

Высокотемпературные материалы и технологии в XXI веке: науч.-техн. конф., 12-13 мая 2008 г.: тезисы докл. – Томск. – [http // chemstud.ghtd.tpu.ru](http://chemstud.ghtd.tpu.ru). **9.** Семченко Г.Д. Термодинамическое исследование возможности низкотемпературного синтеза SiC в системе Si-O<sub>2</sub>-C / [Г.Д. Семченко, И.Ю. Шутеева, М.А. Куценко и др.] // Современные проблемы термодинамики и теплофизики: всерос. конф., 1 – 3 декабря 2009 г.: тезисы докл. – Новосибирск, 2009. – С. 187. **10.** Шутеева И.Ю. Исследование изменения фазового состава при формировании покрытий по графиту в процессе нагревания в аргоне / [И.Ю. Шутеева, М.И. Рыщенко, Г.Д. Семченко и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». – 2009. – № 45. – С. 178 – 183. **11.** Семченко Г.Д. Самоотвердеющие покрытия для защиты от окисления графитовых изделий / Г.Д. Семченко // Огнеупоры и техническая керамика. – 1997. – № 5. – С. 19 – 23. **12.** Семченко Г.Д. Современные процессы в технологии конструкционной керамики / Г.Д. Семченко. – Харьков: Гелиос, 2011. – 276 с.

Поступила в редколлегию 26.07.11

УДК 691.175:519

**С. КОВАЛЬ**, докт. техн. наук, проф.,  
Варминско-Мазурский Университет, Ольштын, Польша  
**М. СИТАРСКИ**, магистр-инженер,  
Варминско-Мазурский Университет, Ольштын, Польша  
**Н. АБИД**, аспирант, ОГАСА, Одесса

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБАВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

З використанням спеціальних технологічних тестів, статистичного моделювання і компромісної оптимізації досліджена ефективність добавок для бетону, що самоупільнюється.

С использованием специальных технологических тестов, статистического моделирования и компромиссной оптимизации исследована эффективность добавок для самоуплотняющегося бетона.

With the using of the special technological tests, statistical modeling and compromise optimization researched efficiency of additions for the self-compacting concrete.

Самоуплотняющийся бетон (*Self-Compacting Concrete, SCC*) – бетон из смесей, способных уплотняться без вибрации с вытеснением воздуха, полностью заполняющих форму в густоармированных конструкциях без сегрегации – является «прорывом» в технологии бетона [1]. Уникальные свойства таких бетонов достигаются за счет введения «гиперсуперпластификаторов» и других полифункциональных добавок новых поколений, многофракционных

дисперсных наполнителей и заполнителей.

Разработка многокомпонентных бетонов типа *SCC* базируется на использовании новых эмпирических и математических подходах, в том числе вычислительных экспериментов на многофакторных моделях составов и свойств [1, 2].

С учетом высокой чувствительности бетонов *SCC* к колебаниям факторов рецептуры, оценку эффективности добавок целесообразно вести не на одном или нескольких составах бетона, а на некотором их множестве. Это позволяет, в частности, оценить возможность стабилизации свойств бетона, а также сокращения расхода дорогостоящих добавок.

Для решения таких рецептурно-технологических задач эффективны экспериментально-статистические модели (ЭС-модели), полученные на основании результатов оптимально планируемых экспериментов [3].

Верификационные тесты самоуплотняющихся смесей построены на оценке их реологических свойств – вязкости, текучести, однородности и др. [4]. Если смесь не отвечает какому-либо нормативному уровню, она переводится в более низкий класс или вообще не признается самоуплотняющейся.

В работе [2] определены составы с необходимым диаметром расплыва смеси («*Slump-flow test*») и малой степенью расслоения – параметрами, доступными для оценки в условиях заводских лабораторий.

Дальнейшие исследования на специальном оборудовании включали оценку вязкости по времени расплыва бетонной смеси и продолжительности истечения из воронки («*V-funnel-Test*»), а также способности к нивелированию и преодолению препятствий («*L-box Test*»). Последний параметр – отношение уровней бетонной смеси до ( $H_1$ ) и после ( $H_2$ ) прохождения сквозь «гребень» арматурных стержней заданного диаметра.

Ряд этих методик входит в европейские нормы EN 206-9 на бетон, другие – рекомендуются специальными документами (рис. 1) [4]. Вышеуказанные параметры служили критериями для оценки эффективности добавок в бетоны типа *SCC*. Реализован план эксперимента, в котором изменялись концентрации поликарбоксилатного суперпластификатора на уровнях  $SP = X_1 = 1,4 \pm 0,4$  % от массы цемента и золы уноса («*poriol lot-пол.*») в диапазоне  $P1 = X_2 = 30 \pm 10$  %. Опыты (табл. 1) проведены с практически равноподвижными смесями – диаметр расплыва конуса  $D = 70$  см  $\pm$  2 см, что достигалось за счет корректировки расхода воды.

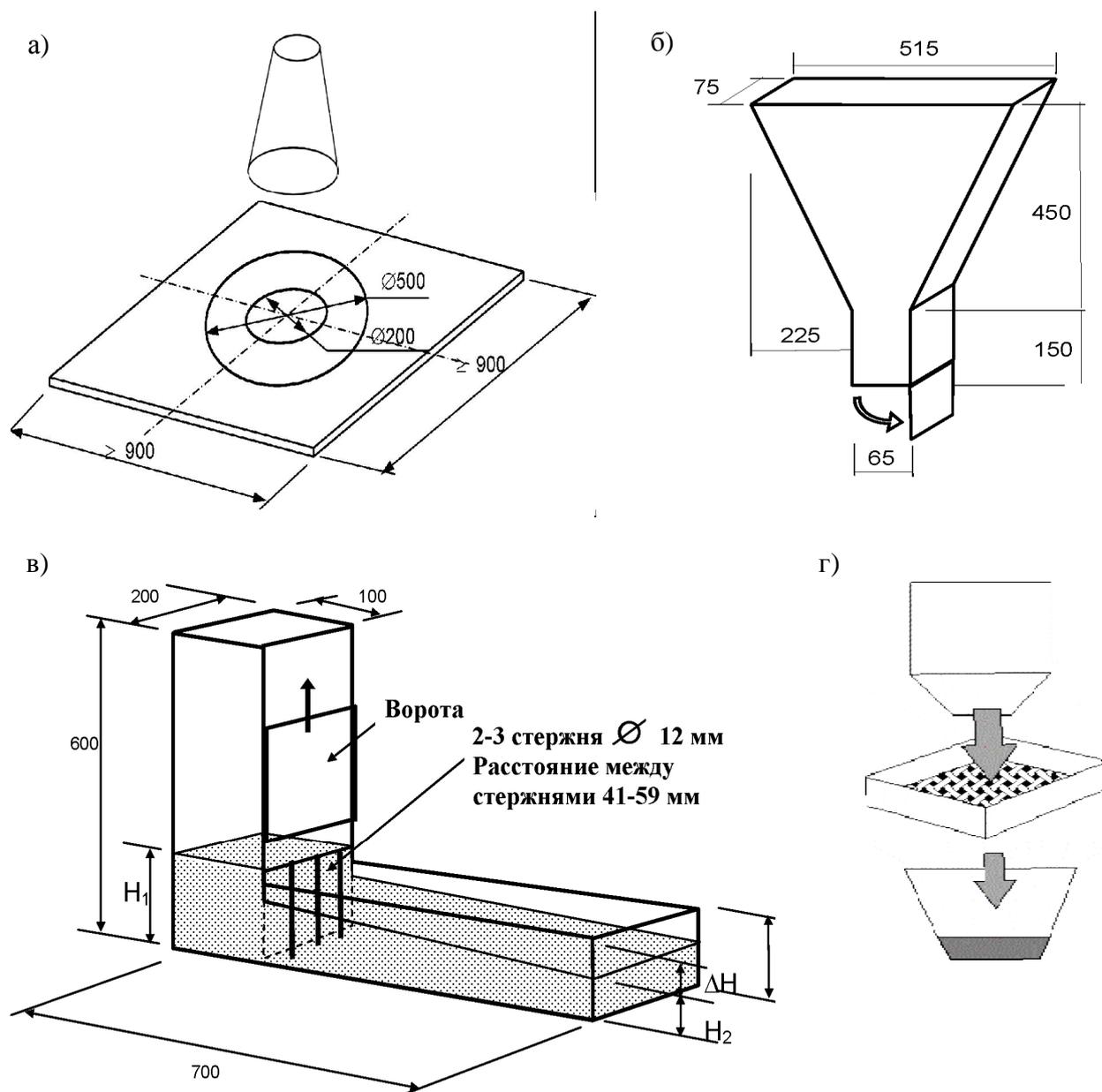


Рис. 1. Схемы оборудования для оценки качества смеси, рекомендуемого «European Guidelines for Self-Compacting Concrete» [4]

Анализ результатов экспериментов (таблица) показывает, что составы № 1 и № 4 не удовлетворяют требованиям по одному из критериев. В этом случае они могут рассматриваться как «квзисамоуплотняющиеся» (*Almost Self-Compacting Concrete, ASCC*), для которых допускается применение вибрации [5].

Для описания влияния добавок использовались приведенные полиномы вида:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{112}x_1^2x_2 + b_{122}x_1x_2^2 + b_1x_2 + b_{22}x_2^2, \quad (1)$$

где  $x_1, x_2$  – нормализованные переменные значения дозировок SP и золы уноса.

Модель (1) описывает при заданном уровне риска  $\alpha$  и ошибке эксперимента  $s_3$ , индивидуальное влияние факторов  $x_i$ , а также взаимодействия между ними с учетом возможного синергизма за счет включения эффектов типа  $b_{ij}x_i^2x_j$ .

Таблица

Результаты испытаний и классы бетонных смесей

№	План		Дозировки добавок		Оценка консистенции смеси		Оценка пластической вязкости бетонной смеси				Оценка самонивелирования	
	$x_1$	$x_2$	СП, %	PI, %	D, см	Класс	$T_{50}$ , с	Класс	$T_v$ , с	Класс	$H_2/H_1$	Класс
1	–	–	1,0	20	72	SF2	2,5	VS2	7,0	VF1	0,65	–
2	–	0	1,0	30	69	SF2	4,0	VS1	12,0	VF2	0,91	PA2
3	–	+	1,0	40	71	SF2	4,0	VS1	24,0	VF2	1,0	PA2
4	0	–	1,4	20	70	SF2	2,5	VS2	10,0	VF2	0,76	–
5	0	0	1,4	30	72	SF2	6,0	VS1	15,0	VF2	0,83	PA2
6	0	+	1,4	40	69	SF2	10,0	VS1	50,0	VF2	0,91	PA2
7	+	–	1,8	20	72	SF2	2,0	VS2	16,0	VF2	0,82	PA2
8	+	0	1,8	30	70	SF2	4,0	VS1	11,0	VF2	0,91	PA2
9	+	+	1,8	40	71	SF2	5,0	VS1	30,0	VF2	0,94	PA2

Изменение водосодержания  $W$  (%) смеси при варьировании количеством добавок описывает зависимость (2) со всеми значимыми коэффициентами:

$$W = 179,9 - 2,5x_1 + 2,7x_1^2 - 0,3x_1x_2 + 0,3x_1^2x_2 - 0,3x_1x_2^2 - 5,0x_2 + 0,2x_2^2 \quad \alpha = 0,2; \\ [s_3 = 0,1 \text{ дм}^3/\text{м}^3] \quad (2)$$

Из анализа модели (2) на рис. 2а следует, что одновременное увеличение дозировок добавок (в границах эксперимента) положительно сказывается на водоредуцировании бетонных смесей. Однако, чувствительность параметра  $W$  к изменению дозировок добавок в смесях SCC значительно меньше, чем в обычных.

«Марочная» прочность  $R_{28}$  (МПа), при высоком содержании золы может возрастать не пропорционально уменьшению водоцементного отношения, что следует из анализа представленной на рис. 2б зависимости (3):

$$R_{28} = 48,7 + 4,1x_1 \pm 0x_1^2 - 4,2x_1x_2 + 6,5x_1^2x_2 - 1,7x_1x_2^2 + 3,2x_2 - 3,2x_2^2, \\ [\alpha = 0,2; s_3 = 0,4 \text{ МПа}]. \quad (3)$$

Показатель  $R_{28}$  изменяется более чем в 1,5 раза при переходе от низких к высоким концентрациям добавок (что свидетельствует о его большей чувствительности) и достигает максимума  $R_{28} = 54,3$  МПа при  $SP = 1,8$  % и  $PI = 35$  %.

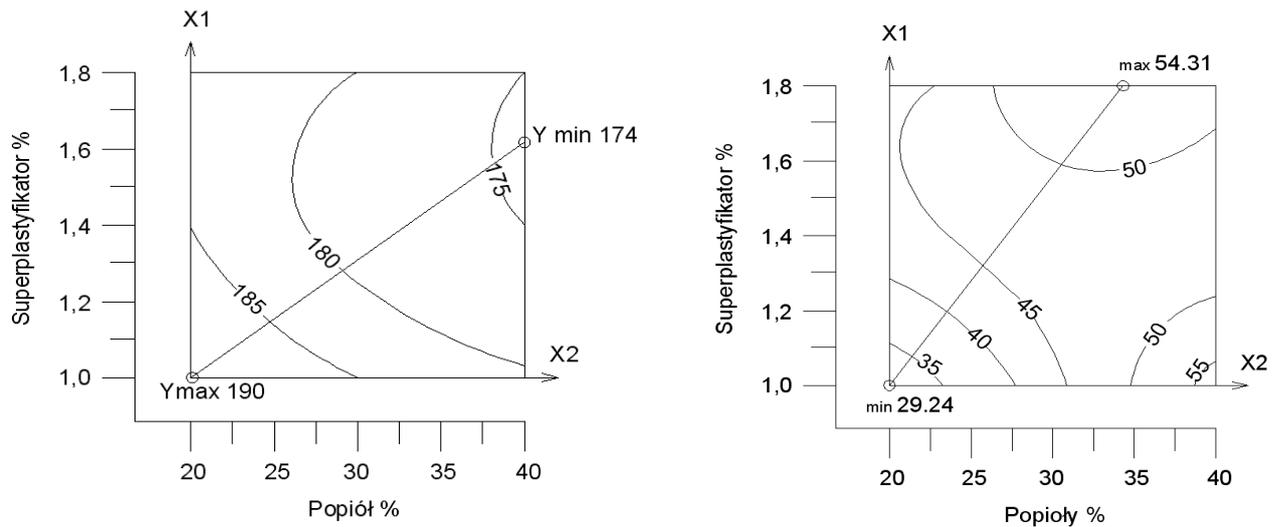


Рис. 2. Влияние добавок на водосодержание бетонной смеси  $W$ , %, (а) и «марочную» прочность  $R_{28}$  (МПа) бетона в возрасте 28 сут (б)

Время  $T_{50}$  (в секундах) расплыва бетонной смеси до диаметра 50 см, характеризующее скорость заполнения смесью опалубки, зависит, в первую очередь, от содержания золы уноса, что следует из анализа модели (4):

$$T_{50} = 6,4 \pm 0x_1 - 2,6x_1^2 + 0,4x_1x_2 - 2,6x_1^2x_2 \pm 0x_1x_2^2 + 3,8x_2 - 0,3x_2^2, \\ [\alpha = 0,2; s_3 = 0,2 \text{ с}] \quad (4)$$

Увеличение количества золы влияет на повышение времени расплыва бетонной смеси. В то же время суперпластификатор с позиций сокращения этого времени эффективен лишь в концентрациях 1,0.. 1,2 % или 1,6...1,8 % (рис. 3.а). Влияние добавок на время (в секундах) истечения бетонной смеси из воронки V-funnel описывает зависимость  $V_f$ :

$$T_v = 18,2 \pm 0x_1 - 8,3x_1^2 \pm 0x_1x_2 - 12,3 x_1^2x_2 + 3,8 x_1x_2^2 + 20,0x_2 + 10,2x_2^2, \\ [\alpha = 0,2; s_3 = 1,8 \text{ с}]. \quad (5)$$

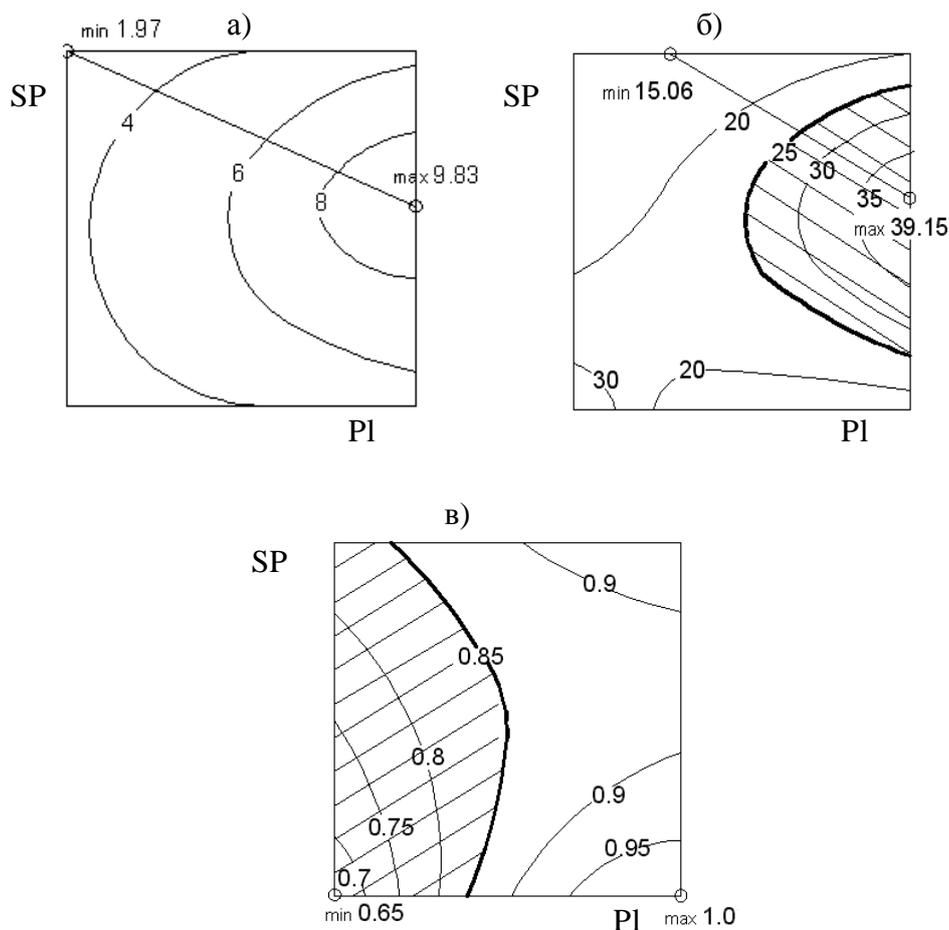


Рис. 3. Влияние добавок на время расплыва  $T_{50}$  (а) и истечения  $T_v$  (б) бетонной смеси, а также показатель самонивелирования  $H_2/H_1$  (в) (выделены области, не удовлетворяющие требованиям к SCC)

Увеличение количества золы приводит к увеличению времени  $T_v$  истечения в 1,3...1,5 раза. Суперпластификатор в зоне малого содержания золы уноса максимально понижает вязкость, судя по сокращению времени  $T_v$ .

Влияние добавок на параметр  $H_2/H_1$ , характеризующий способность бетонной смеси к самонивелированию, описывает зависимость вида:

$$H_2/H_1 = 0,86 \pm 0x_1 + 0,04x_1^2 - 0,06x_1x_2 + 0,04x_1^2x_2 + 0,03x_1x_2^2 + 0,08x_2 - 0,04x_2^2, \\ [\alpha = 0,2; s_3 = 0,02]. \quad (6)$$

Анализ графического отображения модели (б) показывает, что при повышении количества золы способность бетонной смеси к самонивелированию возрастает. Суперпластификатор улучшает эти свойства только при повышенном содержании наполнителя.

Поиск оптимальных решений велся на двухфакторных диаграммах при

совмещении изолиний уровней показателей качества.

Найдена компромиссная оптимальная область {A,B,C} дозировок добавок (рис. 4) в которой обеспечиваются классы SF2/VS1/VF2/PA2 самоуплотняющихся бетонных смесей при достижении высоких для этих классов уровней: консистенции ( $D = 70$  см), времени расплыва ( $T_{50} \leq 4 \dots 6$  с) и истечения ( $T_v \leq 15 \dots 20$  с), а также способности в нивелированию ( $H_2/H_1 = 0,85 \dots 0,9$ ).

Прочность затвердевшего бетона составляет  $R_{28} = 50 \dots 54$  МПа.

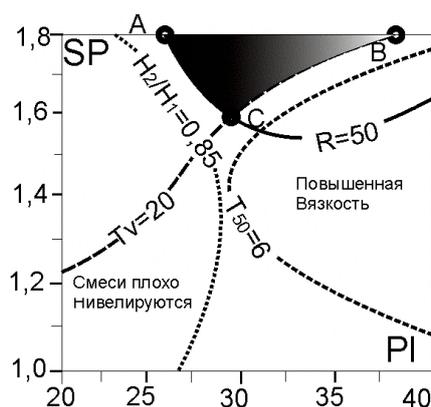


Рис. 4. Поиск области компромисса

Заданные уровни параметров качества SCC обеспечиваются дозировкой добавок  $SP = 1,6 \dots 1,8$  % и  $PI = 23 \dots 36$  %. Минимизация расхода поликарбоксилатного SP достигается при введении в бетонную смесь золы уноса в количестве 30 %.

**Список литературы.** 1. Okamura H. Mix Design for Self-Compacting Concrete / H. Okamura, K. Ozawa // Concrete Library of JSCE. – 1995. – № 25. – P. 107 – 120. 2. Коваль С.В. Использование метода Монте-Карло для поиска составов самоуплотняющихся бетонов / С.В. Коваль, М. Циак, М. Ситарски // Вісник НТУ «ХП». – 2009. – № 45. – С. 184 – 191. 3. Коваль С.В. Применение моделей в задачах оптимизации модифицированных бетонов / С.В. Коваль // Вісник ОДАБА. – № 12. – 2003. – С. 136 – 142. 4. The European Guidelines for Self Compacting Concrete” Specification, Production and Use, 2005. 5. Śliwiński J. Spostrzeżenia z praktycznego projektowania składu betonów samozagęszczalnych (SCC). IV Sympozjum Naukowo / J. Śliwiński, R. Czółgosz. // Techniczne. Reologia w technologii betonu. – Gliwice, 2002. – P. 61 – 75.

Поступила в редколлегию 25.07.11