

УДК 666.97

**МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ БЕТОНА**

**МЕТОДОЛОГІЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
СКЛАДІВ БЕТОНУ**

**MULTIPARAMETER DESIGN OF CONCRETE COMPOSITION
METHODOLOGY**

Дворкин Л. И. д.т.н., проф., Дворкин О. Л. д.т.н, проф. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования)

Дворкін Л. Й. д.т.н., проф., Дворкін О. Л. д.т.н, проф. (Національний університет водного господарства та природокористування)

Dvorkin L. I. prof., Dvorkin O. L. Doctor of Engineering, Professor. (National University of Water Management and Natural Resources)

В статье излагаются основные положения методологии многопараметрического проектирования составов бетона. Приводятся расчетные зависимости прочности бетона от приведенного цементно-водного отношения, а также морозостойкости бетона в зависимости от прочности и содержания вовлеченного воздуха, обоснование правила постоянства водопотребности бетонных смесей.

У статті приводяться основні положення методології багатопараметричного проектування складів бетону. Наводяться розрахункові залежності міцності бетону від заданого цементно-водного відношення, а також морозостійкості бетону в залежності від міцності та вмісту втягнутого повітря, обґрунтуване правило постійності водопотреби бетонних сумішей.

In the article the basics of concrete compositions multi-parametric design methodology are shown. The calculated equations of the concrete strength depending on the modified water-cement ratio, and the concrete frost resistance depending on the strength and content of entrained air, the substantiation for the rule of the water demand constancy of concrete mixes are given.

Ключевые слова:

Бетон, водопотребность, морозостойкость, прочность.

Бетон, водопотреба, морозостійкість, міцність.
Concrete, water demand, frost resistance, durability

Бетон в конструкциях и сооружениях работает в условиях сложного воздействия различных факторов, его эффективность и надежность в значительной мере зависят от принятых составов бетонных смесей, обеспечивающих комплекс необходимых технических свойств.

Проектирование составов бетона с комплексом требуемых свойств является одной из главных задач технологической подготовки производства бетонных и железобетонных конструкций. Эта задача, в настоящее время, решается путем экспериментальных подборов или расчетно-экспериментальными методами.

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: зависимостях прочности бетона от водоцементного отношения (правило В/Ц), водопотребности бетонной смеси от показателя удобоукладываемости в определенном диапазоне В/Ц (правило постоянства водопотребности), расхода воды и цемента от содержания песка в смеси заполнителей при постоянном В/Ц (правило оптимальной доли песка в смеси заполнителей).

При всей важности прочности бетона как одного из решающих конструктивных свойств бетона, его долговечность и функциональная эффективность далеко не всегда однозначно определяются лишь прочностью бетона, что обуславливает актуальность проблемы проектирования составов бетона с комплексом требуемых свойств (*многопараметрического проектирования составов*).

Также как и традиционное многопараметрическое проектирование составов основывается на известных базовых закономерностях бетоноведения, однако требует их модифицирования для решения более сложных задач и использования ряда дополнительных количественных зависимостей.

Для расчетного определения В/Ц, обеспечивающего прочность бетона при сжатии (R_b), нашли распространение количественные зависимости, основанные на известных формулах Фере, Абрамса, Графа, Беляева, Боломея, которые позволяют учесть активность цемента и в определенной мере качественные особенности заполнителей бетона [1-5]. Наибольшее распространение получили формулы типа:

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

где A , b – эмпирические коэффициенты, R_{II} – активность цемента.

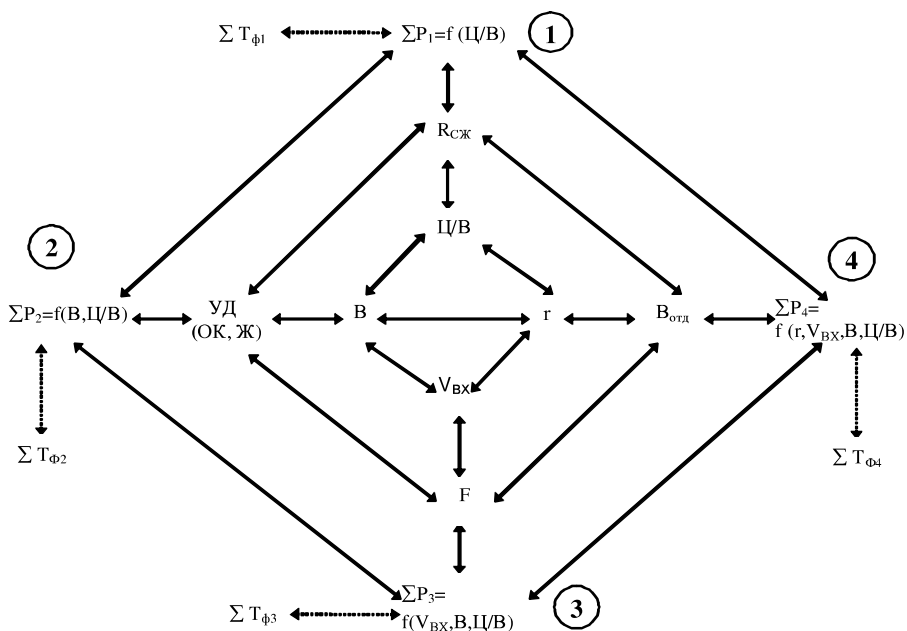


Рис. 1. Блок-схема многопараметрического проектирования составов бетона (ΣP – группа свойств бетона, связанных с определенными смесевыми параметрами, ΣT_{ϕ} – группа технологических факторов, влияющих на свойства бетона). 1. Определение прочности бетона R_6 для достижения $\Sigma P_1=f(\text{Ц/В})$ и требуемого Ц/В.

2. Определение расхода воды (V) для достижения $\Sigma P_2=f(V, \text{Ц/В})$.

3. Определение объема вовлеченного воздуха ($V_{\text{вх}}$) для достижения $\Sigma P_3=f(V_{\text{вх}}, V, \text{Ц/В})$.

4. Определение параметра доли песка в смеси заполнителей (r) для достижения

$\Sigma P_4=f(r, V_{\text{вх}}, V, \text{Ц/В})$.

F – морозостойкость бетона; $УД$, $V_{\text{отд}}$ – соответственно удобоукладываемость и водоотделение бетонной смеси

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

В общем виде задачи проектирования составов бетона с комплексом различных свойств (многопараметрическое проектирование составов) сводятся 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) [3-5].

Обеспечивать заданные показатели свойств можно, например, выбирая минимально возможные значения В/Ц и расхода воды. В таком случае показатели некоторых свойств могут обеспечиваться с определенным "запасом" и требуется повышенный расход цемента. С помощью специальных технологических приемов можно достигать оптимальные значения параметров состава бетона, обеспечивающих экономию ресурсов. 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.

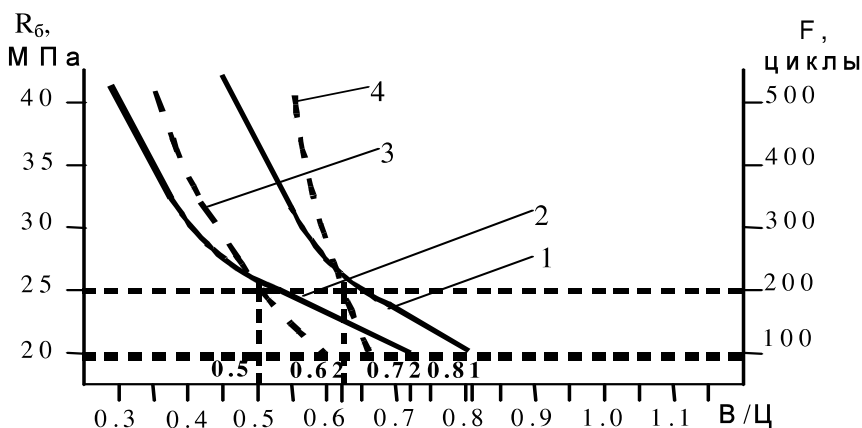


Рис.2. Изменение В/Ц в зависимости от заданных значений прочности бетона при сжатии (R_b) и морозостойкости (F):

1. R_b , без вовлеченного воздуха; 2. R_b , 20 л. вовлеченного воздуха;
3. F , без вовлеченного воздуха; 4. F , 20 л. вовлеченного воздуха

При введении воздухововлекающей добавки (2% вовлеченного воздуха) для обеспечения указанных требований можно увеличить В/Ц до 0,62 и соответственно снизить расход цемента. 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.

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 приведенного Ц/В [3-5].

Выражение мультипликативного коэффициента ρA_i в формуле прочности бетона 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 ($i=1 \dots n$).

Исходя из известной [4] физической гипотезы о решающем влиянии на прочность бетона отношения объема гидратированного цемента к общему объему пор, предложена [3-5] зависимость (правило), констатирующая однозначную связь прочности бетона с приведенным Ц/В (правило приведенного Ц/В), учитывающая наряду с цементно-водным отношением влияние объема пор обусловленных заполнителями и вовлеченным воздухом, а также возможность частичной замены цемента активными минеральными добавками:

$$(\text{Ц/В})_{\text{пр}} = \frac{\text{Ц} + K_{\text{ц.э}} \text{Д}}{\text{В} + \text{П}_3 \text{V}_3 + \text{V}_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

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

"Приведенным" такое Ц/В можно считать потому, что в нем условно приравнивается "приводится" к влиянию на прочность расхода цемента влияние активных минеральных наполнителей, а к влиянию воды - влияние пор заполнителей и объема находящегося в бетоне воздуха.

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

Для определения Ц/В, обеспечивающего прочность бетона в 28-суточном возрасте, удобно использовать общую формулу прочности бетона, учитывающую мультипликативный коэффициент ρA_i и выражение " приведенного Ц/В":

$$R_6 = \rho A_i R_{\text{ц}} [(\text{Ц/В})_{\text{пр}} - b]. \quad (4)$$

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 [3-5], разработаны алгоритмы проектирования составов бетонов для дорожного и гидротехнического строительства, пропариваемых и используемых в условиях низких и повышенных температур, бетонов с активными минеральными добавками и мелкозернистых бетонов, легких бетонов и др.

На рис.3,4,5 приведены в качестве примеров схемы алгоритмов проектирования составов бетонов с повышенной трещиностойкостью, золосодержащих бетонов и для зимнего бетонирования с применением противоморозных добавок, а в табл.1 примеры их реализации.

Для многопараметрического проектирования наряду с расчетными зависимостями, полученными на основе структурно-физических моделей, могут с успехом использоваться экспериментально-статистические модели. Такие модели, полученные с применением методологии математического планирования экспериментов эффективны для проектирования составов различных видов бетонов при необходимости учесть влияние определенного набора факторов с учетом конкретных производственных особенностей [6].

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 с построением технологических карт и решать ряд смежных задач, связанных с материально-техническим обеспечением производства, учетом расходуемых материалов и др.

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 колебаниях прочности бетона и подвижности бетонной смеси.

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.6) рассчитывают исходные статистические параметры на текущий анализируемый статистический период: коэффициенты вариации, минимально допустимое значение прочности, средний уровень прочности, верхнюю и нижнюю предупредительные границы прочности.

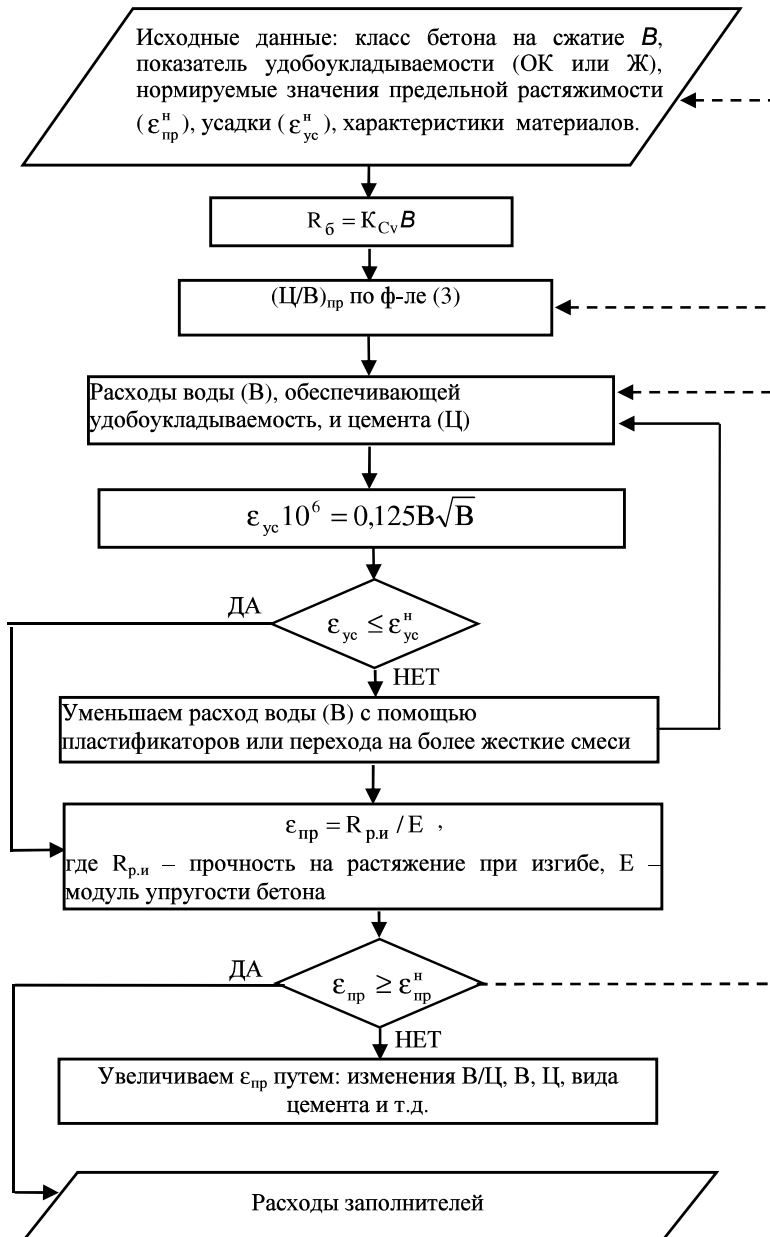


Рис.3. Алгоритм проектирования составов бетона с повышенной трещиностойкостью

Примечание: K_{Cv} – коэффициент, учитывающий показатели вариации прочности

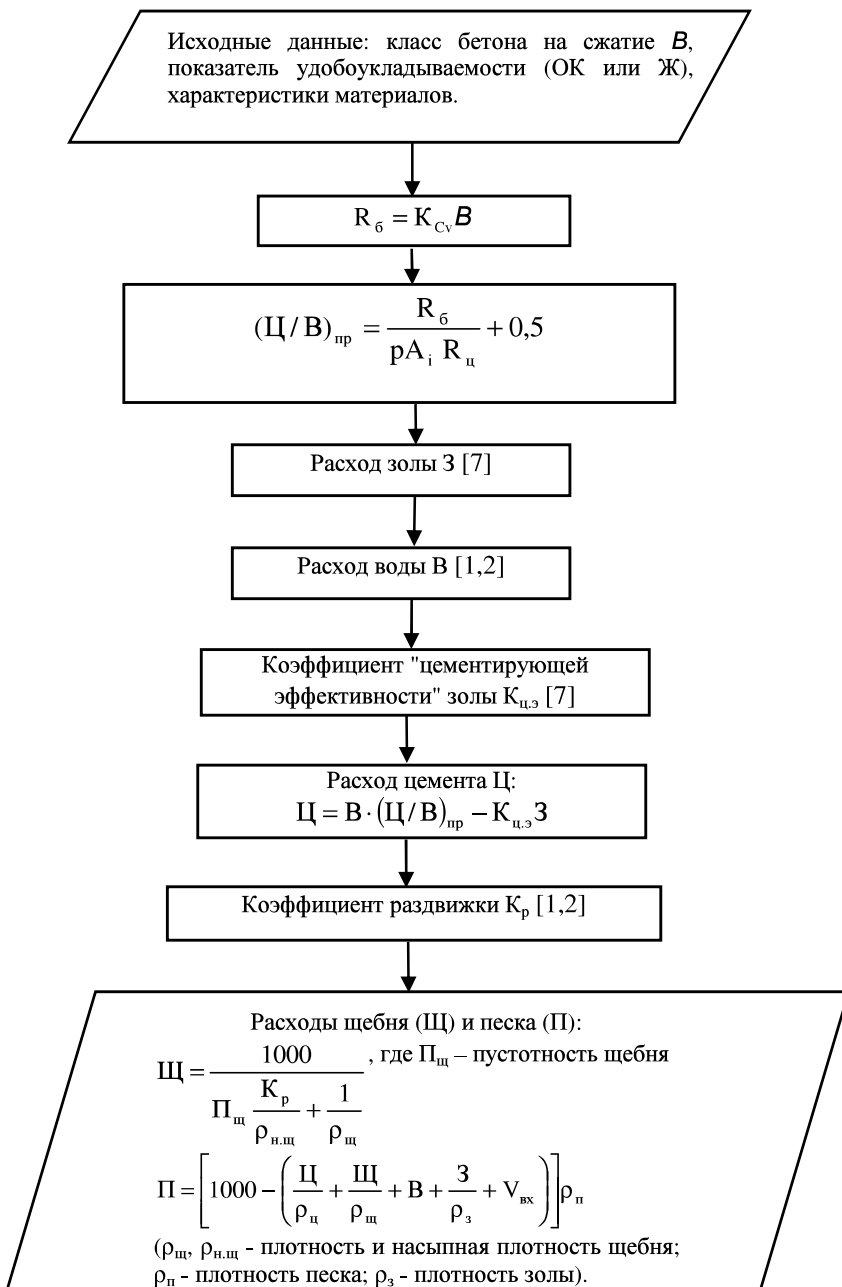


Рис.4. Алгоритм проектирования составов золосодержащих бетонов

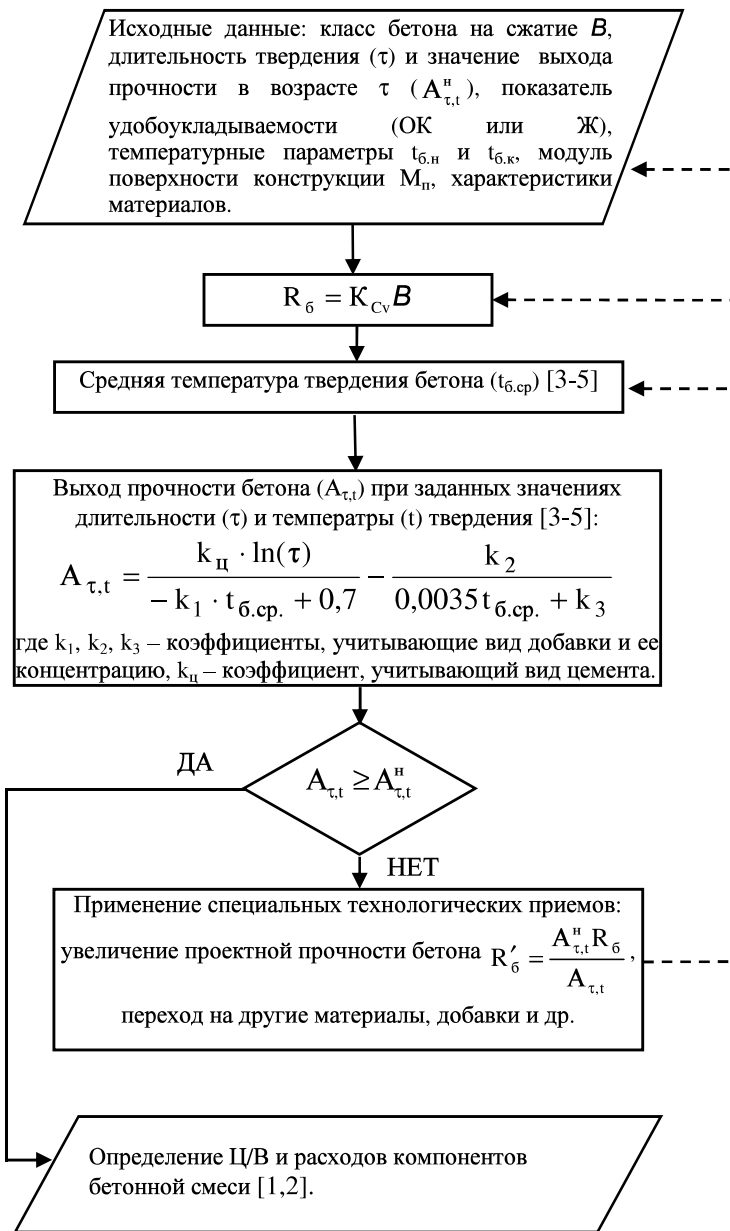


Рис.5. Алгоритм расчета состава бетона с применением противоморозных добавок

Примеры реализации алгоритмов проектирования состава бетона

I. Запроектировать состав бетона с проектными требованиями: класс В22,5, подвижность смеси ОК=6...9 см, предельная растяжимость ($\epsilon_{пр}$) не менее $1 \cdot 10^{-4}$, усадка ($\epsilon_{ус}$) не более $0,3 \cdot 10^{-3}$.

Исходные материалы: портландцемент с активностью $R_{ц}=42,5$ МПа, пределом прочности при изгибе $R_{ц,и}=5,6$ МПа, нормальной густотой НГ=27,5 %; кварцевый песок с модулем крупности $M_k=1,7$, содержанием пылеватых и глинистых примесей 1,5%, плотностью $\rho_n=2,67$ гсм³; щебень фракции 5-70 мм с содержанием пылеватых и глинистых примесей 1,2%, плотностью $\rho_{щ}=2,65$ гсм³.

Применяется добавка пластификатор ЛСТ (0,25% от массы цемента)

Используем алгоритм, приведенный на рис.3.

Расчетная усадка бетона: $\epsilon_{ус}=0,3 \cdot 10^{-3}$.

Расчетная предельная растяжимость: $\epsilon_{пр}=1,08 \cdot 10^{-4}$.

Расчетный состав бетона:

$C=333$ кг/м³; $Щ=1209$ кг/м³; $П=684$ кг/м³; $В=180$ кг/м³

Экспериментально уточненный состав бетона:

$C=320$ кг/м³; $Щ=1225$ кг/м³; $П=700$ кг/м³; $В=172$ кг/м³

II. Рассчитать состав бетона нормального твердения прочностью 20 МПа. Подвижность бетонной смеси составляет ОК=1...4 см.

Исходные материалы: портландцемент с минеральными добавками М400 ($\rho_n = 3,1$ гсм³), кварцевый песок ($V_n = 7$ %, $\rho_n = 2,6$ гсм³), гранитный щебень фракции 5...20 мм ($\rho_n=1450$ кг/м³, $\rho_{щ}=2,6$ гсм³). Применяется зола Бурштынской ТЭС ($\rho_z = 2,3$ гсм³).

Используем алгоритм, приведенный на рис.4.

Расчетный состав бетона:

$C = 238$ кг/м³; $V = 190$ кг/м³; $З = 150$ кг/м³; $Щ = 1157$ кг/м³; $П = 580$ кг/м³.

Экспериментально уточненный состав бетона :

$C = 227$ кг/м³; $V = 185$ кг/м³; $З = 156$ кг/м³; $Щ = 1165$ кг/м³; $П = 590$ кг/м³.

III. Запроектировать состав бетона с ОК=2...4 см класса В15 ($R_6=21,6$ МПа) для фундаментных блоков при использовании противоморозной добавки ННХК Через 14 сут при $t_{6,н}=20^0$ С и $t_{6,к}=5^0$ С необходимо обеспечить $A_{т,т}=0,85$ ($R'_6 = 18,4$ МПа).

Средняя температура воздуха $t_{в}=-20^0$ С.

Исходные материалы: портландцемент М400, песок $M_k=2,0$, щебень 10-40 мм. Содержание отмучиваемых примесей в щебне 2%, песке 1%.

Используем алгоритм, приведенный на рис.5.

$t_{6,ср}=-3^0$ С.

Расчетный состав бетона:

$C=270$ кг/м³; $V=170$ кг/м³; $П=684$ кг/м³; $Щ=1249$ кг/м³.

Экспериментально уточненный состав бетона:

$C=301$ кг/м³; $V=167$ кг/м³; $П=645$ кг/м³; $Щ=1250$ кг/м³.

Статистический контроль прочности бетона проводится в соответствии с действующими нормативно-методическими руководствами. Для построения технологической карты (рис.6) рассчитывают исходные статистические параметры на текущий анализируемый статистический период: коэффициенты вариации, минимально допустимое значение прочности, средний уровень прочности, верхнюю и нижнюю предупредительные границы прочности.

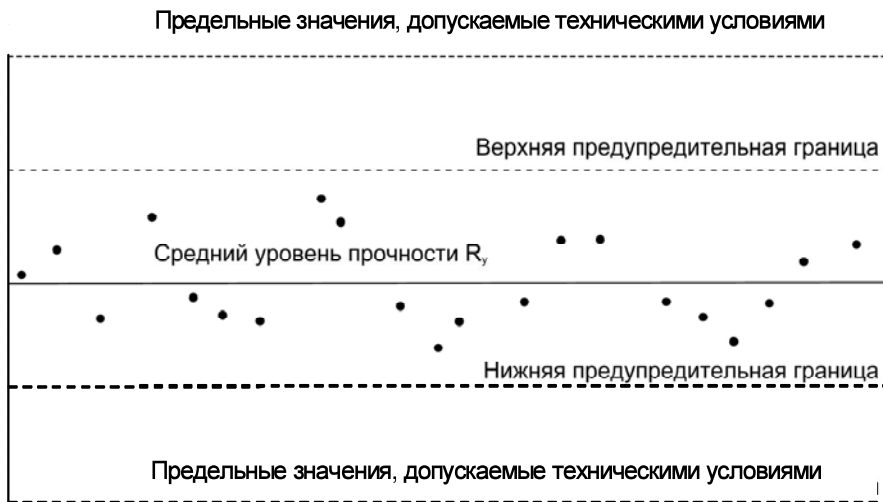


Рис.6. Общий вид контрольной карты при статистическом контроле прочности бетона

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.

Не менее важным, чем правило приведенного Ц/В для расчетно-экспериментального определения составов бетона является правило постоянства водопотребности, позволяющее однозначно связать расход воды с показателями удобоукладываемости бетонной смеси.

Для обоснования правила постоянства водопотребности водопотребности бетонных смесей с помощью специальных реологических исследований нами было модифицировано уравнение вязкости Т.К.Пауэрса [3-5, 8]:

$$\eta/\eta_0 = e^{K\varphi}, \quad (5)$$

где η и η_0 – вязкость смеси и исходной дисперсионной среды; K – коэффициент; φ – объемная концентрация дисперсной фазы.

Уравнение (5) аналитически подтверждает гипотетический вывод В.И.Сорокера и В.Г.Довжика о том, что “в определенных пределах изменения количества цементного теста и его вязкости взаимно компенсируют друг друга и вязкость всей системы, а, следовательно, удобоукладываемость остаются неизменными” [9].

С изменением Ц/В до некоторого критического значения $(Ц/В)_{кр}$ увеличение вязкости компенсируется увеличением толщины пленки цементного теста, что способствует формированию определенной области стабильности водопотребности бетонной смеси (рис.7) [3-5].

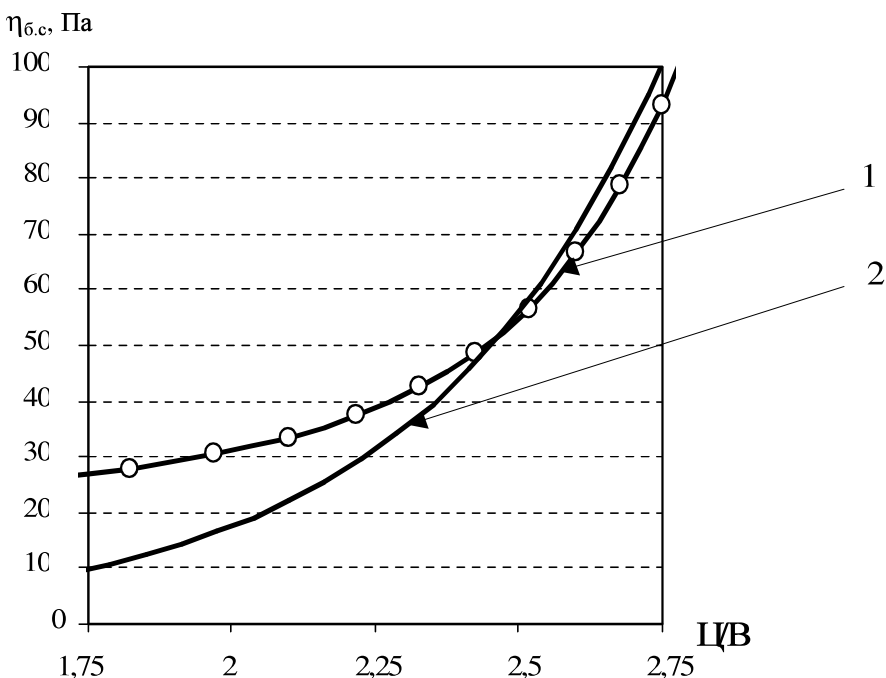


Рис. 7. Зависимость вязкости бетонной смеси ($\eta_{б.с.}$) от Ц/В: 1 – по уравнению (5); 2 – по А.Е.Десову [10]

Рассмотрено также [3-5] аналитическое решение задачи выбора оптимального значения доли песка в смеси заполнителей (τ) из условия

минимизации вязкости бетонных смесей; предотвращения водоотделения и достижения заданного воздухоовлечения. Как известно традиционная методология проектирования составов бетона предлагает нахождение оптимальной доли песка в смеси заполнителей на основе эмпирических данных, как правило, лишь из условия минимизации водопотребности бетонных смесей [1,2].

Уравнение оптимального g из условия минимизации вязкости бетонной смеси учитывает необходимость достижения максимального значения толщины обмазки при заданном объеме цементного теста. Значение необходимого g для предотвращения водоотделения может быть найдено из уравнения водного баланса бетонной смеси с учетом максимально возможной водоудерживающей способности цементного теста и водопотребности заполнителей. При нормировании воздухоовлечения назначаемое содержание песка в смеси заполнителей должно быть увязано с содержанием воздухоовлекающей добавки и фракции песка менее 0,63 мм, а также расходом цемента и водосодержания бетонной смеси [3-5].

Актуальными задачами проектирования составов бетона являются задачи, учитывающие требования по долговечности бетона и, прежде всего по морозостойкости (F), водонепроницаемости (W) и др.

Расчетно-экспериментальное прогнозирование морозостойкости бетона может быть основано на уравнениях связи критического числа циклов замораживания и оттаивания с параметрами, характеризующими соотношение резервных и открытых пор (структурный метод), а также с показателями физико-механических свойств бетона (физико-механический метод).

Предложено уравнение для расчетной оценки критического числа циклов замораживания и оттаивания с учетом прочности бетона и объема вовлеченного воздуха [3-5]:

$$F = A_1 R_6^{A_2} \exp^{A_3 V_{вх}} . \quad (6)$$

Для исследованных бетонов $A_3=0,35$, A_1 и A_2 изменяются с изменением водосодержания и соответственно подвижности смесей.

Для получения уравнения (6) были статистически обработаны результаты испытаний морозостойкости бетонов, выполненных нами на кафедре ТБВМ Украинского университета водного хозяйства и природопользования с применением импульсного ультразвукового метода при температуре -50^0C . В массив данных вошло 30 серий испытаний бетонов, изготовленных с применением цементов Здолбуновского и Каменец-Подольского цементных заводов, гранитного щебня и кварцевых песков с $M_k 1,5...2$, соответствующих требованиям ДСТУ. В качестве воздухоовлекающих использовались добавки СНВ и СДО. В массив

обработанных данных вошли результаты определения морозостойкости бетонов достаточно широкого диапазона составов ($R_6=15\text{...}40$ МПа, $V=140\text{...}220$ л/м³, $V_{вх}=0,8\text{...}6,5$ %) [3-5].

С развитием фундаментальных положений бетоноведения, созданием банка достаточно апробированных количественных зависимостей и моделей, разработкой необходимых алгоритмов, компьютерных программ и систем многопараметрическое проектирование составов бетона будет все шире внедряться в практическую технологию бетона и железобетонных изделий.

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.Й., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. - К.: Основа, 2007. - 613 с.
5. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi-Parametric Concrete Compositions Design. - New York, USA: Nova Science Publishers, 2013. - 173 p.
6. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. - New York, USA: Nova Science Publishers, 2012. - 170 p.
7. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Эффективные цементно-золевые бетоны. –Ровно: Эвен, 1998. – 196 с.
8. Powers T. Structures and Physical Properties of hardened Portlandcement paste. //J. Amer. Ceram. Soc., 41, 1958- pp. 18-26.
9. Сорокер В.И., Довжик В.Г. Жесткие бетонные смеси в производстве сборного железобетона. -М.: Стройиздат, 1964. – 206 с.
10. Десов А.Е. Вибрированный бетон. -М.: Машгиз, 1956. – 229 с.