

УДК 666.97

*Доктора техн. наук Л.И. Дворкин,  
О.Л. Дворкин (НУВХП, г.Ровно)*

*L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin*

## **МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ БЕТОНА**

### **MULTIPARAMETRIC CONCRETE COMPOSITIONS DESIGN**

Многолетний опыт применения бетона показывает, что главным условием его эффективности и надежности является соответствие качественных показателей материала особенностям работы в конструкциях и сооружениях. Всесторонний учет этих особенностей необходим при назначении проектных требований и проектировании оптимальных составов бетонной смеси, обеспечивающих комплекс требуемых

свойств, – *многопараметрическом проектировании составов бетона (МПСБ).*

В современной строительной практике широко используется расчетно-экспериментальный метод проектирования составов бетона с требуемой удобоукладываемостью бетонной смеси и прочностью бетона [1...5]. Этот метод основан на ряде объективных зависимостей: прочности бетона от водоцементного отношения (правило В/Ц),

водопотребности бетонной смеси от показателя удобоукладываемости в определенном диапазоне В/Ц (правило постоянства водопотребности), расхода цемента от содержания песка в смеси заполнителей при постоянном В/Ц (правило оптимальной доли песка в смеси заполнителей) и др. [2,3].

Наряду с развитием исследований по схеме структура-состав-свойства бетона совершенствование расчетной методологии проектирования составов бетона идет за счет применения математического моделирования, при котором реализуется кибернетический подход к решению сложных технических задач.

Математические модели, например в виде полиномиальных уравнений, позволяют находить значения факторов состава при заданных или максимально

(минимально) возможных значениях показателей свойств бетона при заданных условиях оптимальности и ограничениях.

Еще основоположник практической методологии проектирования составов бетона Д. Абрамс указывал, что составы бетона должны обеспечивать необходимые свойства бетона наиболее эффективным образом [5]. Практика допускает применение разнообразных простых и комплексных, технических, экономических и технико-экономических критериев оптимальности (табл. 1). Критерии оптимальности в задачах оптимизации состава бетона могут стремиться к некоторому абсолютному или условному экстремуму, а в многокритериальных задачах находятся в компромиссной области.

Таблица 1

Основные критерии оптимальности при проектировании составов и структуры бетона

$P_i \rightarrow \max (\min) ,$ где $P_i$ – подвижность бетонной смеси, прочность, морозостойкость, усадка бетона и др (или комплекс однозначно связанных свойств)
$\frac{P_i}{X} \rightarrow \max (\min) ,$ где $X$ – удельный расход цемента, заполнителей, добавок, тепловой, электрической энергии и др.
$X \rightarrow \min$
$\frac{X}{P_i} \rightarrow \min$
$C \rightarrow \min ,$ где $C$ – стоимость 1 м <sup>3</sup> бетона, конструкции, сооружения; стоимость ресурсов; прибыль; приведенные затраты и др.

Наиболее характерными при оптимизации составов бетона являются задачи, предполагающие достижение условного экстремума, т.е. максимально (минимально) возможного значения критерия при заданных ограничениях

(например, минимально возможного расхода цемента при заданных значениях прочности бетона, удобоукладываемости бетонной смеси и др.).

Для определения цементно-водного отношения, обеспечивающего заданную

прочность бетона при сжатии, нашли распространение количественные зависимости, основанные на известной формуле Болемея, которые позволяют с помощью обобщенных коэффициентов  $A$  и  $b$  ориентировочно учесть изменчивость исходных материалов и структуры бетона [1]:

$$R_b = A R_{ц} (Ц/В - b), \quad (1)$$

где  $A, b$  – эмпирические коэффициенты.

При высоком уровне стабильности качества исходных материалов и при отсутствии предварительных экспериментальных данных широко используются для нахождения составов справочные рекомендации в виде таблиц или графиков [4].

Для обеспечения высокой надежности работы бетона в конструкциях и сооружениях необходимо наряду с

прочностью нормировать параметры и других свойств бетона (морозостойкости  $F$ , водонепроницаемости  $W$ , усадочных деформаций  $\epsilon_{ус}$  и др.). Решение этой задачи требует часто трудоемких и длительных лабораторных подборов составов бетона. Как в ряде европейских, так и американских стандартах задачу обеспечения проектных свойств бетона предлагается решать ориентировочно с помощью ограничений по водоцементному отношению ( $В/Ц$ ). Обычно предлагается [4] ограничивать  $В/Ц$  исходя из условий эксплуатации бетона (табл. 2).

При всей важности  $В/Ц$  как одного из интегральных параметров качества бетона, можно утверждать, что не все показатели нормируемых свойств бетона однозначно связаны с  $В/Ц$  [1,5].

Таблица 2

Рекомендуемые [4] максимальные значения  $В/Ц$

Тип конструкции	Максимальные $В/Ц$	
	Увлажняемые конструкции, подверженные воздействию замораживания и оттаивания	Конструкции, подверженные воздействию морской воды или сульфатной среды
Тонкостенные и густоармированные конструкции	0,45	0,40
Другие виды конструкций	0,5	0,45

В общем виде задача проектирования составов бетона с комплексом различных свойств сводится к схеме, приведенной на рис. 1. В соответствии с этой схемой при нормировании различных свойств возможен интервал значений не только по  $В/Ц$ , но и по другим параметрам состава (расходу воды, доле песка в смеси заполнителей, содержанию цемента, расходу вовлеченного воздуха). При этом обеспечивать нормируемые свойства бетонной смеси и бетона целесообразно во многих случаях при некоторых компо-

мисных значениях параметров состава бетона, обеспечивающих экономию ресурсов.

Для многопараметрического проектирования составов бетона удобно использование комплекса расчетных зависимостей, связывающих требуемые показатели соответствующих свойств и параметры состава. В табл. 3 приведены примеры расчетных зависимостей, предложенных нами на основе экспериментальных данных [3], которые наряду с другими известными зависимостями можно использовать в алгоритмах проектирования составов.

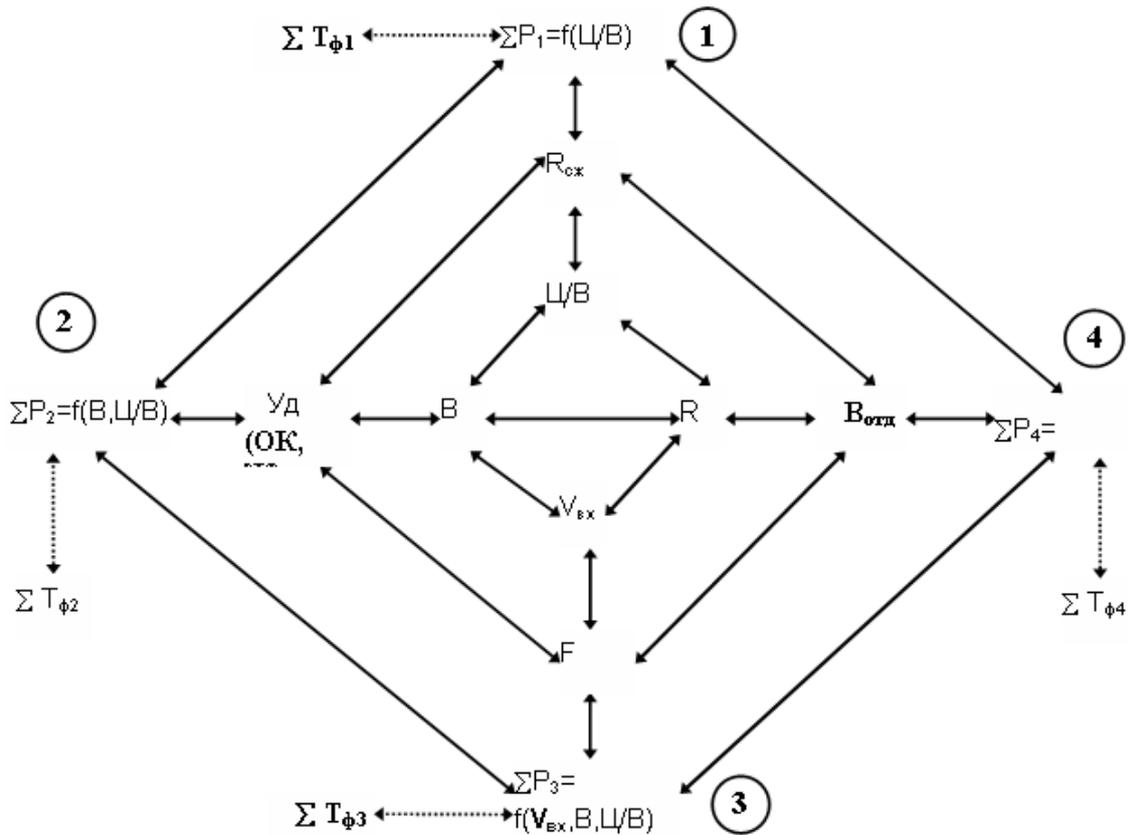


Рис. 1. Блок-схема многопараметрического проектирования составов бетона ( $\Sigma P$  – группа свойств бетона, связанных с определенными смесевыми параметрами;  $\Sigma T_{\phi}$  – группа технологических факторов, влияющих на свойства бетона): 1 – определение  $R_{сж}$  для достижения  $\Sigma P_1=f(\text{Ц/В})$  и требуемого Ц/В; 2 – определение расхода воды (В) для достижения  $\Sigma P_2=f(B, \text{Ц/В})$ ; 3 – определение объема вовлеченного воздуха ( $V_{вх}$ ) для достижения  $\Sigma P_3=f(V_{вх}, B, \text{Ц/В})$ ; 4 – определение параметра доли песка с смеси заполнителей ( $r$ ) для достижения  $\Sigma P_4=f(r, V_{вх}, B, \text{Ц/В})$   $F$  – морозостойкость бетона;  $Уд$ ,  $В_{отд}$  – соответственно удобоукладываемость и водоотделение бетонной смеси

Для более полного учета параметров состава, технологии изготовления и твердения бетона возможно увеличение прогнозирующей способности расчетных зависимостей с помощью введения мультипликативных коэффициентов, интегрирующих влияние ряда факторов (условий твердения, химических добавок и т.д.), и использования правила "приведенного" Ц/В.

Выражение мультипликативного коэффициента  $rA_i$  в формуле прочности бетона (1) можно представить в виде:

$$rA_i = A A_1 \dots A_i \dots A_n, \quad (2)$$

где  $A_i$  – эмпирический коэффициент, учитывающий дополнительное влияние на выход прочности  $i$ -го фактора ( $i=1 \dots n$ ). Коэффициент  $A$  можно находить с учетом известных рекомендаций [1, 2].

Эмпирические формулы для расчета показателей свойств бетона

Свойства бетона	Эмпирическая формула
1. Прочность бетона на растяжение при изгибе ( $R_{p.и.}$ ), МПа	$R_{p.и.} = 0,045R_{ц} (Ц/В + 0,064)$
2. Прочность бетона на растяжение при раскалывании ( $R_{p.p.}$ ), МПа	$R_{p.p.} = 0,031R_{ц} (Ц/В + 0,064)$
3. Прочность бетона при осевом растяжении ( $R_{o.p.}$ ), МПа	$R_{o.p.} = 0,026R_{ц} (Ц/В + 0,064)$
4. Динамический модуль упругости ( $E_d$ ), $10^4$ МПа	$E_d = 205R_{ц} (Ц/В + 2,18)$
5. Условная деформативность ( $\epsilon_y$ )	$\epsilon_y = \frac{R_{p.p.}}{E_d} = 4 \cdot 10^{-6} R_{ц} (Ц/В + 1,5)$
6. Морозостойкость (F)	$F = A_1 R_{сж}^{A_2} \exp^{0,35 V_{вх}}$ Значения коэффициентов $A_1$ и $A_2$ зависят от водосодержания бетонных смесей ( $A_1=0,34...2,48$ ; $A_2=1,68...1,25$ )
7. Коэффициент фильтрации бетона ( $K_{ф}$ )	$K_{ф} = AR_{сж}^m$ Для рядовых материалов $A \approx 126$ ; $m \approx 7,7$

**Примечание:**  $R_{ц}$  – активность цемента;  $R_{сж}$  – прочность бетона при сжатии.

Правило В/Ц в традиционной формулировке справедливо при определенных ограничениях для тяжелых бетонов и не учитывает влияние минеральных добавок, объема вовлеченного воздуха, пористости заполнителей. Исходя из общей физической гипотезы о решающем влиянии на прочность бетона отношения объема гидратированного цемента к общему объему пор, целесообразно использовать правило, констатирующее однозначную связь прочности бетона с "приведенным Ц/В" (правило "приведенного Ц/В"), учитывающее наряду с цементно-водным отношением влияние объема пор, обусловленных заполнителями и вовлеченным воздухом, а также возможность частичной замены цемента активными минеральными добавками:

$$(Ц/В)_{пр} = \frac{Ц + K_{ц,э}Д}{В + П_3 V_3 + V_{вх}}, \quad (3)$$

где  $V_{вх}$  – объем воздуха, находящийся в бетонной смеси;  $Д$  – расход минеральной добавки,  $кг/м^3$ ;  $K_{ц,э}$  – коэффициент цементирующей эффективности или "цементный эквивалент" 1 кг добавки;  $П_3$  – пористость заполнителя;  $V_3$  – абсолютный объем пористого заполнителя,  $л/м^3$ .

Однозначная связь прочности бетона с "приведенным Ц/В" справедлива как для тяжелых, так и легких бетонов (рис. 2), а также бетонов с активными добавками и позволяет выполнять расчет их составов по физически обоснованным алгоритмам.

Для определения Ц/В, обеспечивающего прочность бетона в 28-суточном возрасте, удобно использовать обобщенную формулу прочности бетона [3]:

$$R_{сж} = p A_i R_{ц} ((Ц/В)_{пр} - 0,5). \quad (4)$$

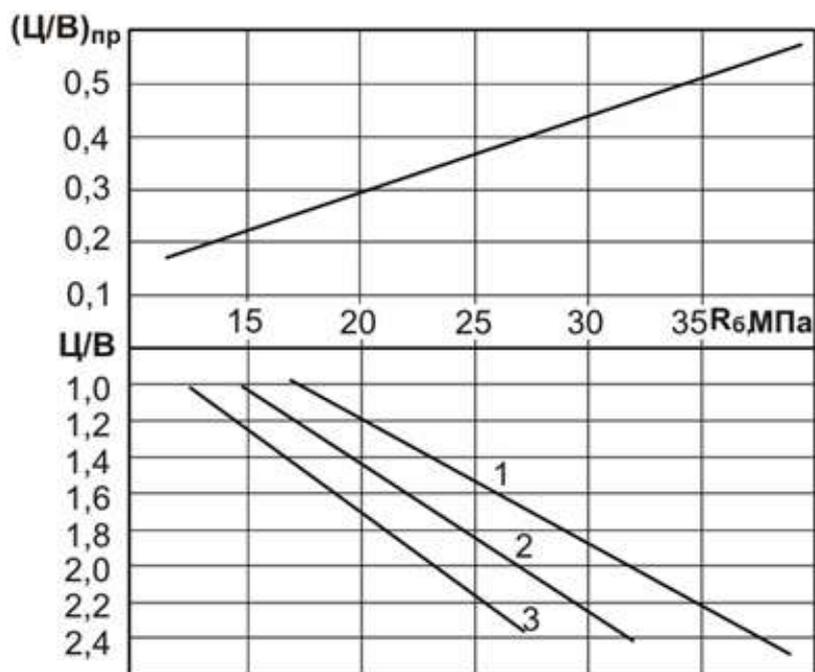


Рис. 2. Зависимость прочности конструктивных керамзитобетонов от Ц/В и  $(C/V)_{пр}$ :  
1 – пористость керамзита 0,4; 2 – 0,55; 3 – 0,7

Все задачи МПСБ можно разделить на два типа:

1) рецептурные задачи, заключающиеся в определении удельных расходов компонентов, обеспечивающих нормируемый комплекс свойств бетона;

2) рецептурно-технологические задачи, заключающиеся в определении наряду с удельными расходами компонентов значений тех или иных технологических факторов, характеризующих условия получения и твердения бетонной смеси и бетона.

Задачи обоих типов являются оптимизационными и могут считаться решенными лишь при выполнении сформулированных условий оптимальности.

Алгоритмы рецептурных задач (рис. 1) предполагают нахождение базовых параметров смеси – цементно-водного отношения (Ц/В), расхода воды (В), объема

вовлеченного воздуха ( $V_{вх}$ ) и доли песка в смеси заполнителей ( $r$ ), обеспечивающих наиболее эффективным образом комплекс нормируемых свойств. Алгоритмы рецептурно-технологических задач (рис.1) предполагают кроме определения базовых параметров смеси и нахождения оптимальных параметров технологических процессов ( $\sum T_{\phi}$ ) (температуру, длительность твердения, режимов уплотнения и т.п.).

Последовательность нахождения параметров смеси определяется особенностями конкретных задач МПСБ. Ниже для примера приведены возможные схемы определения Ц/В в задачах с нормируемыми (требуемыми) значениями прочности при сжатии ( $R_{сж}^{тр}$ ) и морозостойкости ( $F^{тр}$ ).

Задача А

Условие:

$$R_{сж} = R_{сж}^{тр}$$

$$F \geq F^{тр}$$

Не вводится воздухововлекающая добавка

Решение:

$$\left. \begin{array}{l} 1. R_{сж}^{тр} = f(\text{Ц/В})_1 \\ 2. F = f(\text{Ц/В})_2 \end{array} \right\} \text{Ц/В}$$

При  $(\text{Ц/В})_1 > (\text{Ц/В})_2$  Ц/В =  $(\text{Ц/В})_1$

При  $(\text{Ц/В})_2 > (\text{Ц/В})_1$  Ц/В =  $(\text{Ц/В})_2$

Задача Б

Условие:

$$R_{сж} = R_{сж}^{тр}$$

$$F \geq F^{тр}$$

Вводится воздухововлекающая добавка  
( $V_{вх}$  – объем вовлекаемого воздуха)

Решение:

$$1. F = f(R_{сж}, V_{вх}^{тр})$$

$$\text{при } R_{сж} = R_{сж}^{тр}$$

$$2. R_{сж}^{тр} = f(\text{Ц/В}, V_{вх})$$

$$\text{при } V_{вх} = V_{вх}^{тр}$$

Реализация приведенных и других подобных алгоритмов возможна благодаря однозначной связи группы важнейших физико-механических свойств бетона с Ц/В. В эту группу свойств входят прежде всего прочностные показатели, ряд деформативных и других свойств, определяемых соотношением объема гидратированного цемента и пористости бетона.

Ряд других свойств бетона могут определяться другими показателями состава (расходом воды, долей песка в смеси заполнителей и др). При отсутствии однозначных зависимостей приходится решать более сложные многофакторные задачи.

При выборе количественных зависимостей должны рассматриваться как целевая установка конкретной задачи, так и имеющаяся исходная информация. Например, для простейших задач, включающих определение прочности тяжелого бетона в условиях нормального твердения без минеральных, воздухововлекающих и других добавок, могут быть использованы наиболее известные формулы [5]. При наличии развернутой информации о качестве исходных материалов коэффициент А в формулах прочности бетона уточняется

согласно рекомендациям [1,2], в противном случае берется по укрупненным рекомендациям или вообще не учитывается [5].

В ряде многопараметрических задач достижение комплекса нормируемых свойств невозможно без специальных технологических средств – применения добавок, регулирования температуры и др. В частности, без применения таких технологических средств могут оказаться недостижимыми требования обеспечения высокой подвижности бетонной смеси и низкой усадки, пониженного тепловыделения и высокой прочности и т. д. В еще большей мере усложняются задачи при ограничениях технологических параметров (температуры, длительности твердения, типа опалубки и др.).

В табл. 4 приведены некоторые примеры решения задач МПСБ, иллюстрирующие указанное положение.

Оптимизация составов бетонных смесей в задачах МПСБ предполагает сужение интервалов по параметрам смеси и сдвиг необходимых значений Ц/В и В в меньшую сторону. Выбор оптимизационных решений проводится с учетом конкретных возможностей и ограничений и направлен на достижение заданных условий оптимальности.

Примеры определения Ц/В и В в задачах МПСБ

<p>Определить необходимое Ц/В для получения бетона на рядовых материалах (<math>R_{ц}=50</math> МПа):</p> <p>1) с пределом прочности при сжатии в 28 сут. <math>R_{сж}=30</math> МПа и растяжении при изгибе <math>R_{р.и}=4</math> МПа</p>	
<p>Основные расчетные формулы:</p> $R_{сж} = 0,4 \cdot K \cdot R_{ц} \cdot Ц/В$ $(K=0,95)$ $R_{р.и} = 0,08(10R_{сж})^{2/3}$	<p>Расчетные Ц/В:</p> $Ц/В_{R_{сж}} = 1,58$ $Ц/В_{R_{р.и}} = 1,86$
$Ц/В_{R_{р.и}} > Ц/В_{R_{сж}}$	
<p>2) с пределом прочности при сжатии в 28 сут. <math>R_{сж}=30</math> МПа и тепловыделением <math>Q=68000</math> кДж (<math>B=190</math> л/м<sup>3</sup>)</p>	
<p>Основные расчетные формулы:</p> $R_{сж} = 0,4 \cdot K \cdot R_{ц} \cdot Ц/В$ $(K=0,95)$ $Q = g_7 Ц$ $g_7 = 26,15R_{ц}^{2/3}$	<p>Расчетные Ц/В:</p> $Ц/В_{R_{сж}} = 1,58$ $Ц/В_Q = 1,01$
$Ц/В_{R_{сж}} > Ц/В_Q$	
<p>3) с подвижностью бетонной смеси <math>OK=20</math> см (<math>B=220</math> л/м<sup>3</sup>) и усадкой <math>\epsilon_{yc}=0,3</math> мм/м</p>	
<p>Основные расчетные формулы:</p> $\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125B\sqrt{B}$ $B = f(OK)$	<p>Расчетные расходы воды [1,2]:</p> $V_{OK} = 220 \text{ л/м}^3$ $V_{yc} = 179 \text{ л/м}^3$
$V_{OK} > V_{yc}$	

Решение задач многопараметрического проектирования составов бетона целесообразно выполнять с помощью набора компьютерных программ или компьютерных систем, позволяющих рассчитывать базовые составы, корректировать их с учетом производственной

информации, проводить статистический контроль прочности и других нормируемых свойств бетона, а также решать ряд смежных задач, связанных с материально-техническим обеспечением производства и учетом расходуемых материалов.

**Список литературы**

1. Баженов, Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов [Текст] / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1975. – 272 с.
2. Сизов, В.П. Проектирование составов тяжелого бетона [Текст] / В.П. Сизов. – М.: Стройиздат, 1980. – 144 с.
3. Дворкин, О.Л. Проектирование составов бетона. (Основы теории и методологии) [Текст] / О.Л. Дворкин. – Ровно: Изд-во УГУВХП, 2003. – 265 с.
4. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1.-Detroit, 1980. – 150 p.
5. Дворкин, Л.И, Основы бетоноведения [Текст] / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – С.Пб.: Строй-бетон, 2006. – 689 с.

**Ключевые слова:** состав бетона, прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, усадка, водоцементное отношение.

*Аннотации*

У статті подано основні положення методології проектування складів бетону з комплексом необхідних властивостей (багатопараметричне проектування складів бетону). Показана можливість збільшення прогнозуючої здатності розрахункових залежностей, що зв'язують показники властивостей бетону з параметрами його складу, і спільного їх аналізу.

В статье приведены основные положения методологии проектирования составов бетона с комплексом требуемых свойств (многопараметрическое проектирование составов бетона). Показана возможность увеличения прогнозирующей способности расчетных зависимостей, связывающих показатели свойств бетона с параметрами его состава, и совместного их анализа.

In article the basic principles of methodology of concrete compositions design with the complex of the required properties (multiparametric design of concrete compositions) are resulted. Possibility of increase of forecasting ability of calculation dependences, which connected the indexes of properties of concrete with the parameters of it composition, and their joint analysis is shown.