

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА БЕТОНА С УЧЕТОМ ЕГО МОРОЗОСТОЙКОСТИ

*Инж. КОВШАР С. Н., докт. техн. наук, проф. БАБИЦКИЙ В. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

В последние годы методы оптимизации составов бетона развиваются в направлении учета свойств, характеризующих его долговечность. Следует отметить, что если для традиционного бетона методов проектирования состава достаточно много, то для бетона с пластифицирующими и воздухововлекающими добавками их явно недостаточно. В связи с этим технологи на предприятиях по производству сборного и монолитного бетона лишены инструмента, позволяющего проектировать составы таких бетонов с достаточной достоверностью. В настоящей работе приведен расчетно-графический метод проектирования состава бетона, включая химические добавки, ориентированный на прогнозирование такой важной эксплуатационной характеристики, как морозостойкость.

**Последовательность проектирования состава тяжелого бетона.** Методика проектирования состава бетона реализуется в два этапа. На первом этапе определяют состав бетона, который обеспечивает требуемые значения удобоукладываемости бетонной смеси и прочности

бетона, а на втором – его предполагаемую морозостойкость.

По общепринятой схеме проектирование состава бетона начинают с определения водоцементного отношения бетонной смеси, которое удобно рассчитать, основываясь на формуле [1]:

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_6 = \frac{0,3k_3 f_{ц}}{k_{то} f_6} + 0,1, \quad (1)$$

где  $k_3$  – коэффициент, зависящий от качества заполнителей (для щебня принимают равным 1,0, а для гравия – 0,9);  $f_{ц}$  – активность цемента, МПа;  $k_{то}$  – коэффициент, зависящий от отпускной прочности бетона;  $f_6$  – прочность бетона, МПа.

Величину отпускной прочности бетона учитывают следующим образом:

$$k_{то} = 1 + 0,009(f_{отп} - 70), \quad (2)$$

где  $f_{отп}$  – отпускная прочность бетона, %.

Поскольку методика проектирования состава бетона ориентирована на прогнозирование морозостойкости, к недостаткам формулы (1) можно отнести то, что в ней учитываются как содержание воздуха в бетонной смеси (вовлеченный в бетонную смесь воздух – результат применения соответствующих химических добавок), так и загрязненность заполнителей. Попытаемся устранить указанные недостатки.

Фактически по формуле (1) рассчитывают не водоцементное отношение бетонной смеси, а отношение суммы объемов воды и воздуха к расходу цемента. Учет содержания воздуха в бетоне не нов и предложен еще на заре развития бетоноведения Р. Фере. Формула для расчета прочности бетона в его редакции выглядит следующим образом [2]:

$$f_6 = K \frac{C}{B+V}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от активности цемента;  $C$ ,  $B$  – абсолютные объемы цемента и воды;  $V$  – объем воздушных пор в единице объема бетона.

Таким образом, фактически при введении воздухововлекающих и микрогазообразующих добавок можно записать

$$\left(\frac{B}{\Pi}\right)_6 = \left(\frac{B+B_v}{\Pi}\right)_6, \quad (4)$$

где  $B_v$  – объем воздушных пор, л.

Учет загрязненности заполнителя, т. е. содержание в них глины, ила и пыли, осуществляют в (1) посредством коэффициента  $k_3$ . Для получения численного значения коэффициента можно воспользоваться данными [3]. После переработки результатов этого источника, а также проведения дополнительных экспериментов получена следующая формула:

$$k_3 = 1 - 0,04 \cdot (0,35G_{\text{гл}}^{\text{n}} + 0,65G_{\text{гл}}^{\text{м}})^{1,5}, \quad (5)$$

где  $G_{\text{гл}}^{\text{n}}$ ,  $G_{\text{гл}}^{\text{м}}$  – содержание пылевидных, глинистых и илистых частиц в заполнителе, % от массы мелкого и крупного заполнителя соответственно.

Далее рассчитывают водоцементное отношение цементного теста

$$\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T = (0,58 + 0,07M_k) \left(\frac{B}{\Pi}\right)_6, \quad (6)$$

где  $M_k$  – модуль крупности песка, и относительное водосодержание цементного теста

$$X = \frac{\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T}{K_{\text{нт}}}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{нт}}$  – коэффициент нормальной густоты цемента, соответствующий водоцементному отношению цементного теста нормальной густоты (НГ в %):

$$K_{\text{нт}} = \frac{\text{НГ}}{100}.$$

Затем определяют предельную (согласно воззрениям проф. И. Н. Ахвердова [4]) водоудерживающую способность цементного теста (верхняя граница связности цементного теста)

$$\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{n}} = 1,65K_{\text{нт}}. \quad (8)$$

Водопотребность бетонной смеси рассчитывают по формулам в зависимости от водоцементного отношения цементного теста:

- при  $\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T \geq \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{n}}$

$$B = \frac{B_0}{1 - \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{n}} k_y}, \text{ кг}; \quad (9)$$

- при  $\left(\frac{B}{\Pi}\right)_T < \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{n}}$

$$B = \frac{B_0}{1 - \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{n}} k_y} + 10\text{НГ} \left[ \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T^{\text{n}} - \left(\frac{B}{\Pi}\right)_T \right], \text{ кг}. \quad (10)$$

Проанализируем формулы (9) и (10), посредством которых учитываются основные факторы, влияющие на водопотребность бетонной смеси.

Величина расхода воды для сверхжесткой бетонной смеси (на чистых заполнителях, крупном песке и щебне крупностью до 20 мм) может быть принята равной 110 кг ( $B_0$ ), что соответствует нижней границе связности цементного теста. Величина коэффициента  $k_y$  определяется удобоукладываемостью бетонной смеси и равна:

- для подвижной бетонной смеси в зависимости от осадки конуса (ОК, см)

$$k_y = 0,7 + 0,094\sqrt{OK}; \quad (11)$$

• для жесткой бетонной смеси в зависимости от показателя жесткости (Ж, с)

$$k_y = 1,05 \left( \frac{1}{Ж} \right)^{0,16}. \quad (12)$$

Если свойства заполнителей отличны от указанных выше, то к рассчитанному по (9) или (10) расходу воды прибавляются поправки, значения которых могут быть определены из рекомендаций, представленных в [3].

Расход цемента рассчитывают с учетом содержания воздуха, вовлеченного в бетонную смесь при введении воздухововлекающих (и иных подобных) добавок

$$\Pi = \frac{B + 10V_b}{\left( \frac{B}{\Pi} \right)_6}, \text{ кг}, \quad (13)$$

где  $V_b$  – воздухововлечение бетонной смеси, % от объема бетона (определяют экспериментально или расчетом согласно [5]).

Рассчитаем объем цементного теста

$$V_T = \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{B}{\rho_B} + 0,01V_b, \text{ м}^3, \quad (14)$$

где  $\rho_{\Pi}$  и  $\rho_B$  – плотности цемента и воды, кг/м<sup>3</sup>.

Затем вычислим долю песка в смеси заполнителей

$$r = 45 - 140(1 - V_T)^{1,5} \quad (15)$$

и, наконец, расходы мелкого и крупного заполнителей:

$$\Pi = 0,01r(1 - V_T)\rho_{\Pi}, \text{ кг}; \quad (16)$$

$$\Pi_{\text{к}} = (1 - 0,01r)(1 - V_T)\rho_{\Pi}, \text{ кг}, \quad (17)$$

где  $\rho_{\Pi}$ ,  $\rho_{\text{к}}$  – плотности зерен мелкого и крупного заполнителя, кг/м<sup>3</sup>.

Итак, запроектирован состав бетона, обеспечивающий требуемую удобоукладываемость бетонной смеси и прочность бетона. Далее необходимо рассчитать предполагаемую морозостойкость бетона.

**Расчет морозостойкости бетона.** Как было установлено ранее [6], кинетика изменения прочности бетона в процессе циклического замораживания и оттаивания определяется сочетанием конструктивных и деструктивных пре-

образований, происходящих в материале при эксплуатации (или испытаниях). Суммарный процесс (число циклов замораживания-оттаивания материала  $F_p$ ) может быть описан следующим образом:

$$F_p = \frac{2 \left( 1 + \frac{\delta}{100} \right) f_0 \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_0} \left( 1 - \frac{W_0}{100} \right)}{k_D}. \quad (18)$$

В выражении (18) допустимая потеря прочности бетона  $\delta$  определяется требованиями нормативных документов. Величину прочности к моменту начала эксплуатации  $f_0$  можно принять равной прочности бетона в проектном возрасте.

Максимально возможная степень гидратации цемента  $\alpha_{\max}$  зависит от водосодержания цементного теста и после обработки данных, приведенных в [7, 8], может быть привязана к относительному водосодержанию цементного теста. Если величина  $X \geq 1,65$ , то при достаточно продолжительном твердении в благоприятных условиях может прогидратироваться весь цемент, т. е.  $\alpha_{\max} = 100$  %. Но если  $X < 1,65$ , то

$$\alpha_{\max} = 60,6X, \text{ \%}. \quad (19)$$

Фактическая степень гидратации  $\alpha_0$  в основном определяет все структурные характеристики цементного камня и бетона и для проектного возраста может быть рассчитана в зависимости от относительного водосодержания цементного теста [9]:

• при  $X < 1,65$

$$\alpha_0 = 60X - \sqrt[3]{(1,65X)^2} e^{1,65X}, \text{ \%}; \quad (20)$$

• при  $X \geq 1,65$

$$\alpha_0 = 70 + 5(X - 1,65), \text{ \%}. \quad (21)$$

Объем открытых капиллярных пор фактически определяет водопоглощение материала  $W_0$  и может быть рассчитан следующим образом. Трансформировав общеизвестную формулу для расчета общей пористости бетона, связывающую пористость с расходами воды и цемента, а также со степенью гидратации цемента [10], выражение для определения общей пористости цементного камня  $\Pi_0$  можно записать следующим образом:

$$\Pi_0 = \left( V_T - 0,23 \Pi \frac{\alpha}{100} \right) \cdot \frac{1}{10}, \text{ \%}. \quad (22)$$

При расчетах удобнее оперировать не с содержанием воды в цементном тесте  $V_T$ , а с водоцементным отношением

$$W_o = \left[ \left( \frac{B}{C} \right)_T - 0,23 \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{1}{10}, \% \quad (23)$$

В итоге получаем достаточно простую формулу, численные значения факторов в которой рассчитываются по приведенной выше схеме:

$$W_o = \left[ \left( \frac{B}{C} \right)_T - 0,23 \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{C}{10}, \% \quad (24)$$

Приняв, что объем цементного камня равен объему цементного теста, можно получить уравнение для расчета водопоглощения бетона по объему

$$W_o = V_T \left[ \left( \frac{B}{C} \right)_T - 0,23 \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{C}{10}, \% \quad (25)$$

Установлено, что коэффициент  $k_D$ , характеризующий интенсивность деструктивных процессов в уравнении (18), может быть привязан к относительному водосодержанию цементного теста и рассчитываться:

- при  $X \leq 1,4$

$$k_D = 0,07 + 0,22(X - 0,5), \text{ МПа/цикл}; \quad (26)$$

- при  $X > 1,4$

$$k_D = 0,27 + 4(X - 1,4)^{2-(X-1,4)}, \text{ МПа/цикл}. \quad (27)$$

Если рассчитанная величина морозостойкости бетона меньше проектного значения, то состав бетона пересчитывают, начиная с уравнения (1), увеличивая прочность бетона и уменьшая тем самым водоцементное отношение. Процесс оптимизации состава бетона достаточно длителен, поэтому для удобства все расчеты представлены в виде номограмм, которые позволяют оперативно рассчитать требуемые характеристики бетона. В качестве примера на рис. 1, 2 приведены разработанные номограммы для расчета «конструктивных» факторов и морозостойкости бетона без поправочных коэффициентов.

**Достоверность расчетов.** Естественно, проведенные исследования были бы недостаточно полными, если бы не была проведена оценка достоверности представленной методики проектирования состава бетона. Это было реализовано на различных составах бетонных смесей

(табл. 1), изготовленных в лабораторных условиях на следующих компонентах: портландцемент ПЦ-500-Д20 РУП «Белорусский цементный завод» (активность – 51,5 МПа, нормальная плотность – 26,5 %), песок природный (модуль крупности – 2,65, содержание пылевидных, глинистых и илистых частиц – 1,8 % по массе), щебень гранитный (наибольшая крупность зерен – 20 мм, содержание пылевидных, глинистых и илистых частиц – 0,6 % по массе).

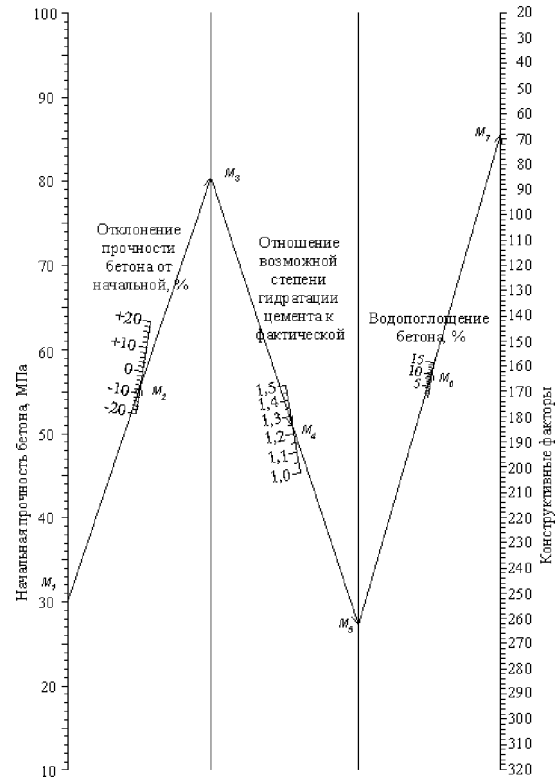


Рис. 1. Номограммы для определения состава бетона

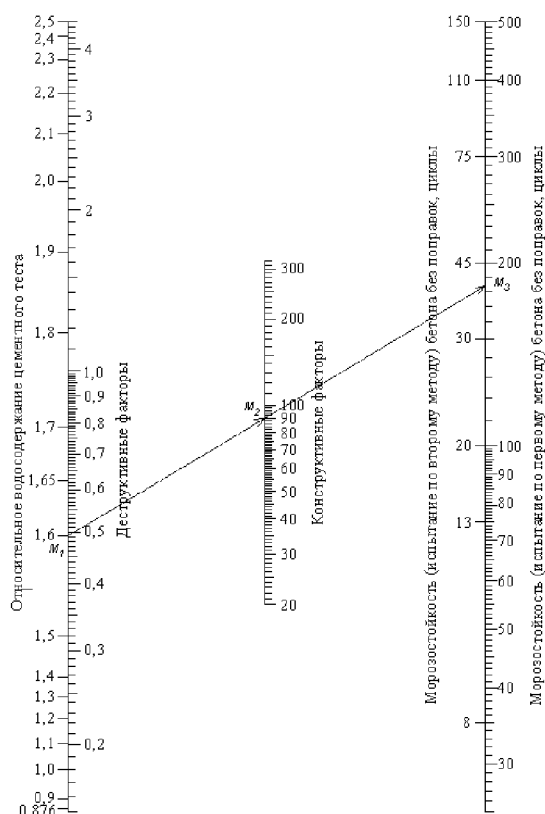


Рис. 2. Номограммы для расчета морозостойкости бетона

Таблица 1

Состав бетонных смесей

Класс бетона по прочности на сжатие	Марка бетонной смеси по удобоукладываемости	Расход компонентов бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>				Добавка ПФМ-НЛК, % от массы цемента
		Цемент	Песок	Щебень	Вода	
C12/15	П1	210	863	1169	120	0,40
C12/15	П2	225	897	1107	131	0,40
C12/15	П3	236	876	1095	145	0,40
C12/15	П1	213	855	1187	110	0,60
C16/20	П1	235	850	1173	125	0,45
C16/20	П2	244	886	1112	133	0,45
C16/20	П3	256	877	1090	142	0,50
C16/20	П1	241	851	1170	118	0,65
C20/25	П1	337	751	1165	144	0,50
C20/25	П2	354	768	1121	151	0,50
C20/25	П3	379	755	1094	162	0,55
C20/25	П4	388	763	1065	170	0,60
C20/25	П5	404	764	1036	178	0,70
C20/25	П1	341	756	1160	140	0,80
C25/30	П1	353	802	1103	145	0,50
C25/30	П2	372	789	1086	153	0,50
C25/30	П3	395	776	1062	162	0,60
C25/30	П4	418	779	1022	173	0,60
C25/30	П5	429	782	995	178	0,70
C25/30	П1	360	749	1153	138	0,80

C30/37	П1	396	708	1170	146	0,55
C30/37	П2	415	729	1112	154	0,60
C30/37	П3	437	733	1067	163	0,60
C30/37	П4	453	731	1031	175	0,70
C30/37	П5	472	733	983	185	0,80
C30/37	П1	401	708	1167	144	0,85
C35/45	П1	458	683	1155	154	0,65
C35/45	П2	475	668	1112	165	0,70
C35/45	П3	513	627	1087	181	0,80
C35/45	П1	462	685	1143	150	0,90

Варьирование в широких пределах классов бетона по прочности на сжатие (C12/15–C35/45) и марок бетонных смесей по удобоукладываемости (П1–П5) обеспечивало получение практически всех возможных вариантов структурно-механических характеристик материала. В качестве химической добавки взята достаточно популярная в настоящее время ПФМ-НЛК (полифункциональный модификатор), важная особенность которой заключается в ее двойном действии: она по основному эффекту действия относится к пластификаторам группы I, а по дополнительному – к воздухововлекающим.

Образцы-кубы размером 100×100×100 мм (количество принималось согласно [11]) твердели

28 сут. в нормально-влажностных условиях, после чего проводили испытания по первому методу [11].

Оценка достоверности прогнозирования заключалась в сравнении фактических значений морозостойкости  $F_{\phi i}$  с расчетными  $F_{p i}$ , причем критерием достоверности принят коэффициент вариации

$$V_F = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{\phi i} - F_{p i})^2}{n-1}}}{\frac{\sum_{i=1}^n F_{\phi i}}{n}} \cdot 100, \% \quad (28)$$

где  $n$  – количество составов.

Статистический анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что предложенная методика прогнозирования морозостойкости на стадии проектирования состава бетона, в том числе с пластифицирующе-воздухововлекающей добавкой, обеспечивает требуемую достоверность (коэффициент вариации составил 10,3 %, что меньше считающегося приемлемым для неразрушающего контроля свойств бетона значения 12 %).

Таблица 2

Статистическая оценка достоверности расчетов

№ состава	Объем вовлеченного воздуха, %	Морозостойкость бетона, цикл		$F_{\phi} - F_p$	$(\frac{F_{\phi}}{F_p})^2$
		Фактическая $F_{\phi}$	Расчетная $F_p$		
1	3,2	110	128	-18	324
2	2,6	105	116	-11	121
3	2,9	105	95	10	100
4	3,4	140	136	4	16
5	3,5	150	176	-26	676
6	3,1	135	153	-18	324
7	3,0	120	142	-22	484
8	4,1	190	181	9	81
9	4,5	260	242	18	324
10	3,5	180	201	-21	441
11	3,3	165	187	-22	484
12	3,6	180	153	27	729
13	3,2	150	125	25	625
14	4,4	250	251	-1	1
15	5,2	270	312	-42	1764
16	5,5	290	278	12	144
17	5,0	265	265	0	0
18	4,4	240	204	36	1296
19	3,9	195	185	10	100
20	5,6	310	322	-12	144

Окончание табл. 2

№ состава	Объем вовлеченного воздуха, %	Морозостойкость бетона, цикл		$F_{\phi} - F_p$	$(\frac{F_{\phi}}{F_p})^2$
		Фактическая $F_{\phi}$	Расчетная $F_p$		
21	5,1	300	363	-63	3969
22	4,5	290	310	-20	400
23	4,9	315	275	40	1600
24	5,2	250	253	-3	9
25	4,0	210	214	-4	16
26	3,7	350	376	-26	676
27	5,1	410	394	16	256
28	4,3	330	355	-25	625
29	3,5	280	303	-23	529
30	4,9	400	410	-10	100

Описанный расчетно-графический метод проектирования состава бетона в настоящее время проходит апробацию на ОАО «Светлогорский завод ЖБИиК», ОАО «Завод СЖБ-1» г. Минск, ПУ «Нефтеспецстрой» г. Речица и, судя по предварительным результатам, обеспечивает достаточную точность расчетов.

### ВЫВОДЫ

1. Разработана методика проектирования состава тяжелого бетона с пластифицирующими и воздухововлекающими добавками.
2. Предложена модель прогнозирования морозостойкости бетона с количественным учетом структурно-механических особенностей материала.
3. Разработана система номограмм, позволяющая оперативно, с достаточно высокой для практических целей точностью проектировать составы бетона и прогнозировать их морозостойкость.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Суходоева, Н. В. Методика проектирования состава бетона / Н. В. Суходоева, В. В. Бабицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 167–176.
2. Френкель, И. М. О расчете прочности бетона по формулам / И. М. Френкель // Бетон и железобетон. – 1974. – № 9. – С. 8–9.
3. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1979. – 103 с.
4. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
5. Большаков, В. И. Основы теории и методологии многопараметрического проектирования составов бетона / В. И. Большаков, Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Днепропетровск: ПГАСА, 2006. – 360 с.
6. Ковшар, С. Н. Влияние циклического замораживания и оттаивания на изменение степени гидратации цемента и структурно-механические характеристики цементного камня / С. Н. Ковшар, В. В. Бабицкий // Перспективы развития новых технологий в строительстве

и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XVI международного научно-методического семинара / под общ. ред. П. С. Пойты, В. В. Тура. – Брест: БрГТУ, 2009. – Ч. 2. – С. 147–151.

7. **Пауэрс, Т. К.** Физическая структура портландцементного теста / Т. К. Пауэрс // Химия цемента; под ред. Х. Ф. У. Тейлора; пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1969. – С. 300–819.

8. **Пауэрс, Т.** Физические свойства цементного теста и камня / Т. Пауэрс // Четвертый Международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1964. – С. 402–438.

9. **Бабицкий, В. В.** Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В. В. Бабиц-

кий // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2005. – № 1. – С. 76–79.

10. **Состав, структура и свойства цементных бетонов** / Г. И. Горчаков [и др.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 144 с.

11. **Бетоны.** Базовый метод определения морозостойкости: ГОСТ 10060.1–95. – Введ. 01.04.1997. – Минск: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 1997. – 6 с.

Поступила 29.12.2009