

**Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року**

---

УДК 666.97

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.155.2015.91609>

**МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАРАНЕЕ ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

**Д-р техн. наук Л.И. Дворкин, д-р техн. наук О.Л. Дворкин**

**МЕТОДОЛОГІЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З НАПЕРЕД ЗАДАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

**Д-р техн. наук Л.І. Дворкін, д-р техн. наук О.Л. Дворкін**

**METHODOLOGY OF MULTIPARAMETER DESIGN OF CONSTRUCTION COMPOSITE MATERIALS WITH PREDETERMINED PROPERTIES**

**Doct. of techn. Sciences L. Dvorkin, doct. of techn. Sciences, O. Dvorkin**

*В статье развивается методология расчетного проектирования составов бетонов. Показана возможность существенного увеличения прогнозирующей способности зависимостей прочности бетона с использованием модифицированного цементно-водного отношения, учитывающего влияние минеральных добавок, а также объем вовлеченного воздуха. Показана возможность увеличения числа учитываемых факторов, влияющих на прочность бетона, при введении в расчетные зависимости мультипликативного коэффициента.*

**Ключевые слова:** проектирование составов бетонов, цементно-водное отношение, прочность бетона, мультипликативный коэффициент.

*У статті розвивається методологія розрахункового проектування складів бетонів. Показана можливість суттєвого збільшення прогнозуючої здатності залежностей міцності бетону з використанням модифікованого цементно-водного відношення, що враховує вплив мінеральних добавок, а також об'єм втягнутого повітря. Показана можливість збільшення числа врахованих факторів, що впливають на міцність бетону, при введенні в розрахункові залежності мультиплікативного коефіцієнта.*

**Ключові слова:** проектування складів бетонів, цементно-водне відношення, міцність бетону, мультиплікативний коефіцієнт.

*The methodology of calculated design of concrete mixtures is developed in the paper. The possibility of a significant increase in predictive ability of computational dependences of concrete strength using a modified cement-water ratio, taking into account the effect of mineral additives introduced into the concrete mixture and the amount of entrained air is shown. The possibility of increasing the number of considered factors affecting the strength of the concrete, when introduced the multiplicative factor into the design dependences, is also shown. A general scheme of multi-parameter concrete mixtures design, suggesting the possibility of solving a number of problems to ensure the complex of design properties of concrete, is proposed. The essence and abilities of the computer program of concrete mixtures design and management at statistical control of concrete strength is shown. Algorithms for design of concrete mixtures for road and hydraulic concrete, steamed concrete, concrete for use in low and high temperatures, fine-grained and light-weight concrete, etc. are developed.*

**Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року**

---

*Keywords: design of concrete mixtures, cement-water ratio, concrete strength, multiplicative factor.*

**Введение.** Проектирование составов композиционных строительных материалов с комплексом требуемых свойств является одной из главных задач их технологии. Эта задача решается путем сугубо экспериментального подбора или расчетно-экспериментальным методом. Типичным композиционным строительным материалом является цементный бетон.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.** В современной строительной практике широко используется расчетно-экспериментальный метод проектирования составов бетона с требуемой удобоукладываемостью бетонной смеси и прочностью бетона. Этот метод основан на ряде закономерностей и допущений: зависимости прочности бетона от водоцементного отношения (правило В/Ц), однозначной зависимости водопотребности бетонной смеси от показателя удобоукладываемости в определенном диапазоне В/Ц (правило постоянства водопотребности), зависимости расхода цемента от содержания песка в смеси заполнителей при постоянном В/Ц (правило оптимальной доли песка в смеси заполнителей).

Использование данных зависимостей позволяет, основываясь на методе абсолютных объемов найти с применением соответствующих таблиц, графиков или формул расходы материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси или на замес бетоносмесителя.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В России, Украине и других странах СНГ для определения В/Ц, обеспечивающего прочность бетона при сжатии ( $R_{сж}$ ), нашли распространение количественные зависимости, основанные на известной формуле Боломея, которые

позволяют учесть изменчивость исходных материалов и структуры бетона [1-4]:

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

где  $A$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты;

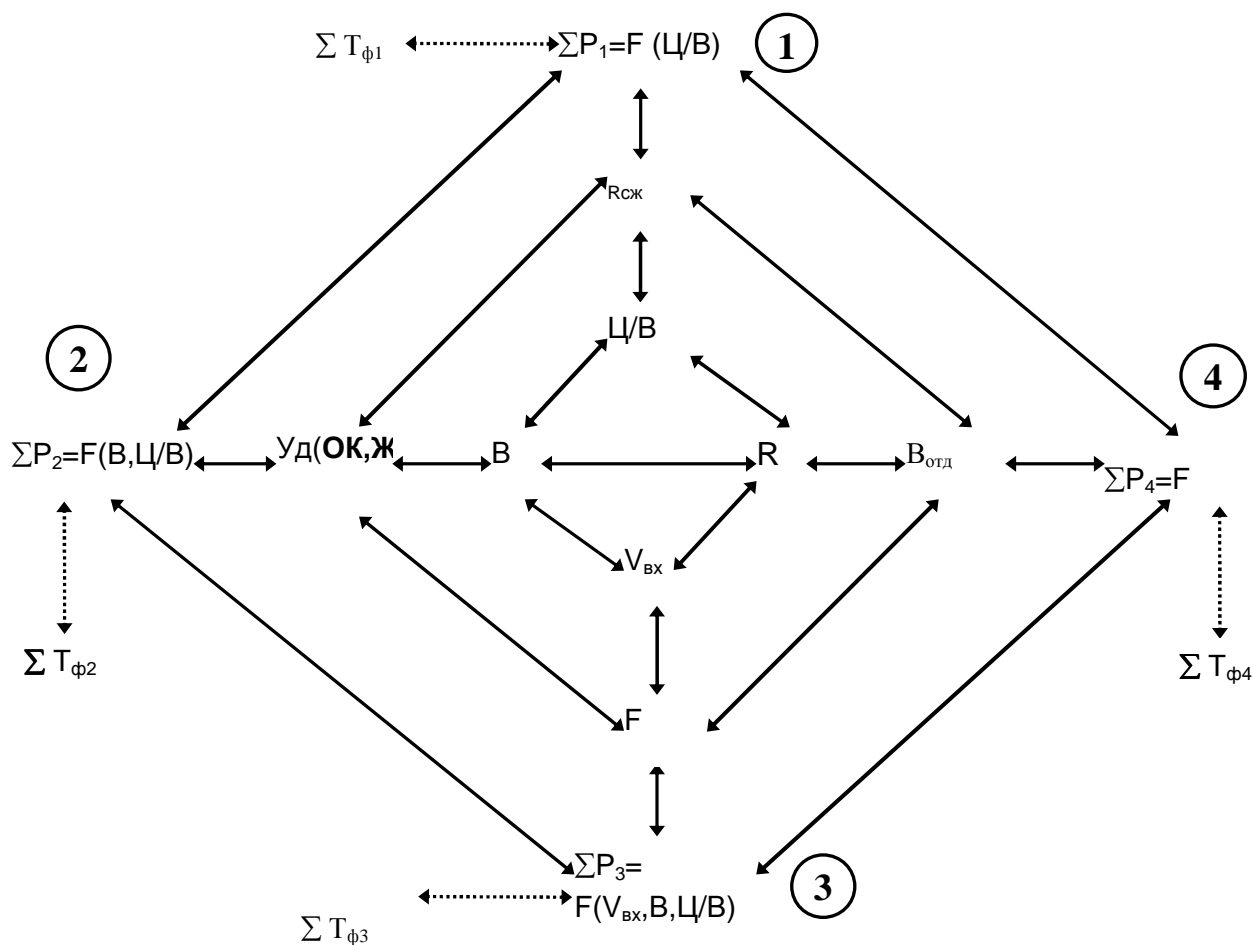
$R_b$  – активность цемента.

В странах Западной Европы, США и Канаде при высоком уровне стабильности качества исходных материалов и при отсутствии предварительных экспериментальных данных широко используются справочные рецептурные рекомендации в виде таблиц или графиков.

В современных условиях для обеспечения высокой надежности работы бетона в конструкциях и сооружениях возникает необходимость наряду с прочностью нормировать параметры и других свойств бетона (морозостойкости, водонепроницаемости, усадочных деформаций и др.). Решение этой задачи требует часто трудоемких и длительных лабораторных подборов составов бетона. Ориентировочно, как в европейских, так и американских стандартах ее предлагается решать с помощью ограничения В/Ц. В частности американский стандарт предлагает ограничивать В/Ц исходя из условий эксплуатации бетона [5].

Вместе с тем 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.

В общем виде задача проектирования составов бетона с комплексом различных свойств (многопараметрическое проектирование составов) сводится к следующей схеме (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 (по расходу воды, доле песка в смеси заполнителей, содержанию цемента, расходу вовлеченного воздуха) [3,4].



**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 прочности бетона  $R_{сж}$  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 в 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

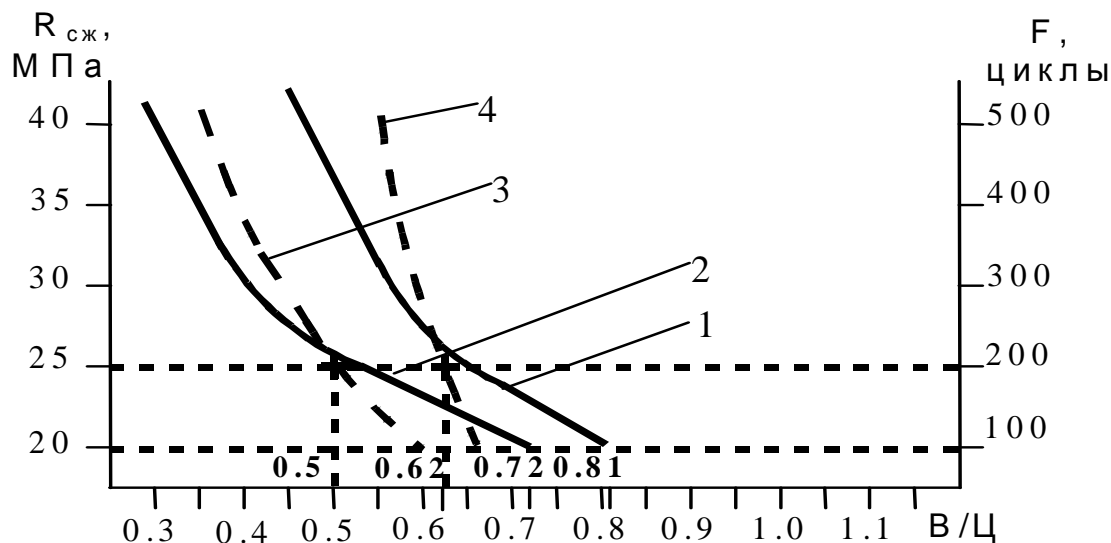


Рис.2. Изменение В/Ц в зависимости от заданных значений прочности ( $R_{сж}$ ) и морозостойкости ( $F$ ) бетона: 1.  $R_{сж}$ , без вовлеченного воздуха; 2.  $R_{сж}$ , 20 л. вовлеченного воздуха; 3.  $F$ , без вовлеченного воздуха; 4.  $F$ , 20 л. вовлеченного воздуха

#### **Определение цели и задачи исследования.**

Обеспечивать нормируемые свойства можно или выбирая минимально возможные значения В/Ц, расхода воды и т.д. или с помощью специальных технологических приемов достигать некоторые компромиссные значения параметров состава бетона, обеспечивающих экономию ресурсов. В последнем случае выполняется оптимизация состава бетона. Например (рис.2), для обеспечения прочности бетона при сжатии не менее 20 МПа и морозостойкости не менее F200 необходимо принять В/Ц не более 0,5. При введении воздухововлекающей добавки (2% вовлеченного воздуха) для обеспечения указанных требований можно увеличить В/Ц до 0,62.

Все задачи многопараметрического проектирования составов бетона 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.

#### **Основная часть исследования.**

Для многопараметрического проектирования составов бетона удобно использование комплекса расчетных зависимостей, связывающих показатели соответствующих свойств и параметры состава.

Для более полного учета параметров состава, технологии изготовления и твердения бетона возможно увеличение прогнозирующей способности известных расчетных зависимостей с помощью введения мультипликативных коэффициентов, интегрирующих влияние ряда факторов (учитывающих условия твердения, влияние химических добавок и т.д.) и использования правила "модифицированного (приведенного)" Ц/В [3,4].

**Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року**

Выражение мультипликативного коэффициента  $\rho A_i$  можно представить в виде:

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

где  $A_i$  – коэффициент, учитывающий дополнительное влияние на значение прочности  $i$ -го фактора ( $i=1 \dots n$ ).

Как известно, зависимость прочности бетона от В/Ц (правило В/Ц) справедливо при определенных ограничениях для тяжелых бетонов и не учитывает пористость и другие особенности заполнителей [2]. Исходя из общей физической гипотезы о решающем влиянии на прочность бетона отношения объема гидратированного цемента к общему объему пор, нами предложена зависимость (правило), констатирующая однозначную связь прочности бетона с "модифицированным Ц/В"  $(\text{Ц/В})_{\text{пр}}$  (правило "модифицированного 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:

$$(\text{Ц/В})_{\text{пр}} = \frac{\text{Ц} + K_{\text{ц.э}} D}{B + \Pi_3 V_3 + V_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{вх}}$  – объем воздуха, находящийся в бетонной смеси;

$D$  – расход минеральной добавки, кг/м<sup>3</sup>;

$K_{\text{ц.э}}$  – коэффициент цементирующей эффективности или "цементный эквивалент" 1 кг добавки;

$\Pi_3$  – пористость заполнителя;  $V_3$  – абсолютный объем пористого заполнителя, л/м<sup>3</sup>.

Однозначная связь прочности бетона с "модифицированным Ц/В" справедлива как для тяжелых, так и легких бетонов, 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

общую формулу прочности бетона, учитывающую мультипликативный коэффициент  $\rho A_i$  и выражение "модифицированного Ц/В":

$$R_{\text{сж}} = \rho A_i R_{\text{ц}} \left( \frac{\text{Ц} + K_{\text{ц.э}} D}{B + V_{\text{вх}}} - 0,5 \right) \quad (4)$$

Обычная технологическая информация позволяет учесть в мультипликативном коэффициенте до 2...3 дополнительных коэффициентов  $A_i$ .

На основе известных в бетоноведении, а также модифицированных и новых расчетных зависимостей предложенных нами, разработаны алгоритмы проектирования составов бетонов для дорожного и гидротехнического строительства, пропариваемых бетонов и бетонов для использования в условиях низких и повышенных температур, бетонов с активными минеральными добавками и мелкозернистых бетонов, легких бетонов [3,4].

Решение задач многопараметрического проектирования составов бетона целесообразно выполнять с помощью набора компьютерных программ, позволяющих рассчитывать базовые составы бетона, корректировать их с учетом производственной информации, проводить статистический контроль прочности и других нормируемых свойств бетона с построением технологических карт и решать ряд смежных задач, связанных с материально-техническим обеспечением производства и учетом расходуемых материалов.

Нами разработана компьютерная программа проектирования и управления составами бетонных смесей, которая позволяет проектировать базовые составы бетона, проводить статистический контроль качества бетона с построением технологических (контрольных) карт и корректирование составов бетона при изменении характеристик исходных материалов, а также недопустимых

**Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року**

колебаниях прочности бетона и подвижности бетонной смеси.



Рис.3. Общий вид контрольной карты при статистическом контроле прочности бетона

В качестве контролируемых параметров для построения технологической карты принимаются средние значения фактической прочности бетона на сжатие в партии, определенные по результатам испытания проб.

Статистический контроль прочности бетона проводится в соответствии с действующими нормативно-методическими руководствами. Для построения технологической карты (рис.3) рассчитывают исходные статистические параметры на текущий анализируемый статистический период: коэффициенты вариации, минимально допустимое значение прочности, средний уровень прочности, верхнюю и нижнюю предупредительные границы прочности.

Выход фактической прочности бетона в зону между нижней предупредительной границей и минимально допустимой прочностью (предельные значения, допускаемые техническими условиями) или при выходе фактической прочности за минимально допустимые значения может являться основанием для корректирования

составов и принятия мер к выявлению и устранению причин, вызывающих падение прочности.

**Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.**

1. Существенное увеличение «разрешающей способности» расчетных зависимостей прочности бетона достигается использованием зависимостей, связывающих прочность бетона с модифицированным («приведенным») цементно-водным отношением. Увеличение числа учитываемых факторов, влияющих на прочность бетона, достигается также введением мультипликативного коэффициента в расчетные формулы прочности.

2. Приведена общая схема многопараметрического проектирования составов бетона, позволяющая при использовании комплекса соответствующих расчетных зависимостей, решать ряд задач проектирования составов бетона различных видов с комплексом требуемых проектных параметров.

**Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року**

---

*Список использованных источников*

1. Руководство по подбору составов тяжелого бетона. -М.: Стройиздат,1979. – 102 с.
2. Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов. - М.: Стройиздат, 1975. – 272 с.
3. Дворкин О.Л. Проектирование составов бетона. (Основы теории и методологии). – Ровно: Изд-во УГУВХП, 2003. – 265 с.
4. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Проектирование составов бетона с заданными свойствами. - Ровно, РГТУ, 1999.-202 с.
5. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1.-Detroit, 1980.- 150 p.

---

*Дворкин Леонид Иосифович д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительных изделий и материаловедения, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: (0362) 400-520. E-mail: [dvorkin.leonid@gmail.com](mailto:dvorkin.leonid@gmail.com)*

*Дворкин Олег Леонидович д-р техн. наук, профессор кафедры технологии строительных изделий и материаловедения, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: (0362) 23-21-32. E-mail: [dvorkin-oleg@mail.ru](mailto:dvorkin-oleg@mail.ru)*

*Dvorkin Leonid Iosifovich d-r science, professor, Head of Technology of Building Elements and Material Science department, National University of Water Management and Nature Resources Use Tel.: (0362) 400-520. E-mail: [dvorkin.leonid@gmail.com](mailto:dvorkin.leonid@gmail.com)*

*Dvorkin Oleg Leonidovich d-r science, professor, Technology of Building Elements and Material Science department, National University of Water Management and Nature Resources Use Tel.: (0362) 23-21-32. E-mail: [dvorkin-oleg@mail.ru](mailto:dvorkin-oleg@mail.ru)*

Стаття прийнята 25.05.2015 р