}; \text{ кг/м}^3 \quad (5)$$

где:  $W_{п}$  и  $W_{щ(гр)}$  – водопоглощение песка и щебня (гравия), %;

$m_{ТВ}$  – общая объемная концентрация цементного теста и воды, иммобилизованной заполнителем, определяемая по формуле:

$$m_{ТВ} = 1 - \frac{\Pi}{\rho_{п}} - \frac{\Psi(\Gamma p)}{\rho_{щ(гр)}} - m_{в.см}; \quad (6)$$

где:  $\rho_{п}$  и  $\rho_{щ(гр)}$  – истинная плотность песка и щебня (гравия),  $\text{кг/м}^3$ ;

$m_{пз}$  – пустотность смеси заполнителей в виброуплотненном состоянии, определяемая по методике [1];

$i_{пл}$  – интенсивность изменения  $K_{нз}$  при введении пластифицирующей добавки; определяемая по формуле:

$$i_{пл} = \frac{\Delta K_{нз}}{m_0}; \quad (7)$$

где:  $\Delta K_{нз}$  – абсолютное значение уменьшения  $K_{нз}$  теста при введении добавки в количестве  $m_0$ ;

$m_0$  – содержание добавки в бетонной смеси в расчете на сухое вещество в относительных единицах.

Объемное содержание воздуха в жесткой бетонной смеси ориентировочно может приниматься равным 0,035.

Уточнение математической модели жесткости бетонной смеси осуществлялось в ходе выполнения научно-исследовательских работ по республиканской теме [4]. Опыты проводились на бетонных смесях, в которых основные структурные характеристики варьировались в широких пределах: водоцементное отношение  $V/C = 0,22...0,653$ ;  $X_6 = 0,84...2,4$ ;  $m_{Т1В} = 0,015...0,15$ ;  $m_{Т2} = 0,15...0,22$ . Содержание цемента находилось в пределах  $250...650 \text{ кг/м}^3$ .

В опытах использовались: портландцемент ПЦ500–Д20 ОАО “Красносельскцемент” с  $K_{нз} = 0,245$ ; Крапужинский песок с  $M_k = 2,74$ ; Микашевичский щебень фракции 5...20 мм; пластифицирующая добавка СПС, соответствующая [5] и суперпластификатор С-3 по [6]. Рациональное содержание добавки СПС принималось по зависимости, полученной в [4]:

$$m_0 = (1,85 - 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot C) \cdot 10^{-2} \quad (8)$$

Содержание С-3 принималось равным 0,7 % от массы цемента ( $m_0 = 0,007$ ).

Исследуемые составы бетона, и расчетные структурные характеристики бетонной смеси приведены в табл. 1.

Корреляционную зависимость жесткости бетонной смеси от ее структурных характеристик находили в том же виде, что и в работах [1, 2], т.е. в виде произведения двух функций:  $F_1 = F(m_{Т1В}, m_{Т2}, K_{пл})$  и  $F_2 = F(X_6, K_{пл})$ . Сложная функция  $F_1$  представлена как сумма двух функций:  $F_1 = F_{1,1}(m_{Т1В}, K_{пл}) + F_{1,2}(m_{Т2}, K_{пл})$ .  $F_{1,1}$  и  $F_2$  находились в виде дробно-линейных функций, графики которых представлялись в виде равносторонних гипербол с асимптотами, параллельными осям координат:

$$F_i = \frac{a_i \cdot x_i + b_i}{c_i \cdot x_i + d_i};$$

где  $x_i$  – аргумент функций: для  $F_{1,1}$  при  $K_{пл} = 0$   $x_i = m_{Т1В}$ , для  $F_2$  при  $K_{пл} = 0$   $x_i = X_6$ .

Функция  $F_{1,2}$  находилась в виде линейной зависимости от  $m_{Т2}$  при  $K_{пл} = 0$ .

При  $K_{пл} \neq 0$ , т.е. для бетонных смесей, модифицированных пластифицирующими добавками, аргументы дополнялись параметрами, зависящими от  $K_{пл}$ .

Вид функциональных зависимостей принят на основании результатов анализа многочисленных экспериментальных данных, выполненных различными исследователями.

Параметры функций находились путем математико-статистической обработки полученных экспериментальных данных с использованием ПЭВМ.

В результате обработки данных зависимость жесткости бетонной смеси от ее структурно-механических свойств представлена в следующем виде:

Таблица 1.

## Составы бетона и расчетные характеристики бетонной смеси

№ со- ст	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона, кг				Вид добав- ки	m <sub>д</sub> · 10 <sup>2</sup>	$\frac{B - B_{\text{полл}}}{C}$	X <sub>б</sub>	K <sub>пл</sub>	m <sub>нз</sub>	m <sub>T2</sub>	m <sub>T1B</sub>	m <sub>TB</sub>
	Ц	П	Щ	В									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	485	781	1102	133	-	-	0,25	1,001	-	0,222	0,187	0,075	0,262
2	589	589	1139	157	-	-	0,25	1,001	-	0,238	0,203	0,118	0,321
3	641	437	1215	169	-	-	0,25	0,999	-	0,257	0,222	0,128	0,350
4	405	882	1101	122	-	-	0,27	1,079	-	0,216	0,181	0,043	0,224
5	470	792	1091	138	-	-	0,269	1,074	-	0,220	0,185	0,077	0,262
6	570	625	1103	164	-	-	0,271	1,083	-	0,234	0,199	0,122	0,321
7	619	501	1155	176	-	-	0,269	1,077	-	0,247	0,212	0,136	0,348
8	541	580	1194	157	-	-	0,272	1,090	-	0,223	0,188	0,116	0,304
9	446	826	1089	134	-	-	0,274	1,096	-	0,218	0,183	0,067	0,250
10	442	688	1195	147	-	-	0,309	1,235	-	0,210	0,175	0,087	0,262
11	544	673	1078	163	-	-	0,281	1,124	-	0,229	0,194	0,118	0,312
12	384	892	1095	127	-	-	0,299	1,196	-	0,215	0,180	0,043	0,223
13	448	809	1072	146	-	-	0,300	1,199	-	0,219	0,184	0,079	0,263
14	542	661	1066	173	-	-	0,301	1,203	-	0,229	0,194	0,127	0,321
15	590	563	1087	186	-	-	0,299	1,196	-	0,238	0,203	0,147	0,350
16	347	897	1091	139	-	-	0,365	1,459	-	0,212	0,177	0,045	0,222
17	345	798	1198	138	-	-	0,366	1,463	-	0,205	0,170	0,050	0,220
18	330	917	1071	144	-	-	0,398	1,592	-	0,212	0,177	0,045	0,222
19	386	847	1036	166	-	-	0,399	1,597	-	0,215	0,180	0,082	0,262
20	243	995	1095	134	-	-	0,497	1,989	-	0,210	0,175	0,009	0,184
21	266	964	1076	146	-	-	0,501	2,002	-	0,210	0,175	0,028	0,203
22	291	931	1054	158	-	-	0,500	2,000	-	0,211	0,176	0,047	0,223
23	246	892	1189	138	-	-	0,509	2,035	-	0,203	0,168	0,020	0,188
24	237	974	1067	155	-	-	0,599	2,395	-	0,220	0,185	0,017	0,202
25	509	827	1129	120	СПС	0,96	0,229	0,985	0,148	0,225	0,190	0,074	0,264
26	436	858	1130	119	СПС	1,09	0,255	0,991	0,151	0,218	0,183	0,052	0,235
27	406	858	1130	120	СПС	1,14	0,265	1,033	0,163	0,216	0,181	0,042	0,223
28	393	876	1124	119	СПС	1,16	0,273	1,061	0,163	0,215	0,180	0,038	0,218
29	447	826	1090	134	СПС	1,07	0,273	1,063	0,167	0,219	0,184	0,066	0,250
30	323	953	1122	115	СПС	1,28	0,317	1,234	0,167	0,212	0,172	0,018	0,190
31	283	977	1132	115	СПС	1,24	0,361	1,404	0,168	0,211	0,162	0,015	0,177
32	347	897	1091	139	СПС	1,24	0,365	1,419	0,171	0,213	0,178	0,044	0,222
33	268	988	1132	115	СПС	0,96	0,380	1,480	0,169	0,210	0,158	0,015	0,173
34	248	100	1137	115	СПС	0,96	0,410	1,596	0,167	0,210	0,151	0,015	0,166
35	589	589	1139	131	С-3	0,7	0,206	0,841	0,165	0,238	0,203	0,117	0,320
36	641	437	1215	141	С-3	0,7	0,206	0,841	0,165	0,257	0,222	0,128	0,350
37	442	688	1196	124	С-3	0,7	0,256	1,045	0,165	0,21	0,175	0,087	0,261
38	590	563	1087	156	С-3	0,7	0,248	1,012	0,165	0,238	0,203	0,147	0,350

$$\begin{aligned}
 \mathcal{J} = & \left( 4,2 + \frac{3,5 - 18 \cdot m_{T1B} \cdot (1 + 0,1 \cdot K_{пл})}{2,8 \cdot (1 + 4 \cdot K_{пл}) \cdot m_{T1B} - 1 \cdot 10^{-2}} - 28 \cdot m_{T2} \cdot (1 + 0,1 \cdot K_{пл}) \right) \times \\
 & \times \frac{1 - 0,38 \cdot \frac{X'_6 + K_{пл}}{1 - K_{пл}}}{0,69 \cdot \frac{X'_6 + K_{пл}}{1 - K_{пл}} - 0,65} \times (1 - K_{пл})
 \end{aligned} \quad (9)$$

Результаты сравнения опытных данных с рассчитанными по (9) и по методикам [1, 2, 7] представлены в табл. 2. Как следует из данных таблицы, полученная зависимость адекватно отражает влияние различных структурно-механических характеристик бетонной смеси и может быть использована для совместного решения с уравнением прочности бетона при проектировании его состава.

Анализ функций, входящих в формулу жесткости бетонной смеси (см. рис. 1) свидетельствует о различном влиянии структурных характеристик бетонной смеси  $m_{T1B}$ ,  $m_{T2}$  и  $X'_6$ . Если с увеличением значений  $m_{T2}$ , т.е. межзерновой пустотности на 0,05 (с 0,17 до 0,222) функция  $F_{1,2}$  уменьшается с минус 0,56 до минус 2,02, т.е. в 3,6 раза, то увеличение на эту же величину  $m_{T1B}$  (с 0,03 до 0,08) функция  $F_{1,1}$  уменьшается в 19,4 раза. Увеличение  $X'_6$  с 1 до 2 функция  $F_2$  уменьшается в 47 раз. Соответственно изменяется и жесткость бетонной смеси. Следовательно, для получения рациональных составов бетонов следует стремиться к увеличению значений  $m_{T1B}$  за счет уменьшения  $m_{T2}$ .

На рис. 2 представлены графики зависимостей жесткости бетонной смеси от расхода цемента и водоцементного отношения, построенные при наиболее распространенных значениях  $m_{пз} = 0,21$ ,  $K_{нз} = 0,25$  и  $V_{погл} = 10$  кг. Эти графики могут использоваться для назначения приближенных расходов цемента при заданных значениях  $V/C$ , определенных исходя из прочности бетона.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по определению составов обычного и пластифицированного бетонов с учетом условий тепловой обработки и данных статистического контроля прочности. / ИСиА Госстроя БССР. – Мн., 1984. – 70 с.
2. Пособие 5.03.01-96 к СНиП 3.03.01-87. Проектирование и возведение конструкций подземных частей полносборных зданий с рациональным применением монолитного бетона / Минстройархитектуры РБ. – Минск, 1997. – 153 с.
3. Блещик Н.П.. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. – Мн., "Наука и техника", 1977. – 232 с.
4. Отчет о НИР "Разработать и внедрить композиции бетона и малоэнергоемкие режимы производства предварительно напряженных железобетонных конструкций с применением химических добавок, синтезированных из материалов белорусских предприятий". Мн., 2000. – 206 с.
5. ТУ РБ 05891370.145 – 97 Добавка пластифицирующая СПС для бетонов. 1997. – 17с.
6. ТУ 6-36-0204229-625-90. Пластификатор С-3.
7. Руководство по подбору составов тяжелого бетона. / НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1979. – 103 с.

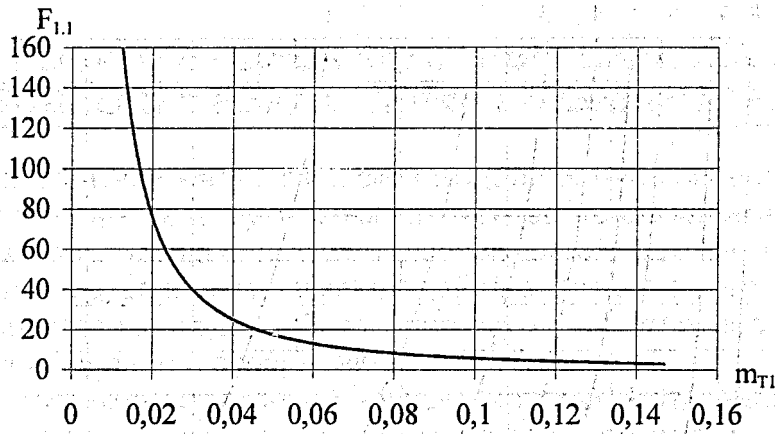
Таблица 2.

Сравнение опытных данных жесткости с расчетными

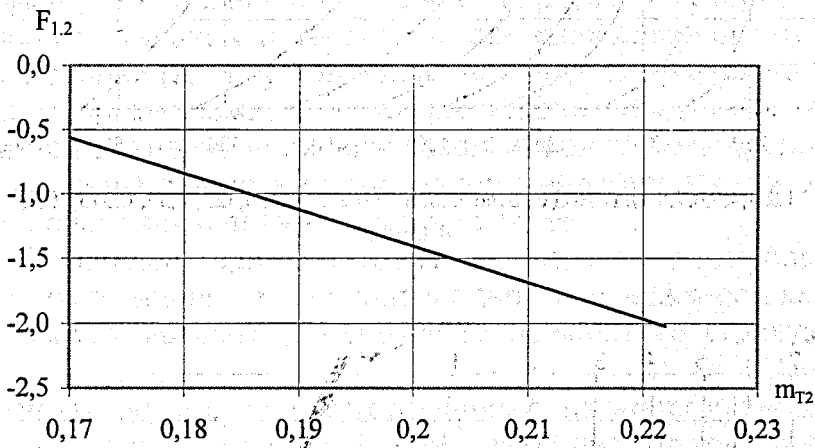
№ сост	Ж, с., по					Δ, с.	Погрешн., %
	[1]	[2]	[7]	форм.(9)	факт.		
1	44	5	130	108	140	-32	-23
2	11	-2	11	32	27	1,6	5,2
3	-5	-10	6	16	20	-2,7	-14
4	59	5	91	127	140	-33	-21
5	26	3	40	50	60	-10	-17
6	7	0	9	13	23	-10	-43
7	-1	-3	5	6	8	-2	-27
8	11	1	10	17	15	1,8	12
9	31	3	50	56	55	1,1	2
10	38	6	20	18	17	-2,0	-10
11	10	1	15	12	25	-13	-51
12	35	4	60	67	90	-23	-26
13	16	2	21	25	30	-5,5	-18
14	5	0	5	6	8	-1,8	-23
15	1	-1	5	2	4	-2,2	-55
16	16	3	40	26	20	5,7	29
17	16	3	30	22	18	4,3	24
18	12	3	22	18	13	5,0	38
19	6	2	9	7	4	2,7	68
20	28	4	43	67	36	31	86
21	10	3	25	13	17	-4,2	-25
22	6	2	10	6	6	0,2	4
23	13	4	30	18	15	3,1	21
24	5	3	12	6	4	1,8	44
25	6	1	-	13	13	1	6
26	6	1	-	14	13	1	7
27	6	1	-	16	18	-2	-11
28	7	1	-	16	16	1	6
29	3	1	-	6	10	-4	-44
30	10	2	-	25	19	6	34
31	18	2	-	18	13	5	41
32	2	1	-	3	4	-1	-14
33	33	2	-	19	16	3	19
34	53	3	-	11	22	-11	-51
35	3	-1	-	2	15	-13	-83
36	-1	-4	-	0	16	-16	-101
37	6	2	-	4	10	-6	-55
38	0	-1	-	0	3	-3	-112

$\Delta = Ж_{\text{форм.(9)}} - Ж_{\text{факт.}}, \text{ с.}; \text{ Погрешн.} = (\Delta / Ж_{\text{факт.}}) \cdot 100 \%, \%$

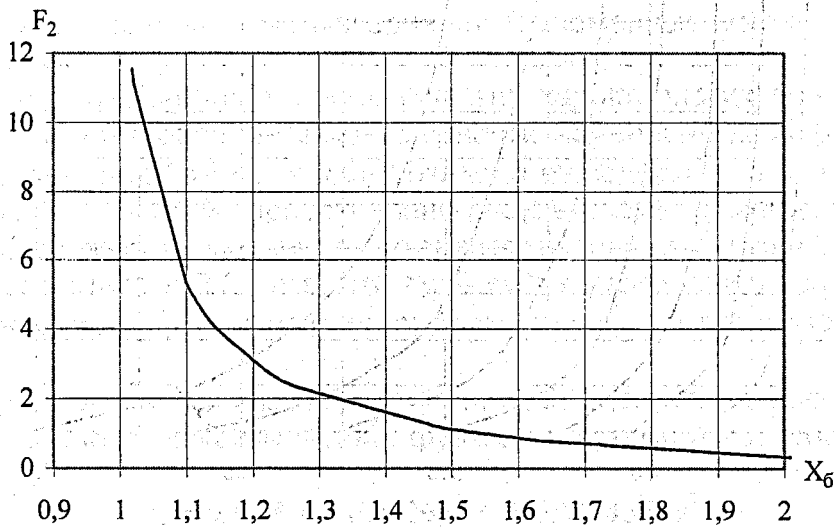
а)



б)



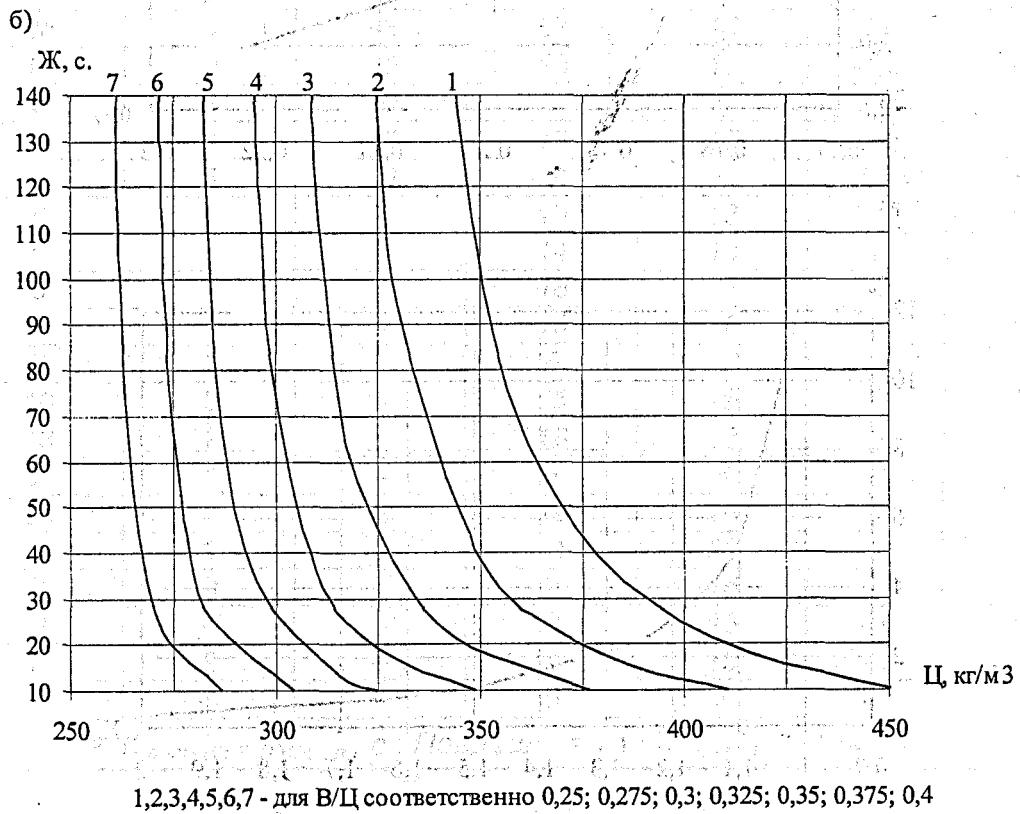
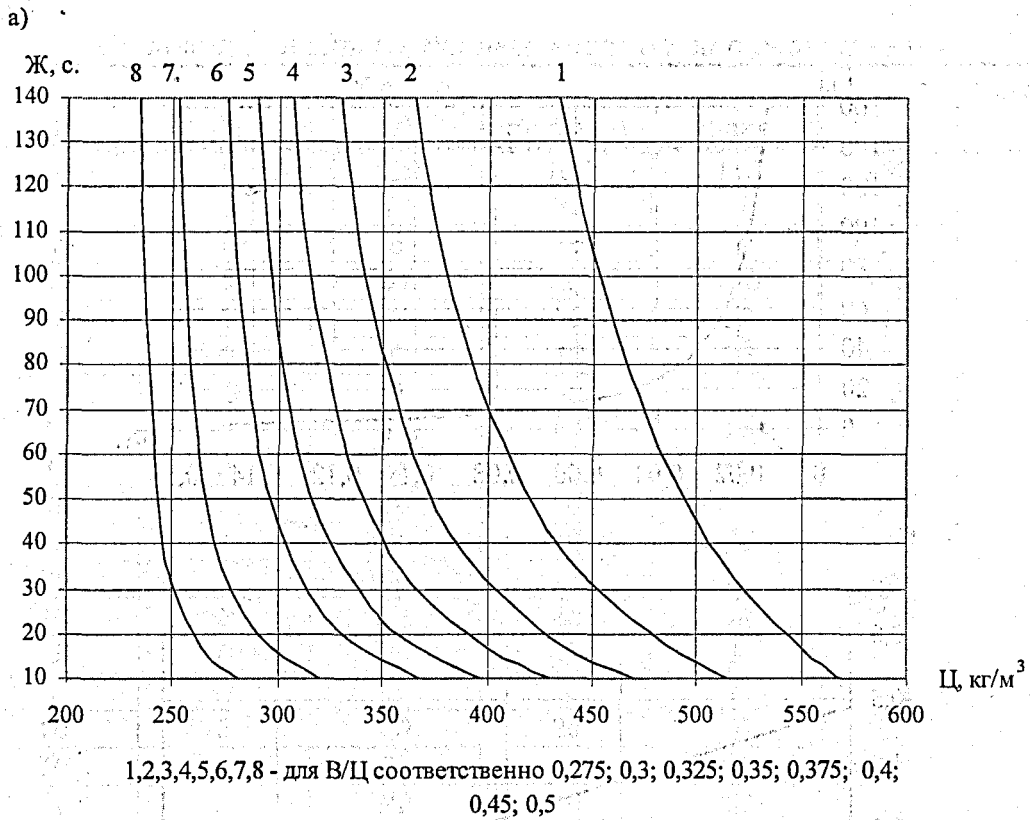
в)



**Рис. 1.**

Влияние различных структурных характеристик бетонной смеси на функции, определяющие ее жесткость

а)  $F_{1,1} = F(m_{T1B})$ ; б)  $F_{1,2} = F(m_{T2})$ ; в)  $F_2 = F(X_6)$



**Рис. 2.** Зависимость жесткости бетонной смеси от расхода цемента и водоцементного отношения  
 а) контрольная, б) модифицированная бетонные смеси