

УДК 666.972

**ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОНА С ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ**

**ЕЛЕМЕНТИ ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БЕТОНУ З ПЛАСТИФІКУЮЧИМИ ДОБАВКАМИ**

**ELEMENTS OF DESIGNING OF STRUCTURE OF CONCRETE WITH ADDITIVES OF PLASTICIZERS**

**Ковшар С.Н., к.т.н, Бибик М.С., к.т.н., докторанты, Бабицкий В.В., д.т.н., профессор** (Белорусский национальный технический университет, г. Минск), **Семенюк С.Д., д.т.н., профессор, зав. кафедрой** (Белорусско-Российский университет, г. Могилев) Республика Беларусь

**Ковшар С.Н., к.т.н, БібічкМ.С., к.т.н., докторанти, Бабицький В.В., д.т.н., професор** (Білоруський національний технічний університет, м. Мінськ), **Семенюк С.Д., д.т.н., професор, зав. кафедрою** (Білорусько-Російський університет, м. Могильов) Республіка Білорусь

**Kovshar S.N., Ph.D., Bibik M.S., Ph.D., Babitski V.V., doctor of technical sciences, professor** (Belarusian National Technical University, Minsk), **Semeniuk S.D., doctor of technical sciences, professor** (Bilorus-Russian universitet, Mogiliov) Respublika Bilorus

**Предложен метод проектирования состава бетона с добавками пластификаторов, базирующийся на отличных от традиционных методик принципах и дающий достаточную для практических целей точность расчетов.**

**Запропоновано метод проектування складу бетону з добавками пластифікаторів, що базується на відмінних від традиційних методик принципах і дає достатню для практичних цілей точність розрахунків.**

**The method of designing of structure of concrete with additives of the softeners, based on principles distinct from traditional techniques and giving sufficient for practical purposes accuracy of calculations is offered.**

**Ключевые слова:**

**Бетон, добавки, проектирование, состав, морозостойкость.  
Concrete, additives, designing, structure, frost resistance.**

**В бетоноведении** достаточно распространен термин «подбор состава бетона», что заведомо предполагает перебор различных вариантов соотношения вяжущего, воды, заполнителей и добавок (химических и минеральных) с целью получения оптимального варианта, отвечающего заданным требованиям к бетонной смеси и бетону. И для реализации цели подбора состава бетона разработаны различные методики [1–10 и др.]. Классический подбор состава бетона характеризуется достаточно простыми расчетными формулами и большим объемом экспериментальных работ. Поэтому целесообразнее состав бетона не подбирать, а проектировать, то есть прогнозировать его прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, коррозионную стойкость и иные свойства при минимальном объеме экспериментальных работ. Проектирование состава (в отличие от подбора) предполагает применение более точных расчетных формул и закономерностей, связывающих свойства бетонной смеси и бетона с многообразием влияющих факторов. Естественно, по мере развития науки о бетоне появляются новые аналитические зависимости и совершенствуются старые, а также может корректироваться и сама структура расчетов. Особенно сложно математически увязать изменение свойств бетонной смеси и бетона при введении разнообразных химических добавок, в первую очередь пластифицирующих. Авторы попытались предложить и свою систему расчета состава бетона при реализации данного направления в технологии бетона.

**При разработке методики проектировании состава бетона** необходимо решить три основные задачи:

- выбрать наиболее точную формулу, связывающую прочность бетона с водоцементным отношением, активностью цемента и, при возможности, с иными факторами;
- связать удобоукладываемость бетонной смеси с выбранными влияющими факторами;
- найти оптимальное соотношение расходов мелкого и крупного заполнителей.

В технологии бетона практически все (за редким исключением) формулы для расчета прочности бетона на сжатие базируются на законе водоцементного отношения – прочностные характеристики материала находятся в гиперболической зависимости от водоцементного отношения бетонной смеси  $(В/Ц)_5$ . Но точность разнообразных формул различна и определяется грамотным выбором соотношения влияющих коэффициентов. Задача состоит лишь в применимости такой формулы, которая дает минимальное отклонение расчетных величин от фактических. Эта работа была проведена ранее [11], в результате чего получено, что при использовании формулы (1) коэффициент вариации отклонений расчетных величин от фактических составляет лишь 10,4 % (естественно, для

использованной выборки) [11], что вполне удовлетворительно при практических расчетах:

$$\left(\frac{B}{Ц}\right)_6 = \frac{0,3 \cdot k_3 \cdot f_{Ц}}{f_B} + 0,1, \quad (1)$$

где  $k_3$ —коэффициент, учитывающий влияние крупного заполнителя на прочность бетона (для щебня равен 1,0, а для гравия 0,9);  $f_{Ц}$ —активность цемента, МПа;  $f_B$ —требуемая прочность бетона в проектном возрасте, МПа.

Учитывая простоту формулы, она и положена в основу предлагаемого метода.

При расчете удобоукладываемости бетонной смеси в основе большинства методов подбора состава бетона лежит так называемый закон постоянства водопотребности бетонной смеси [1–3 и др.]. Как известно, неизменность расхода воды в определенных пределах расхода цемента (от 200 до 350...450 кг/м<sup>3</sup>) объясняется взаимным компенсирующим влиянием объема цементного теста и его водоцементного отношения. Естественно, возникает вопрос, а можно ли этот факт использовать для исключения этапа назначения (а не расчета) расхода воды.

Накопленный массив экспериментальных результатов (собственных и других исследователей) позволил получить ряд кривых, связывающих объем цементного теста и водоцементное отношение бетонной смеси с ее удобоукладываемостью (рис. 1).

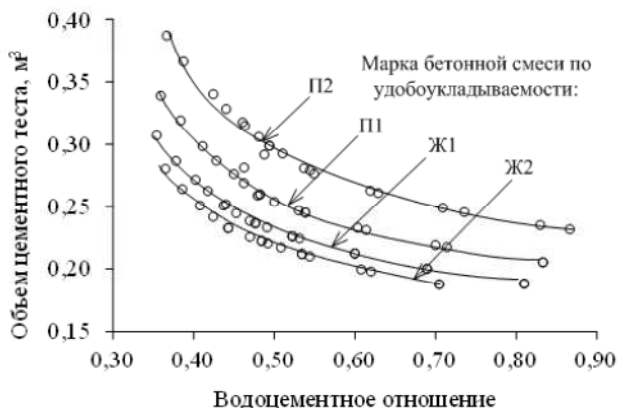


Рис. 1. Взаимосвязь водоцементного отношения и объема цементного теста для бетонных смесей различной удобоукладываемости

Обработка полученных результатов позволила получить формулы, позволяющие рассчитывать требуемый объем цементного теста для

обеспечения ( $V_T$  в м<sup>3</sup>) требуемой подвижности (ОК в см) или жесткости (Ж в с) бетонной смеси:

$$V_T = \frac{0,17 \cdot \text{ОК}^{0,1}}{\sqrt[3]{\left[\left(\frac{B}{\Pi}\right)_B\right]^2}} + 0,07 \cdot \left(\frac{B}{\Pi}\right)_B^3, \quad (2)$$

$$V_T = \frac{0,2}{\sqrt[3]{\left[\left(\frac{B}{\Pi}\right)_B\right]^2}} + 0,07 \cdot \left(\frac{B}{\Pi}\right)_B^3. \quad (3)$$

Известные величины объема цементного теста и водоцементного отношения бетонной смеси предоставляют удобную возможность для расчета расхода цемента ( $\Pi$  в кг):

$$\Pi = \frac{V_T}{\frac{1}{\rho_{\Pi}} + \frac{\left(\frac{B}{\Pi}\right)_B}{\rho_B}}, \quad (4)$$

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

Далее по элементарной, применяемой практически во всех методах формуле, рассчитывают расход воды ( $B$  в кг):

$$B = \Pi \cdot \left(\frac{B}{\Pi}\right)_B. \quad (5)$$

Расходы мелкого и крупного заполнителей в различных методах рассчитываются по-разному. Например, в классическом методе «абсолютных объемов» [1] (и его модификациях) исходят из того, что вначале по таблицам (графикам) определяют коэффициент раздвижки растворной частью зерен крупного заполнителя, а уже с учетом этого коэффициента рассчитывают расходы заполнителей. Но в нашем случае целесообразнее привязываться к так называемой доле песка в смеси заполнителей, то есть отношению массы (а в некоторых методах объему) мелкого заполнителя ( $\Pi$ ) к сумме масс (или объемам) мелкого и крупного ( $\Pi\Pi$ ) заполнителей. Доля песка в смеси заполнителей может быть связана, например, как с расходом цемента, так и с объемом цементного теста [3,7 и др.]. В результате обработки имеющихся данных получены формулы для расчета доли песка в смеси заполнителей ( $r$  в %):

$$\text{для подвижной смеси } r = r_0 - 80 \cdot (V_T - 0,2) + 1,4 \cdot \sqrt[3]{(\text{ОК} - 1)^2}, \quad (6)$$

для жесткой 
$$r = r_0 - 80 \cdot (V_T - 0,2) - 0,75 \cdot \sqrt[3]{(Ж - 5)^2}. \quad (7)$$

В (6) и (7) величина  $r_0$  для густоармированных изделий принимается равной 45 %, а при обычном армировании 40 %.

Далее, исходя из предпосылки, что бетонная смесь состоит из цементного теста и заполнителей с уже известным соотношением, определяют расход мелкого (П в кг) и крупного (Щ в кг) заполнителей:

$$П = \frac{1 - V_T}{\frac{1}{\rho_{п}} \cdot \frac{100}{r}}, \quad (8)$$

$$Щ = П \cdot \frac{\rho_{щ}}{\rho_{п}} \cdot \left( \frac{100}{r} - 1 \right), \quad (9)$$

где  $\rho_{п}$  и  $\rho_{щ}$  – плотность в зернах мелкого и крупного заполнителей соответственно, кг/м<sup>3</sup>.

Расчетная плотность бетонной смеси представляет собой сумму всех компонентов:

$$\rho_{бс} = Ц + П + Щ + В, \text{ кг/м}^3. \quad (10)$$

Следует отметить, что представлены лишь элементы (общие принципы) метода проектирования состава бетона. Разнообразие иных свойств компонентов смеси, например, нормальной густоты цемента, вида, крупности, загрязненности мелкого и крупного заполнителя может быть учтено, например, посредством уже разработанной системы поправок[3].

**Попытаемся**, уже основываясь на представленной методике, развить систему расчетов, включив и влияние пластифицирующих добавок на технологические свойства бетонной смеси и бетона. Инженеры-технологи, связанные с проектированием (и подбором) состава бетона, представляют все трудности процесса, обусловленные отсутствием строгого математического описания связи вида и дозировки пластифицирующей добавки с характеристиками смеси и бетона. И при оптимизации состава приходится опираться на результаты экспериментов, отрывочные сведения из литературных источников, накопленный опыт и, к сожалению, на интуицию инженера. Нельзя сказать, что расчетные формулы отсутствуют вообще. Например, в [12] приведена зависимость, связывающая возможное снижение водосодержания бетонной смеси (при сохранении ее заданной удобоукладываемости) от дипольного момента молекулы пластификатора, дозировки добавки и расхода цемента. Казалось бы, проблема решена. Но, к сожалению, формула не изобилует конкретными технологическими факторами. Расход цемента и дозировка добавки – это величины, на которые

технолог вполне может опираться при проектировании состава бетона. В то же время дипольный момент молекулы пластификатора имеет несколько расплывчатые величины: для пластификатора I группы эффективности он «более 4», для II – «2,5–4» [12], что делает результаты расчетов несколько неопределенными.

Мы попытались получить более «приземленную» формулу для расчета снижения водопотребности бетонной смеси ( $\Delta B$  в % от начального расхода воды  $B$ ), основывающуюся на сугубо технологических влияющих факторах, фигурирующих в предлагаемом методе проектирования состава бетона:

$$\Delta B = k_{\Pi} \cdot \sqrt{\frac{0,5 \cdot D}{\left(\frac{B}{\Pi}\right)_B}} \cdot V_T^{1,7} \cdot (1 - 0,0015 \cdot C_3 A^2), \quad (11)$$

где  $D$  – дозировка пластифицирующей добавки по сухому веществу, % от массы цемента;  $C_3 A$  – содержание  $C_3 A$  в цементе, %, а  $k_{\Pi}$  (в %) представляет собой коэффициент пластификации, зависящий от коэффициента эффективности пластифицирующей добавки (определяется ее видом) и удобоукладываемости бетонной смеси:

$$\text{для подвижной смеси} \quad k_{\Pi} = k_{\text{эф}} + 2 \cdot \text{ОК}, \quad (12)$$

$$\text{для жесткой} \quad k_{\Pi} = k_{\text{эф}} - 0,5 \cdot \text{Ж}. \quad (13)$$

Затем рассчитывают расход воды в бетонной смеси с пластифицирующей добавкой ( $B_d$  в кг) при условии сохранения ее заданной удобоукладываемости:

$$B_d = B \cdot \left(1 - \frac{\Delta B}{100}\right). \quad (14)$$

А далее по элементарным общеизвестным формулам корректируют состав бетона в зависимости от цели использования пластифицирующей добавки – повышение физико-механических характеристик бетона при сохранении расхода цемента либо экономия цемента при сохранении водоцементного отношения.

Проведена оценка точности расчетов в соответствии с данными (ориентировочные значения возможного снижения расхода цемента  $\Delta \Pi$  в % от расхода цемента в смеси без добавки) для суперпластификатора С-3, приведенными в [13]. Расчеты составов бетона и величин  $\Delta B$  (коэффициент эффективности добавки С-3 принят равным 70 %) произведены по изложенной методике (табл.1).

Таблица 1

## Возможное снижение расходов цемента и воды

Марка бетона	ОК, см	Снижение расхода цемента ( $\Delta Ц$ ) по [13] и воды ( $\Delta В$ ) по (4), %, при введении суперпластификатора С-3, %					
		0,4		0,8		1,2	
		$\Delta Ц$	$\Delta В$	$\Delta Ц$	$\Delta В$	$\Delta Ц$	$\Delta В$
М200	2...4	2...3	3,6	3...5	5,1	5...7	6,3
	4...5	3...4	4,0	5...7	5,7	7...9	6,9
	12...14	4...6	5,7	7...9	8,0	10...12	9,8
	22...24	6...8	7,5	10...12	10,5	12...15	12,9
М300	2...4	3...5	5,3	4...6	7,5	6...8	9,2
	4...5	4...6	5,9	8...10	8,3	10...12	10,2
	12...14	5...7	8,5	10...12	12,0	12...15	14,7
	22...24	12...15	11,3	18...20	15,9	20...22	19,5
М400	2...4	6...8	7,5	8...10	10,6	10...12	13,0
	4...5	8...10	8,3	10...12	11,8	12...15	14,5
	12...14	10...12	12,1	12...14	17,1	15...18	21,0
	22...24	12...15	16,1	18...20	22,8	20...25	27,9
М500	2...4	10...12	9,9	16...18	14,0	18...20	17,2
	4...5	12...15	11,0	18...20	15,6	20...22	19,1
	12...14	15...18	16,0	20...22	22,7	22...25	27,7
М600	2...4	12...14	12,4	18...20	17,5	20...22	21,5
	4...5	14...16	13,8	20...22	19,5	22...25	23,9
Коэффициент вариации, %		15,8		17,2		17,0	

Полученные результаты, на наш взгляд, достаточно убедительно свидетельствуют о действенности формулы (11) – коэффициенты вариации отклонений  $\Delta Ц$  от  $\Delta В$  вполне приемлемы.

Если бросить какой-либо предмет, например, камень, под некоторым углом к горизонту, то движение предмета может быть описано уравнением, приведенным на рис. 2.

Налицо аналогия кинетики перемещаемого тела с результирующей кривой, описывающей, согласно представлениями Н.А. Мошанского [14], коррозионную деструкцию материала в процессе эксплуатации как результирующую параллельно протекающих конструктивного и деструктивного процессов (рис. 2). И это дало возможность описать изменение прочности цементного камня при циклических воздействиях замораживания/оттаивания материала [15]. В полученном уравнении (рис. 2)  $n_{кр}$  – критическое количество циклов замораживания/оттаивания цементного камня с момента начала эксплуатации ( $f_0$  – начальная прочность цементного камня, МПа) до допустимой потери прочности ( $\delta$  в %);  $\alpha_{max}$  – максимально

возможная степень гидратации цемента, %;  $\alpha_0$  – фактическая степень гидратации цемента, %;  $W_0$  – объем открытых капиллярных пор, % по объему;  $k_D$  – коэффициент, характеризующий скорость протекания деструктивных процессов, МПа/цикл, и зависящий от режима испытаний и структурных характеристик материала.

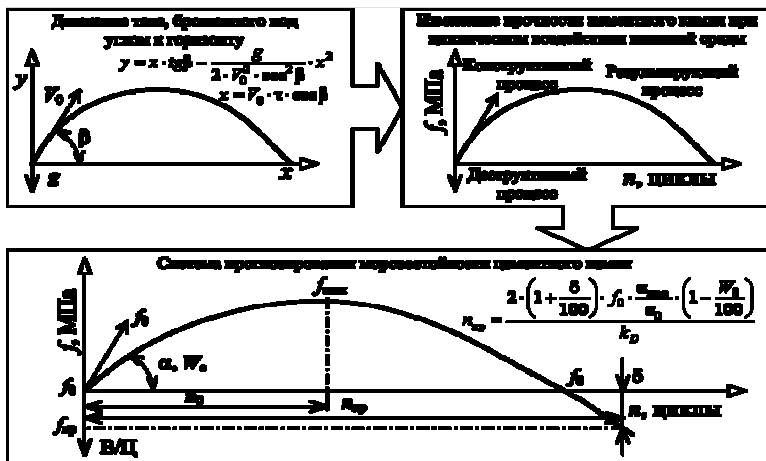


Рис. 2. Прогнозирование морозостойкости цементного камня

Степень гидратации цемента можно либо определить экспериментально, либо рассчитать[16]. Объем открытых капиллярных пор определяется, например, по известным зависимостям проф. Г.И. Горчакова, А.Е. Шейкина, И.Н. Ахвердова или иным.

Переход от морозостойкости цементного камня к морозостойкости тяжелого бетона ( $F_5$  в циклах) выполнен посредством системы безразмерных коэффициентов, учитывающих загрязненность смеси заполнителей ( $k_{гр}$ ), содержание воздуха в бетонной смеси ( $k_в$ ) и содержание трехкальциевого алюмината в цементе ( $k_{C_3A}$ ):

$$F_5 = n_{кр} \cdot k_{гр} \cdot k_в \cdot k_{C_3A} \cdot f_0 \quad (15)$$

В свою очередь, для расчета коэффициентов, входящих в (15), предложены следующие зависимости:

$$k_{гр} = 1 - 0,02 \cdot \sqrt{G_{гр}^3}, \quad (16)$$

$$k_в = 1 + 0,2 \cdot V_{вх}^2, \quad (17)$$

$$k_{C_3A} = 1 - 0,0015 \cdot (C_3A - 2)^2, \quad (18)$$



где:  $G_{гр}$  – загрязненность смеси заполнителей (содержание пылевидных и глинистых частиц), % по массе;  $V_{вх}$  – объем дополнительно вовлеченного воздуха в бетонную смесь, за счет использования воздухоовлекающих и газообразующих добавок, %;  $C_3A$  – содержание трехкальциевого алюмината в цементе, % по массе.

Как оказалось, точность расчетов морозостойкости бетона по предложенной схеме сопоставима с достоверностью прогнозных моделей А.Е. Шейкина, М.Ш. Файнера, Л.М. Добшица и существенно выше, чем по ГОСТ 10060.4-95 «Структурно-механический метод определения морозостойкости».

**Таким образом,** предложена методика проектирования состава бетона для сборного и монолитного строительства, базирующаяся на отличных от традиционных методик принципах, и дающая достаточную для практических целей точность расчетов.

1. Скрамтаев Б.Г., Шубенкин П.Ф., Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов. – М.: Стройиздат, 1966. – 160 с. 2. Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов. – М.: Стройиздат, 1975. – 272 с. 3. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1979. – 144 с. 4. Дворкин Л.И. Многофакторное прогнозирование свойств бетона и анализ эффективности их обеспечения. Автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.23.05 / Моск. инж.-строит. ин-т им. В.В. Куйбышева. – М., 1983. – 45 с. 5. М.Ш. Шлаен. Концепция оптимального проектирования бетона // Бетон и железобетон.–1992.–№ 1.– С. 15-16. 6. Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. Многопараметрические задачи проектирования составов бетона // Бетон и железобетон.–2002.–№ 2.– С. 6-9. 7. 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. 8. Сторк Ю. Теория состава бетонной смеси.–Л.: Стройиздат, 1971.–238 с. 9. Шмигальский В.Н. Оптимизация составов цементобетонов. – Кишинев: Штиинца, 1981. – 124 с. 10. Несветаев Г.И. Бетоны: учебное пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2011. – 381 с. 11. Бибиц М.С., Суходоева, Бабицкий В.В., Семенюк С.Д., Оценка прочности твердеющего бетона // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 22. – Рівне, 2011. – с. 37-44. 12. Юхневский П.И. Влияние химического строения молекул химических добавок пластификаторов на свойства цементных композиций // Проблемы современного бетона и железобетона: Материалы III Международного симпозиума. – Минск, 2011. – с. 515-524. 13. Баженов Ю.М. Технология бетона: Учеб. Пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1987. – 415 с. 14. Мощанский Н.А. Плотность и стойкость бетонов. М.: – Госстройиздат, 1951. – 175 с. 15. Ковшар С.Н. Оценка и прогнозирование морозо- и солестойкости тяжелого бетона с учетом изменения конструктивных и деструктивных факторов. Автореф. дис. ...канд.техн. наук: 05.23.05 / Белорусский национальный технический университет. – Мн., 2010. – 20 с. 16. Бабицкий В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В.В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – №1. – с. 76-79