

УДК: 666.972:519.24

**С. В. КОВАЛЬ, С. В. САВЧЕНКО**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

## **ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ОДНОРОДНОСТЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В СТРОИТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ**

Проектирование самоуплотняющихся бетонных смесей, растекающихся под действием собственной тяжести, осложняется необходимостью обеспечения их однородности в строительном элементе или конструкций, что особенно важно для т. н. систем без резервирования – резервуаров, экранов, трубопроводов и т. п. Оценка влияния добавок (суперпластификатора и золы уноса) на показатели неоднородности полей свойств бетона в элементе проведена с использованием статистических моделей. Показана эффективность добавок с позиции уменьшения систематической (гравитационной) и случайной составляющих полей неоднородности прочности бетона в столбчатом элементе вертикального формования.

**самоуплотняющийся бетон, однородность, наполнитель, суперпластификатор**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В последние десятилетия в технологии бетона определилась тенденция использования смесей высокой удобоукладываемости, в том числе самоуплотняющихся бетонов [1, 2]. Однако, как показывает практический опыт, существует опасность снижения однородности бетона из растекаемых смесей, особенно в монолитных тонкостенных густоармированных конструкциях вертикального формования (колонны, столбы, сваи и др.).

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

К основным причинам, влияющим на однородность бетона в изделии, можно отнести низкое значение предельного напряжения сдвига бетонных смесей, гравитационные силы, влияющие на миграцию заполнителя по высоте элемента, агрегатирование частиц цемента и наполнителя на уровне микроструктуры, высокая насыщенность арматурой и сложную конфигурацию конструкций, динамические процессы при укладке и перемещении бетонных смесей (в том числе гидротранспортом).

Существуют два подхода к понижению неоднородности свойств бетона в конструкции или изделии. Во-первых, неоднородность можно учесть при проектировании конструкции за счет увеличения их размеров или понижения допустимых нагрузок, понесая при этом перерасход ресурсов. Во-вторых, можно усовершенствовать состав бетона и технологию производства конструкций. Однако рекомендаций по обеспечению высокой однородности СУБ с помощью рецептурно-технологических факторов недостаточно, хотя это особенно важно для конструкций с повышенными требованиями к эксплуатационной надежности, относящихся к т.н. системам без резервирования (резервуары, экраны, трубопроводы и т. п.).

**Целью** данного исследования является повышение однородности бетона из самоуплотняющихся смесей в конструктивных элементах.

К решению актуальной задачи повышения однородности свойств бетона в конструкции привлечена концепция целенаправленного управления показателями  $G\{h\}$  пространственного поля свойств материалов с использованием многофакторного моделирования [4, 5].

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

Эксперимент проведен по D-оптимальному плану эксперимента с 9 опытными точками (табл. 1). Изменяемыми факторами являлись:

© С. В. Коваль, С. В. Савченко, 2013

Таблица 1 – Значения исследуемых факторов и составы смеси

№	Кодированные		Натуральные		Состав бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>							V <sub>вв</sub> %
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	СП %	ЗУ %	Ц	В	П	Щ <sub>м</sub>	Щ <sub>к</sub>	ЗУ	СП, дм <sup>3</sup>	
1	-1	-1	1,0	20	400	190	843	421	412	80	10,6	3,4
2	-1	0	1,0	30	400	185	822	411	411	120	10,6	2,1
3	-1	1	1,0	40	400	180	801	401	401	160	10,6	3,1
4	0	-1	1,4	20	400	185	849	425	425	80	14,8	0,6
5	0	0	1,4	30	400	180	829	414	414	120	14,8	2,4
6	0	1	1,4	40	400	175	808	404	404	160	14,8	3,1
7	1	-1	1,8	20	400	185	849	425	425	80	19,0	5,1
8	1	0	1,8	30	400	180	829	414	414	120	19,0	3,6
9	1	1	1,8	40	400	175	808	404	404	160	19,0	3,9

X<sub>1</sub> – величины дозировок поликарбоксилатного суперпластификатора BV-10, изменяющиеся в кодированных переменных от -1 до +1, а в натуральных – от 1,0...1,8 %;

X<sub>2</sub> – дозировки золы уноса с удельной поверхностью 300 м<sup>2</sup>/кг, изменяющиеся в пределах 20...40 % от массы цемента.

Бетоны изготовлены с использованием цемента СЕМ I 42,5 N-HSR/NA (400 кг/м<sup>3</sup>) и щебня фракций 4/8 (49 %) и 8/16 (51 %) и золы уноса тепловой станции «Kwidzyn S. A». Бетонные смеси (табл. 2) получены из смесей с диаметром расплыва конуса D = 70±2 см, прошедших тесты (L-box, V-funnel и др.) для самоуплотняющихся бетонов [2].

Таблица 2 – Результаты испытаний и классы бетонных смесей

№	Дозировка		Оценка сегрегации		Оценка расплыва и истечения				Оценка самонивелирования	
	СП, %	ЗУ, %	SR %	Класс	T <sub>50с</sub>	Класс	T <sub>вс</sub>	Класс	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>	Класс
1	1,0	20	17	SR2	2,5	VS2	7,0	VF1	0,65	–
2	1,0	30	14	SR2	4,0	VS1	12,0	VF2	0,91	PA2
3	1,0	40	12	SR2	4,0	VS1	24,0	VF2	1,0	PA2
4	1,4	20	11	SR2	2,5	VS2	10,0	VF2	0,76	–
5	1,4	30	5	SR2	6,0	VS1	15,0	VF2	0,83	PA2
6	1,4	40	4	SR1	10,0	VS1	50,0	VF2	0,91	PA2
7	1,8	20	24	-	2,0	VS2	16,0	VF2	0,82	PA2
8	1,8	30	19	SR2	4,0	VS1	11,0	VF2	0,91	PA2
9	1,8	40	17	SR2	5,0	VS1	30,0	VF2	0,94	PA2

Некоторые смеси рассматривались как «квазисамоуплотняющиеся» [3] так как не по всем параметрам отвечали требованиям к самоуплотняющимся бетонам [2].

Образцы для исследования однородности получены разделением на фрагменты бетонных столбов. Бетонная смесь в столбчатых формах высотой 100 см и диаметром 105 мм после вертикального формования дополнительно подвергалась вибрации в течение 15 сек. Упругие колебания должны были вызвать разделение смеси на участки, в которых может быть или максимальное смещение компонентов, или это смещение может быть весьма малым.

На рис. 1 показано распределение прочности R<sub>сж</sub> бетона по высоте (H) вертикально отформованного столбчатого элемента. Состав бетона, из которого изготовлен данный столбчатый элемент, включает 1,4 % суперпластификатора и 30 % золы уноса. Зависимость R = f(H) для состава № 5 описывается кривой  $R = 0,1158h^5 - 1,9458h^4 + 12,212h^3 - 35,354h^2 + 46,772h + 10$ .

На основании эпюры оценены «детерминированные» критерии неоднородности, средняя R<sub>ср</sub>, R<sub>max</sub> и R<sub>min</sub> прочность, перепад R<sub>max</sub> - R<sub>min</sub>, градиент  $\nabla R = ((R_{max} - R_{min})/\Delta h)$ , коэффициент расслоения как отношение средних R трех верхних и трех нижних фрагментов столба:  $K = R_{верх}/R_{низ}$  и др. [4, 5]. В качестве статистической меры разброса случайных оценок R по высоте H столба относительно R<sub>ср</sub> использовалась вероятностная характеристика – среднее квадратичное отклонение s<sub>R</sub> (МПа) с числом степеней свободы f<sub>R</sub> = 6 - 1 = 5, а также коэффициент вариации:  $V\{R\} = S_R/R_{ср} = (1,98/40,0) \cdot 100 = 4,9 \%$ .

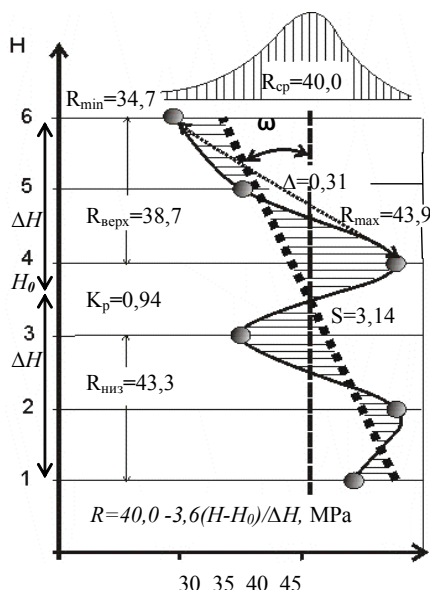


Рисунок 1 – Линейное поле прочности бетона в столбчатом элементе.

Наряду со случайными колебаниями физико-механических характеристик бетона (вследствие колебаний свойств компонентов, точности дозирования, температуры среды и др.) по высоте конструкций имеет место систематическое колебание. Систематическая или гравитационная составляющая неоднородности наблюдается, главным образом, по высоте конструкций и в направлении укладки бетонной смеси. В результате прочность одних частей конструкции отличается от прочности в других ее частях.

Для выделения случайной и систематической составляющих поля использовалась методика [4], основанная на описании распределения линейной моделью (при нормализации высоты  $H$  от  $-1$  до  $+1$ ):  $R = a_0 + a_1 h = 40,0 - 3,6(H - H_0) / \Delta H$ , где  $a_1$  – усредненный градиент, проходящий под углом  $\omega$  к оси столба;  $a_0$  – среднее значение прочности в столбе.

Систематическая составляющая рассчитывалась для сравнительной оценки в относительных величинах:  $\delta_R\{a\} = a_1 / a_0 = (-3,6 / 40,0) = -3,19\%$ . Знак «-» указывает на левосторонний уклон эпюры относительно оси.

Случайная составляющая определяется как неадекватность описания эпюры прямой или случайные колебания оценок  $R_U$  по высоте столба и рассчитывается относительно среднего как:  $V_R\{a\} = S_{\text{ост}} / a_0 = (3,14 / 40,0) \cdot 100 = 7,85\%$ , где  $S_{\text{ост}}$  – остаточное среднеквадратическое отклонение с числом степеней свободы  $f_R = 6 - 2 = 4$ .

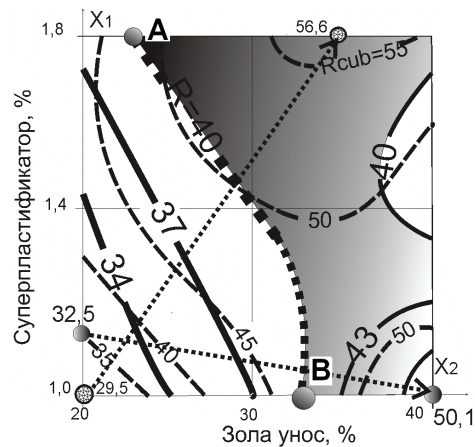
Задача повышения однородности заключалась, в частности, в управлении систематической и случайной составляющими. Для минимизации систематической составляющей необходимо уменьшение угла  $\omega$  наклона кривой по отношению к оси столба. Минимизация случайной составляющей состоит в уменьшении разброса случайных оценок  $R_i$  или колебаний величины  $R$  от линии регрессии, описываемой уравнением  $R = a_0 + a_1 h$ .

Предполагалось существование таких комбинаций добавок, которые будут существенно влиять на показатели линейного поля свойств, в том числе на систематическую и случайную составляющие неоднородности.

Для рассмотренных критериев неоднородности построены экспериментально-статистические модели – полиномы, дополненные эффектами взаимодействия  $b_i b_{jj}$  и  $b_{ii} b_{jj}$  для повышения точности описания связи с рецептурными факторами [5].

На диаграмме (рис. 2) в координатах «содержание суперпластификатора  $X_1$  – содержание наполнителя  $X_2$ » совмещены изолинии модели прочности бетона на сжатие, определенной в стандартных образцах  $R_{\text{cub}}$ , и модели средней прочности  $R_{\text{cp}}$  бетона, определенной как среднее значение всех испытанных фрагментов столба.

Повышение (в 1,7 раза) средней прочности  $R_{\text{cp}}$  в наибольшей степени зависит от содержания золы и, в значительно меньшей степени, – от содержания суперпластификатора. Кубковая прочность  $R_{\text{cub}}$  возрастает (максимально – в 1,9 раз) пропорционально повышению дозировок обеих добавок.

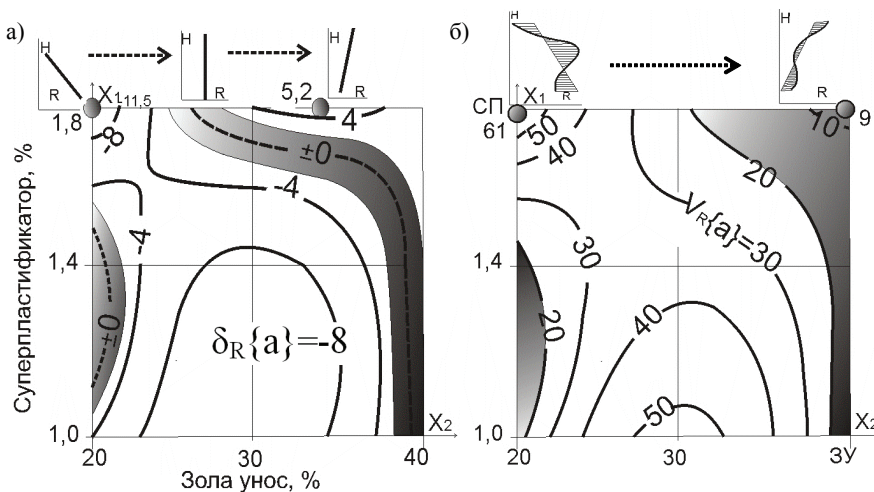


**Рисунок 2** – Диаграмма, показывающая влияние двух модификаторов на среднюю прочность в столбе  $R_{cp}$  и стандартных образцах  $R_{cub}$ .

Поэтому координаты точек максимума  $R_{cub}$  и  $R_{cp}$  не совпадают, а сами значения максимальных прочностей отличаются на 15 %.

Таким образом, технологические воздействия, направленные на повышение класса бетона, могут быть не оптимальны с позиций повышения однородности свойств бетона в конструкции.

Неравномерность распределения компонентов в бетоне при сегрегации может привести к появлению локальных участков в элементе, где прочность (класс бетона) меньше, чем расчетная. Наибольшее значение систематического показателя  $\delta_R\{a\}_{min} = -11,5\%$  со знаком «-» определяется в области высокого содержания суперпластификатора СП = 1,8 % и низкого содержания золы ЗУ = 20 % (рис. 3а). Выравнивание эпюры относительно оси столба происходит вдоль изолинии  $\delta_R\{a\} = \pm 0$  в выделенном коридоре, ограниченном изолиниями  $\delta_R\{a\} = -1$  и  $\delta_R\{a\} + 1$ .



**Рисунок 3** – Влияние модификаторов на систематическую  $\delta_R\{a\}$  и случайную  $V_R\{a\}$  (б) составляющие неоднородности поля прочности.

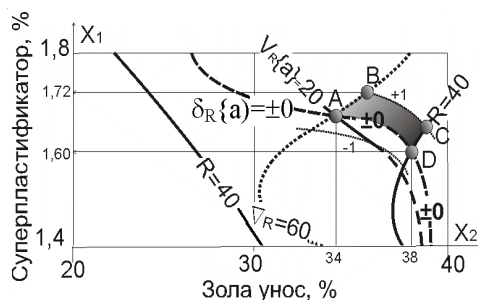
Точка максимальной систематической составляющей  $\delta_R\{a\}_{max} = 5,2\%$  со знаком «+» определяется уже повышенным содержанием золы уноса (ЗУ = 34 %). Эффективность микронаполнителя весьма значительна с позиций управления случайной составляющей неоднородности поля прочности в вертикально формируемом элементе.

В первом случае при отрицательных величинах ( $-\delta_R\{a\}_{max}$ ) имеет место наибольший левосторонний наклон аппроксимирующей кривой – прочность бетона вверху столба намного меньше, чем у основания. Причину этого следует искать в том, что при сегрегации компонентов смеси верхние слои столба интенсивно насыщаются водой, поэтому прочность верхних слоев меньше, чем у подошвы.

В случае положительных значений ( $+\delta_R\{a\}_{\max}$ ) прочность верхней части столба выше, чем в нижней. При повышении количества наполнителя от  $3Y_{\min} = 20$  до  $3Y_{\max} = 40$  % в области высоких концентраций суперпластификатора (СП = 1,8 %) случайная составляющая неоднородности (рис. 3б) уменьшается от  $V_R\{a\}_{\max} = 61$  % до  $V_R\{a\}_{\min} = 9,0$  %. Уменьшение этого показателя в 6,8 раза может свидетельствовать о повышении устойчивости бетонных смесей к случайным колебаниям технологии.

Случайная составляющая неоднородности более эффективно снижается за счет введения дисперсного наполнителя, а не суперпластификатора. При этом уменьшение систематической составляющей требует иных концентраций микронаполнителя, чем уменьшение случайной составляющей. Рациональное количество добавки зависит от инженерного обоснования случайной и/или систематической составляющих неоднородности линейного поля свойств в конкретном изделии или его элементе.

При совмещении изолиний  $R_{\text{ср}} = 40$  МПа и показателей однородности поля  $\delta_R\{a\}$ ,  $V_R\{a\}$  определена зона оптимальных концентраций добавок (суперпластификатор 1,60...1,72 % и золы уноса 34...38 %), обеспечивающих повышенную однородность бетона. В найденной компромиссной области (ограниченной точками А, В, С, D на рис. 4) достигается средняя прочность по столбу 40...43 МПа, случайная составляющая уменьшается до  $V_R\{a\} \leq 20$  %, систематическая приближается к нулю ( $\delta_R\{a\} = \pm 1$ ), что значительно лучше, по сравнению с другими рецептурными решениями в этом же факторном пространстве.



**Рисунок 4** – Графическое решение задачи выбора концентраций добавок для бетонов с высокой однородностью прочности в элементе.

## ВЫВОДЫ

При оптимальном управлении составом и концентрацией добавок достигается повышение равномерности полей свойств самоуплотняющегося бетона. Информация об эффективности управления пространственными полями свойств бетона обеспечивает гарантированные инженерные решения по повышению однородности свойств СУБ в конструкциях сложной конфигурации и вертикального формирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szwabowski, J. Technologia betonu samozagęszczalnego [Текст] / J. Szwabowski, J. Gołaszewski. – Krakow : Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2010. – 160 s.
2. Specification and Guidelines for self-compacting concrete [Текст]. – [S. l.] : EFNARC, 2002. – 32 p. – ISBN 0-9539733-4-4.
3. Czołgosz, R. Beton SCC i ASCC w prefabrykacji [Текст] / R. Czołgosz, W. Świerczyński // Materiały Budowlane. – 2000. – 11. – S. 21–24.
4. Voznesensky, V. The application of experimental statistical models to multi-criterion design of claydite concrete [Текст] / Voznesensky V., Koval S., Liashenko T., Kushneruk V. // Structural Lightweight Aggregate Concrete: Proc. SEB/FIB Int. Symp. (Editors: I. Haland, T. A. Hammer, and F. Fluge). Norwegian Concrete Association, Oslo-Sundefjord, Norway, 1995. – PP. 650–661.
5. Коваль, С. В. Моделирование и оптимизация состава и свойств модифицированных бетонов [Текст] / С. В. Коваль. – Одесса : Астропринт, 2012. – 424 с.

Получено 15.12.2012

С. В. КОВАЛЬ, С. В. САВЧЕНКО

ВПЛИВ ДОБАВОК НА ОДНОРІДНІСТЬ МІЦНОСТІ БЕТОНУ В  
БУДІВЕЛЬНОМУ ЕЛЕМЕНТІ

Одеська державна академія будівництва і архітектури

Проектування бетонних сумішей, що самоущільнюються, розтікаючись під дією власної маси, ускладнюється необхідністю забезпечення їх однорідності в будівельному елементі або конструкції, що особливо важливо для т. з. систем без резервування – резервуарів, екранів, трубопроводів тощо. Оцінка впливу добавок (суперпластифікатора і золи-виносу) на показники неоднорідності полів властивостей бетону в елементі проведена з використанням статистичних моделей. Показана ефективність добавок з позиції зменшення систематичної (гравітаційної) і випадкової складових полів неоднорідності міцності бетону в стовпчастому елементі вертикального формування.

**бетон, що самоущільнюється, однорідність, наповнювач, суперпластифікатор**

SERGIJ KOVAL, SVITLANA SAVCHENKO

INFLUENCE OF ADDITIVES ON HOMOGENEITY OF CONCRETE STRENGTH  
IN ELEMENTS

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Design of self-compacting concrete is complicated by the need to ensure their homogeneity in the building element or structure, which is especially important for the so-called non-redundant systems – tanks, screens, pipes, etc. Assessing the impact of supplements (superplasticizer and fly ash) on the parameters of the inhomogeneity of the fields of concrete properties in the elements was carried out with the use of statistical models. The effectiveness of supplements had shown from a position of reduction of the systematic position (gravity) and the random components of the fields of inhomogeneity of the concrete strength in the columnar element of vertical molding.

**self-compacting concrete, homogeneity, additive, superplasticizer**

**Коваль Сергей Володимирович** – доктор технічних наук, професор Одеської державної академії будівництва і архітектури, кафедра процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів. Наукові інтереси: будівельне матеріалознавство, модифіковані бетони.

**Савченко Світлана Валентинівна** – кандидат технічних наук, доцент Одеської державної академії будівництва і архітектури, кафедра процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів. Наукові інтереси: термодинаміка, процеси прискореного тверднення бетонів.

**Коваль Сергей Владимирович** – доктор технических наук, профессор Одесской государственной академии строительства и архитектуры, кафедра процессов и аппаратов в технологии строительных материалов. Научные интересы: строительное материаловедение, модифицированные бетоны.

**Савченко Светлана Валентиновна** – кандидат технических наук, доцент Одесской государственной академии строительства и архитектуры, кафедра процессов и аппаратов в технологии строительных материалов. Научные интересы: термодинамика, процессы ускоренного твердения бетонов.

**Sergij Koval** – DrSc(Eng), Professor, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Processes and Apparatuses in the Technology of Building Materials Department. Scientific interests: building materials science, modified concretes.

**Svitlana Savchenko** – PhD (Eng.), Assistant Professor, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Department of Processes and Apparatuses in the Technology of Building Materials. Scientific interests: thermodynamics, speed-up hardening of concrete.