

## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН КАК ОБЪЕКТ АНАЛИЗА, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ

**Коваль С.В.** (*Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса*)

**Проанализированы особенности модифицированного бетона как сложной рецептурно-технологической системы и обоснованы методы поиска рациональных модификаторов на основе многофакторных экспериментально-статистических моделей.**

В работах последнего десятилетия бетон представляется в виде сложной системы. Любую сложную систему нельзя корректно описать аналитическим путем; она состоит из большого числа элементов (сложность состава), невыяснена природа явлений, протекающих в системе (сложность организации структуры), а простота и удобство анализа элементарных объектов усложняется необходимостью последующего согласования несовпадающих оптимальных условий каждой из подсистем. Наличие случайно изменяющихся факторов обуславливает ее стохастический характер, при этом случайность действует наряду с необходимостью, но в значительной мере определяет причинно-следственные связи [2]. Одна из главных причин неопределенности сложных систем – неполнота информации (что преодолевается по мере углубления теоретического и эмпирического познания).

Состав и характеристики компонентов оказывают определяющее влияние на свойства смесей и затвердевшего бетона. Так, цемент обладает разной дисперсностью и состоит из различных минералов, содержание которых изменяется в широких пределах. В него с целью экономии клинкерной составляющей вводятся различные минеральные добавки и наполнители, изменяющие характер и скорость гидратации. Заполнитель различен по крупности и пористости и т.д., вводимые добавки отличаются по природе и количеству и т.д. Разнообразны технологические и эксплуатационные воздействия на бетон.

Применительно к сложным системам актуальна проблема принятия решений, так как процесс проектирования, разработки, создания и эксплуатации сложных систем связан с необходимостью принимать



большое количество решений, касающихся как системы в целом, так и отдельных ее подсистем и элементов. При этом частные решения, касающиеся подсистем и элементов системы, должны применяться с позиций системного подхода, т.е. с учетом всех существующих связей и взаимосвязей данной системы или элемента с другими элементами системы, и должны быть научно обоснованными.

Усложнение принятия решений в области системы модифицированного бетона идет по нескольким направлениям.

1. *Множественность* критериев оценки бетона в присутствии многокомпонентных добавок приводит к необходимости принятия компромиссных инженерных решений при управлении его структурой и свойствами. Характерным примером может являться, в частности, бетон с добавками для монолитно-каркасного домостроения, отвечающий высокой удобоукладываемости и сохраняемости смеси, быстрому набору прочности в ранние сроки при снижении трещинообразования, низкой деформативности и т.д. [3]. Еще более жесткие и широкие требования к бетону предъявляются при сооружении мостов, тоннелей, аэродромов. Комплекс нормируемых требований (вязкость, адгезия, тиксотропия, твердение, пористость, долговечность и т.д.) предъявляется к составам различного назначения из сухих строительных смесей [4], свойства которых определяются различными комбинациями модифицирующих добавок (суперпластификаторами, стабилизаторами, редисперсионными порошками, дисперсно армирующими элементами и т.д.).

2. *Многокомпонентность рецептуры добавок* (как фактор обеспечения комплекса заданных свойств бетона) ведет к необходимости учета как индивидуального, так и совместного влияния компонентов. Множество добавок, входящих в комплекс (известны добавки с 10 компонентами и более [5]), позволяет в общем случае с достаточной точностью оценить лишь направление их действия, но прогнозировать количественные оценки, особенно с учетом межкомпонентных взаимодействий, весьма сложно.

3. *Многообразие существующих добавок* приводит к усложнению выбора рецептурных решений, особенно в условиях недостатка информации о составе и строении добавок (которая во многих случаях отсутствует). Немаловажен и тот факт, что практически не ограничено количество химических соединений, которые могут быть потенциальными добавками в бетон, что также усложняет задачу.

4. *Комплексный характер процессов и эффектов модификации* затрудняет анализ воздействий добавок исходя только из



теоретических положений. Поэтому доля теоретических систематических исследований в области комплексных добавок пока невелика. Это связано со значительной сложностью изучения одновременного влияния группы добавок на процессы, протекающих в объеме и на границах раздела фаз. Сложный характер модификации цементных систем определяет существование множества гипотез физико-химического действия добавок. Так, в работе [5] представлено 12 гипотез механизма действия хлорида кальция, хотя история этой добавки в бетон уже начитывает более чем вековую историю (первый патент на ее применение был получен в 1885 году [6]). При этом указывается, что «ни одна из перечисленных гипотез не может исчерпывающе объяснить механизм действия хлорида кальция на гидратацию цемента и рост прочности бетона» [5, с.62].

Хотя в основных чертах механизм действия традиционных добавок достаточно изучен, на сегодня еще не разработана количественная теория, позволяющая выразить эффект от введения добавок в аналитической форме. Это в значительной степени затрудняет уточнение теоретических вопросов, а в «отношении практических приводит к необходимости в каждом отдельном случае и для любой новой добавки, в том числе близкой по химической природе к хорошо изученным ранее, эмпирическим путем подбирать ее дозировки и оценивать степень влияния на физико-и структурно-механические свойства бетона» [7, с.127]. Таким образом, получение оптимальных результатов, наиболее соответствующих реальным технологическим задачам модифицирования бетона, в настоящее время не представляется возможным без количественного анализа взаимосвязи между параметрами состава добавок и функциональными свойствами бетона. При этом задачи, решаемые за счет добавок, являются стандартными и достаточно успешно решаются экспериментальными методами.

5. *Эффективность действия добавок зависит от конкретных факторов технологии*, поэтому из теоретических соображений определить оптимальную концентрацию для каждого конкретного случая невозможно. Нормативные документы устанавливают, как правило, не конкретные дозировки, а некоторый диапазон их изменения, гарантирующий положительный технологический результат, что требует в каждом случае экспериментальной оценки принимаемых решений. В реальных условиях неизбежны колебания характеристик цемента и заполнителей, состава бетона, режимов твердения. Существенное влияние на конечный результат применения



добавок оказывает дисперсность, минералогический и химический состав цемента, свойства заполнителей и наполнителей, режимы твердения. Анализ проверки СП С-3 на цементах 25 заводов показал изменение эффективной дозировки практически в 2 раза [8]. Недооценка влияния факторов технологии и областей применения добавок приводит к неполному использованию их технологического потенциала, а в ряде случаев и к существенным технико-экономическим потерям и даже разрушению конструкций. В результате даже для добавок со строго регламентированными потребительскими параметрами необходимы специальные исследования с учетом конкретных ситуаций их использования.

6. *Необходимость оперативного решения инженерных задач* определяет сокращение сроков проверки и внедрения добавок. Одной из стратегических целей является «прорыв» в повышении потребительских свойств продукции необходимый для повышения рентабельности и конкурентоспособности предприятия (при этом фирмы исходят из того, что затраты на науку и новую технику могут окупиться весьма быстро или не окупиться вообще).

7. *Многообразие технологических задач.* Несмотря на разнообразие существующих задач модификации, все они имеют общие целевые установки доказательного выбора (в ограниченных пределах) наиболее целесообразного варианта выбора технологического решения, т.е. могут рассматриваться как задачи оптимизационные.

С точки зрения оперативного управления показателями качества бетона, для потребителей добавок наиболее важен конечный результат их применения. Известно, что эффективность любой системы может быть определена на стадии ее конкретной реализации путем выполнения совокупности технологических признаков и свойств. Необходимость поиска оптимальных добавок с учетом конечного результата применения потребовала их *классификации по группам решаемых технологических задач с использованием количественных показателей эффективности* [9].

Схема построения (рис.1) такой классификации отражает сложную взаимосвязь соотношений между эффектами модификации бетона и количественными показателями технико-экономической эффективности принимаемых решений, которая устанавливается с использованием принципов системного анализа и системологии [10, 11]. Анализ схемы позволяет оценить пути использования отдельных добавок и прогнозировать возможный эффект от их совмещения.



Выделенный в центре блок задач иллюстрирует важную проблематику выбора рациональных модификаторов. В частности, одну и ту же технологическую задачу возможно решить за счет разных добавок, в том числе с иным механизмом действия (так, ускорение твердения достигается как при использовании СП, так и ускорителей, причем предсказуем дополнительный эффект их совмещения). С другой стороны, любая добавка (даже из одной группы) не только действует по своему целевому назначению, но и влияет на различные свойства бетона (например, воздухововлекающая добавка, вводимая для повышения морозостойкости может существенно влиять и на реологию смеси [12]). Наилучший результат будет достигнут в том случае, когда максимально полно учитываются технико-экономические условия применения добавок.

Построенная на использовании экспериментально-статистических моделей (ЭСМ) система анализа и систематизации данных с учетом их компьютерной переработки позволяет существенно расширить возможности выбора рациональных модификаторов бетона [12-15].



ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ							МОДИФИКАЦИЯ		Степень взаимосвязи						
"Новый" уровень качества					Снижение стоимости										
технологии			материала												
Повышение "гибкости"	Интенсификация процессов	Снижение технологического риска	Обеспечение заданного уровня качества	Повышение эксплуатационной надежности	Экономия энергии	Экономия материалов	МОДИФИКАТОРЫ		КЛАССИФИКАЦИЯ рецептурно-технологических задач						
									суперпластификаторы	пластификаторы	ускорители	воздухововлекающие	стабилизаторы	кольматирующие	активные наполнители
●	●	X	●	X	●	X	си	Увеличение подвижности	●	●	-	X	X	X	X
I	I	●	●	○	X	X	си	Повышение однородности	X	X	-	X	●	X	○
●	●	○	○	X	●	●	бе	Сокращение сроков твердения	○	○	●	-	-	-	X
	●	○	●	○	●	●	то	Снижение водопотребности	●	●	-	-	-	-	X
X	X	X	○	●	○	○	на	Повышение морозостойкости	○	○	-	●	-	X	X
●				X	○	●	ре	Экономия цемента	●	○	○	-	-	-	●
○				I	●	○	сур	Сокращение режимов ТВО...	●	○	●	-	-	-	X

● - основное воздействие  
 ○ - существенное  
 X - косвенное  
 ■ - мало влияет или не влияет

Рис. 1. Схема взаимосвязи решаемых технологических задач и эффектов модификации бетона

Ниже показан достаточно простой алгоритм анализа по ЭСМ эффективности добавки по показателю прочности бетона.

Первичная анализируемая модель прочности после ТВО бетона, содержащего добавку С-3 в переменной дозировке  $СП=Z=0,4+0,4\%$  от массы цемента при изменяемых расходе вяжущего ( $Ц=X_2=450+100 \text{ кг/м}^3$ ) и температуре изотермической выдержки тепло-влажностной обработки в диапазоне ( $T=t=65+15 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$$\begin{aligned}
 R_c = & 30,9 + 3,4z - 2,0z^2 - 0,2xz - 0,8xt \\
 & + 9,1x - 1,2x^2 + 0,3xt \\
 & + 4,1t + 1,3t^2.
 \end{aligned} \tag{1}$$



показывает, что прочность бетона достигает максимума  $R=45,5$  МПа при  $C=550$  кг/м<sup>3</sup> и  $T=80$  °С и растет при увеличении дозировки добавки до оптимального уровня, зависящего от  $C$  и  $T$

*Оптимальная переменная дозировка* добавки связана с двумя технологическими факторами и рассчитывается из квадратичной модели (1) как линейная функция:

$$Z_{opt} = 0,85 + 0,05x - 0,2t; \quad (0,53 < C-3 < 0,82 \%) \quad (2)$$

*Модель эталонного бездобавочного бетона*, полученная при подстановке в (1)  $z=-1$ , необходима для оценки эффективности добавки по отношению к переменным уровням свойств базового эталонного бетона в исследуемом факторном пространстве:

$$R = 25,5 + 7,7x - 1,3x^2 + 1,3xt + 6,2t + 1,3t^2 \quad (3)$$

*Абсолютный прирост*  $\Delta R$ , МПа, позволяет оценить возможный выигрыш от применения скорректированных в зависимости от факторов  $x$  и  $t$  оптимальных дозировок по сравнению с фиксированными:

$$\Delta R = 7,1 + 2,7z + 0,6x + 0,5t - 4,4z^2 + 0,6zx + 0,5zt \quad (4)$$

Анализ (4) показывает, что потери  $\Delta R$  при неучете влияния факторов на величину  $z_{opt}$ , могут быть значительными для бетона, твердевшем по «жестким» режимам ТВО. По ЭСМ определяется изменение относительного прироста прочности, чувствительность  $R$  к изменению дозировок и другие задачи, а по комплексу моделей – изопараметрический анализ, сравнение добавок и т.п. [12-15].

Проведенные исследования направлены на формирование *аналитических основ конструирования модифицированных бетонов* с использованием ЭСМ и вычислительного эксперимента.



## Литература

1. Темнов В.Г. Конструктивные схемы в природе и строительной технике. - Л.: Стройиздат, Ленингр. отд., 1987. -256 с.
2. Диалектика познания сложных систем / Под ред. В.С.Тюхина. -М.: Мысль, 1988. -316 с.
3. Новая технология в монолитном домостроении / Н.М.Мхитарян, Г.В.Бадеян, Э.Г.Малацидзе // 3б. науч. тр. «Строительные конструкции». -Киев: НИИСК, 2002. -С.42-50.
4. Сухие строительные смеси / Е.К.Карапузов, Г.Лутц, Х.Герольд и др. - Киев: Техніка, 2000. - 225 с.
5. Добавки в бетон: Справ. пособие /В.С.Раманчандран, Р.Ф.Фельдман, М.Коллепарди и др. -М.: Стройиздат, 1988. -575 с.
6. Millar, W. And Nichols, C.F., Improvements in Means of Accelerating the Setting and Hardening of Cements. Patent 2886, March 4, 1885, London, U.K.
7. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. -М.:Стройиздат,1973. -207 с.
8. Бабаев Ш.Т., Комар А.А. Энергосберегающая технология железобетонных конструкций из высокопрочного бетона с химическими добавками. -М.: Стройиздат, 1987. -240 с.
9. Вознесенский В.А., Коваль С.В. Системология и компьютерное решение задач оптимизации модифицированных композитов. -Киев:Об-во «Знание», 1992. -17 с.
10. Бреховский С.М. Основы функциональной системологии материальных объектов. -М.: Наука, 1986. -192 с.
11. Хубка В. Теория технических систем. -М.: Мир, 1987. -208 с.
12. Коваль С.В. Компьютерный анализ синергетических эффектов в системе модифицированного композита // Композиційні матеріали для будівництва. - Макіївка: ДонДАБА, 2000. - С.8-11.
13. Коваль С.В. Поиск технологических условий оптимальной модификации строительных композитов. В кн. Вопросы современного строительного материаловедения и строительства. - Львов: Львовский филиал образовательной компании "НОЗ", 1998. -С.88-100.
14. Коваль С.В., Савченко С.В. Обобщающий анализ модифицирующих добавок по ЭСМ/ Прогнозирование в материаловедении (МОК-41), Одесса, Астропринт, 2002 с.18.
- 15.Коваль С.В. Повышение эффективности использования добавок в технологии бетона на основе моделирования и компьютерного поиска оптимальных рецептур /Строительные материалы и изделия, 2003, № 6. -С.26-28.