

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]:

$$\left(\frac{B}{C}\right)_6 = \frac{0,3k_3f_n}{k_{то}f_6} + 0,1, \quad (1)$$

где k_3 – коэффициент, зависящий от качества заполнителей (для щебня принимают равным 1,0, а для гравия – 0,9); f_n – 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. Попробуем 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

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

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:

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

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

Далее рассчитывают водоцементное отношение цементного теста

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

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

$$X = \frac{\left(\frac{B}{C}\right)_\tau}{K_{\text{нт}}}, \quad (7)$$

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]) вододерживающую способность цементного теста (верхняя граница связности цементного теста)

$$\left(\frac{B}{C}\right)_\tau^{\text{п}} = 1,65K_{\text{нт}}. \quad (8)$$

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

$$\bullet \text{ при } \left(\frac{B}{C}\right)_\tau \geq \left(\frac{B}{C}\right)_\tau^{\text{п}}$$

$$B = \frac{B_0}{1 - \left(\frac{B}{C}\right)_\tau^{\text{п}} k_y}, \text{ кг}; \quad (9)$$

$$\bullet \text{ при } \left(\frac{B}{C}\right)_\tau < \left(\frac{B}{C}\right)_\tau^{\text{п}}$$

$$B = \frac{B_0}{1 - \left(\frac{B}{C}\right)_\tau^{\text{п}} k_y} + 10\text{НГ} \left[\left(\frac{B}{C}\right)_\tau^{\text{п}} - \left(\frac{B}{C}\right)_\tau \right], \text{ кг}. \quad (10)$$

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 ρ_{Π} и ρ_b – плотности цемента и воды, кг/м³.

Затем вычислим долю песка в смеси заполнителей

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

и, наконец, расходы мелкого и крупного заполнителей:

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

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

где ρ_{Π} , $\rho_{\text{ш}}$ – плотности зерен мелкого и крупного заполнителя, кг/м³.

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 δ 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 α_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 Π_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 B_t , а с водоцементным отношением

$$П_0 = \left[\left(\frac{B}{Ц} \right)_t - 0,23 \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{1}{10}, \% \quad (23)$$

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

$$П_0 = \left[\left(\frac{B}{Ц} \right)_t - 0,23 \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{Ц}{10}, \% \quad (24)$$

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

$$W_0 = V_t \left[\left(\frac{B}{Ц} \right)_t - 0,23 \frac{\alpha}{100} \right] \cdot \frac{Ц}{10}, \% \quad (25)$$

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).

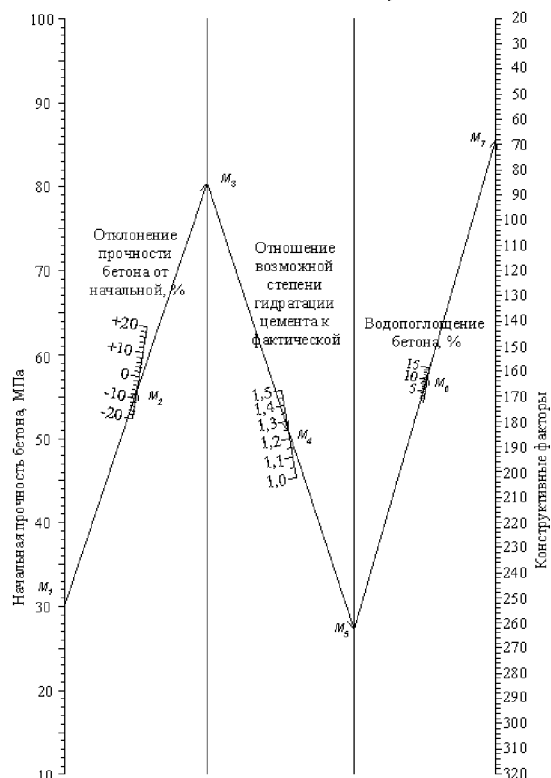


Рис. 1. Номограммы для определения состава бетона

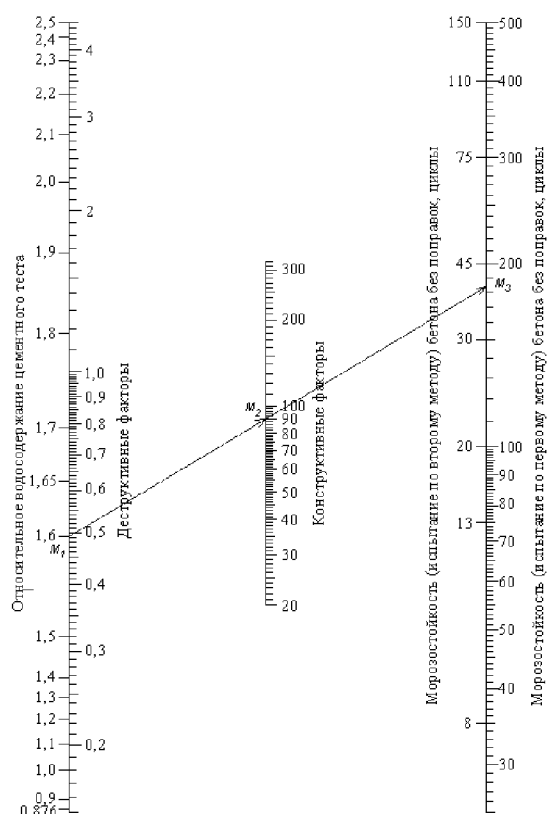


Рис. 2. Номограммы для расчета морозостойкости бетона

Таблица 1

Состав бетонных смесей

Класс бетона по прочности на сжатие	Марка бетонной смеси по удобоукладываемости	Расход компонентов бетонной смеси, кг/м ³				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		$F_{\phi} - F_p$	$(\frac{F_{\phi}}{F_p} - 1)^2$
		Фактическая F_{ϕ}	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		$F_{\phi} - F_p$	$(\frac{F_{\phi}}{F_p} - 1)^2$
		Фактическая F_{ϕ}	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 «Нефтьспецстрой» 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. – Днепрпетровск: 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