

Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Прядко Н.С. Выбор критической плотности энергии при тонком измельчении // Обогащение руд. – С.-Пб.: – 2007, – № 5. – С. 7 – 10. 3. Аперидический датчик для регистрации акустических сигналов: А.с. 512602 СССР / В.Н. Бовенко, В.И. Полуин (СССР). – Оpubл. 30.08.76, Бюл. №16. – 2 с. 4. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Бовенко В.Н., Щербаков А.Е., Прядко Н.С., Верхоробина И.В. Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вип. № 27. – С. 33 – 41. 5. P.I. Pilov, L.J.Gorobets, V.N. Bovenko, N.S. Pryadko An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles // Науковий вісник НГУ. – 2008, № 6. – С. 23 – 26. 6. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С. О физических критерия разрушения и диспергирования // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вип. № 28. – С. 26 – 32.

Поступила в редколлегию 11.09.08

УДК 668.98

М. ЦИАК, канд. техн. наук, **С. КОВАЛЬ**, докт. техн. наук,
Университет Варминского-Мазурский в Ольштыне, Польша

КОМПРОМИССНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Побудовані та проаналізовані експериментально-статистичні моделі для оптимізації впливу модифікуючих добавок та параметрів зернового складу на показники якості бетонів, що самоущільнюються.

Created and analyzed experimental-statistical models for optimization of modificative add-mixtures influence and granulometric composition parameters to quality index of self-compacting concrete.

Введение. Самоуплотняющийся бетон – *Self-Compacting Concrete* (SCC) – бетон из смесей, способных уплотняться без вибрации, полностью заполняющих форму в густоармированных конструкциях [1]. Высокая эффективность SCC способствовала созданию рабочей группы RILEM (1996) для разработки рекомендаций по использованию SCC. В 2004 году организован технический комитет 205-DSC “Долговечность самоуплотняющегося бетона”. В результате исследований была разработана классификация самоуплотняющихся бетонов (*Specification and Guidelines for SCC*), определяющая их назначение и области применения.

Как правило, для выполнения условий самоуплотнения состав обычного бетона должен быть существенно усложнен за счет введения специальных химических и минеральных добавок (с размером дисперсных частиц $< 0,125$ мм – микрокремнезем, зола-унос, молотый кварцевый песок и др.), многофракционного заполнителя. Характерно, что в случае SCC требования к прочности не всегда являются первостепенными (так как обеспечиваются высокой водоредуцирующей способностью поликарбоксилатных и других «мощных» суперпластификаторов, снижающих В/Ц до 0,3 – 0,4); приоритетными становятся показатели диаметра и времени расплыва смеси под собственной массой, водоотделения, вытеснения воздуха и сегрегации. Пылевидные компоненты, присутствующие в количестве не менее 35 % объёма смеси, стабилизируют и повышают её вязкость, удерживая зерна крупного заполнителя; при этом смесь в присутствии СП расплывается без вибрации.

Пока не существует общепризнанной методики подбора состава SCC, требования к его качеству сформулированы в общем виде; существующие рекомендации построены на новых экспериментальных тестах («L-Box Test», «U-Funnel Test» и др.), имитирующих поведение смеси в конструкции [2, 3]. Разработки составов и испытания, применимые к обычным бетонам, не отражают всех свойств SCC (что приведёт, вероятно, в будущем к противоречию с существующими нормативными документами).

Принимая концепцию проектирования самоуплотняющегося бетона как грубодисперсного композиционного материала, теоретический анализ можно вести в отношении двухкомпонентной системы – минеральная матрица и «каркас» заполнителей. Факторы, влияющие на свойства каркаса – форма, поверхность и рельеф зерен, плотность, соотношение и др. Факторы, определяющие свойства «матрицы» – химические добавки, состав и дисперсность цемента, минеральных добавок, их совместимость и др.

Многокомпонентность состава и значительное количество критериев качества определяют бетоны типа SCC как «удачный» объект для моделирования и многопараметрической оптимизации, особенно при оценке возможности использования новых компонентов и необходимости уменьшения интеллектуальных, материальных и временных затрат на проектирование.

При исследовании моделей выявляются оптимальные концентрации добавок $z_{i\text{opt}} = f(x_j)$, области экстремума значений свойств $Y_i \text{ max}$ и $Y_i \text{ min}$, допустимых Ω_d и компромиссных Ω_k решений при нормированных показателях $Y_j \text{ norm}$, и решаются другие инженерные задачи [4].

Для анализа влияния факторов и оптимизации состава SCC использованы экспериментально-статистические модели (ЭС-модели), полученные при реализации 27 опытных точек (составов) по D-оптимальному плану эксперимента Na_5 . В группе факторов управления свойств «матрицы» изменялись на трех уровнях дозировка поликарбоксилатного суперпластификатора BV-10 ($SP = X_1 = 1,4 \pm 0,4$ % от массы цемента), содержание наполнителя (Н) – золы уноса фильтров ТЭС, «popioł lotny», в диапазоне ($P_{op} = 30 \pm 10$ %) и водоцементное отношение ($C/W = 0,43 \pm 0,03$). Свойства «каркаса» регулировались долей песка в смеси заполнителя ($P_p = 50 \pm 5$ %) и содержанием мелкой фракции щебня 4 – 8 мм в крупной 8 – 16 мм: ($Z_d = 50 \pm 10$ %). Водосодержание смесей менялось от 172 до 196 dm/m^3 , расход дорожного цемента СЕМ I 42,5 HSR/NA постоянный $C = 400$ $кг/м^3$.

В соответствии с рекомендациями EFNARC [3] экспериментально определялись диаметр расплыва бетонной смеси D , см, время T_{50} и T_{70} расплыва до $D_1 = 50$ см и $D_2 = 70$, показатель сегрегации SR (как процентное отношение растворной части смеси в нижней и верхней части вибрированного вертикально трубчатого образца), воздухоовлечение $ВВ$, а также прочность затвердевшего бетона R в возрасте 3 и 28 суток нормального твердения.

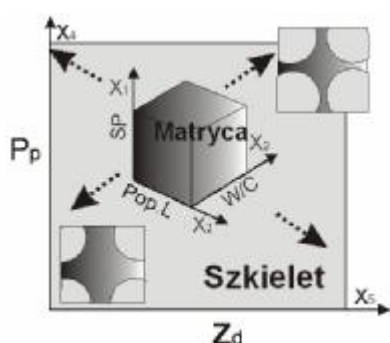


Рис. 1. Схема поиска рецептурных решений

Схема на рис.1 отражает один из принципов поиска оптимальных составов по ЭС-моделям [4]. В ходе компьютерного анализа поле свойств «матрицы» в координатах факторов СП, Н и В/Ц, перемещается по локальному полю, формируемому факторами управления «каркасом» заполнителя. С позиций анализа структуры, в этом случае, меняются условия модификации матрицы, объем межзернового пространства, крупность зерен и т.п.

Так, для расплыва конуса смеси получена (при ошибке эксперимента $s_3 = 1,7$ см и одностороннем риске $\alpha = 0,2$) структурированная модель второго порядка, в которой выделены блоки двух подсистем факторов.

Блок (а), включающий оценки влияния на D трех факторов «матрицы» при среднем уровне факторов «каркаса», описывает локальное поле $D(x_1, x_2, x_3)$ при $x_4, x_5 = 0$; изменение этого поля с изменением количества песка и крупного заполнителя отражают блоки (b) и (c). С другой стороны, блок (b) соответствующий локальному полю $D(x_4, x_5)$ при $x_1, x_2, x_3 = 0$, оце-

нивает влияние доли песка и крупности щебня при средних уровнях дозировки СП, Н и В/Ц. Блок (с) представляет изменения в эффектах взаимодействий.

$$D = 69,1 \begin{array}{|l} +6,8x_1 \pm 0,0x_1^2 +4,6x_{12} +5,3x_{13} -1,7x_{14} \\ \pm 0,0x_2 -6,5x_2^2 \pm 0,0x_{23} +2,8x_{15} \\ +9,3x_3 \pm 0,0x_3^2 \quad (a) +1,8x_{24} \\ -4,1x_4 -4,7x_4^2 -1,0x_{45} \quad (b) \pm 0,0x_{25} \\ -1,9x_5 \pm 0,0x_5^2 \quad (b) +2,3x_{34} \\ +1,3x_{35} \quad (c) \end{array}$$

Максимальный уровень поля (1) $D_{am} = 79$ см, минимум $D_{in} = 23$ см, т.е. изменение этого свойства в исследуемой области составов более чем трехкратное.

На рис.2 показано влияние пяти факторов в области минимума и максимума D, что моделирует условия «хорошей» и «плохой» рецептуры бетона [4]. Введение СП в любом случае приводит к увеличению расплыва, как и повышение водосодержания бетонной смеси. Концентрация дисперсной минеральной добавки имеет оптимум $Pop_{opt} = 32,9$ %, как и содержание песка в смеси $Pp_{opt} = 48$ %. Аналогичный анализ T_{50} указал на удлинение времени расплыва при повышении количества песка и минеральной добавки, быстро адсорбирующих жидкую фазу.

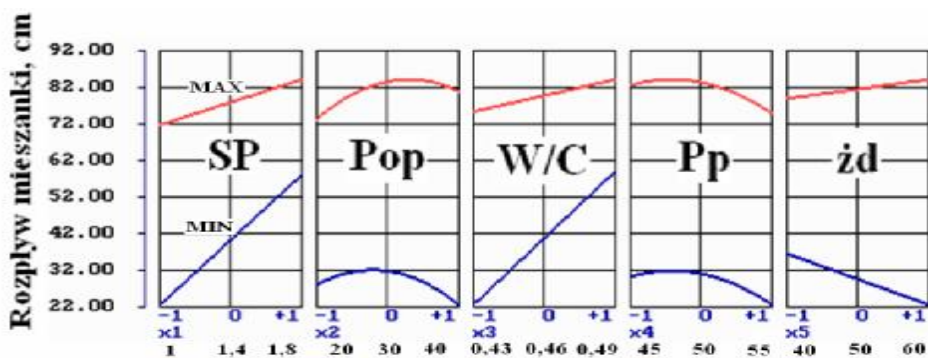
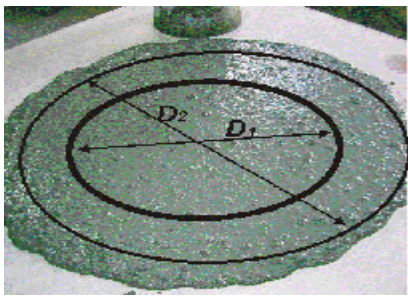


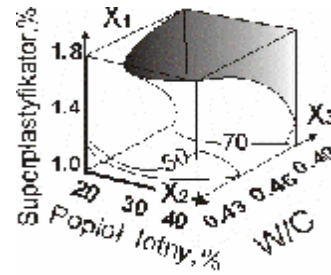
Рис. 2. Зависимости влияния факторов состава в области максимума и минимума показателя D

Одним из обобщающих показателей полей свойств материалов, характеризующих устойчивость технологии, является объем допустимой области $0 \leq \Omega_d \leq 100$ %, относительный к исследуемому факторному пространству (в нормализованных переменных). Чем ближе значения Ω к нулю, тем сложнее

технологу реализовать выбранное в этой области эффективное решение [5].



а)



б)

Рис. 3. Оценка характеристик расплыва D смеси (а) и диаграмма влияния факторов «матрицы» ($x_4, x_5 = 0$) с выделением области $D_2 \geq 70$ см (б)

На рис. 3б показана диаграмма влияния трех факторов матрицы на показатель расплыва D_2 , определенный экспериментально (рис. 3а), при фиксированном объеме песка $P_p = 50\%$ и 50 %-ном содержании щебня фр. 4/8. Область составов, обеспечивающих хорошую растекаемость смеси ($D_2 \geq 70$ см), находится в зоне высоких концентраций СП ($X_1 = 1,8\%$), повышенного содержания воды и средних дозировок наполнителя, занимая $\Omega_d = 45\%$ объема факторного пространства.

По мере изменения качественного и количественного состава зерновой части, объем области допустимых решений существенно меняется: от $\Omega_d = 5\%$ при высоком содержании песка и большом насыщении смеси крупным щебнем, до $\Omega_d = 55\%$ при оптимальных $P_p = 45\%$ и $\dot{z}_d = 50\%$ (рис. 4).

Одной из главных характеристик SCC является однородность бетонных смесей, которая, в свою очередь, зависит от сил связи между частицами (определяемых в бетонных смесях водосодержанием, модифицирующими добавками ПАВ и тонкодисперсными наполнителями), а

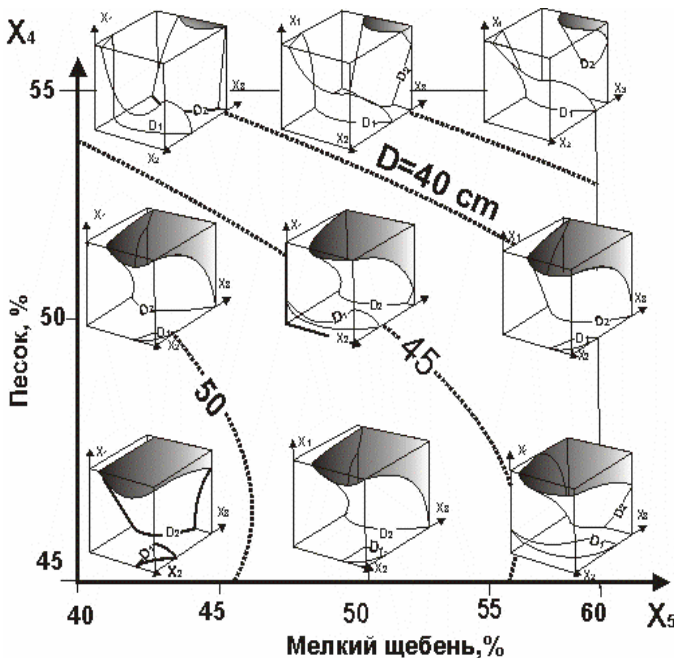


Рис. 4. Девять трехфакторных номограмм, показывающих зависимость эффективности матрицы от факторов «каркаса»

с другой – от особенностей зернового каркаса.

Введение в исследование дополнительных нормативных значений показателей качества SCC (в частности, $SR \leq 1 \%$, $D \geq 70$ см, $R_{28} \geq 60$ МПа) значительно сокращает искомые области рациональных рецептов (рис. 5).

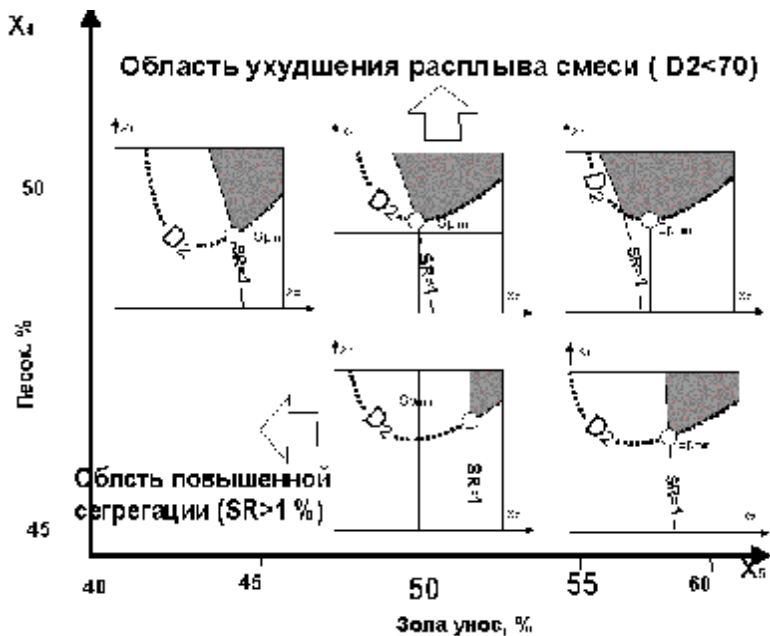


Рис. 5. Трансформация области компромиссных решений при изменении уровней параметров «каркаса» (точки отвечают минимально допустимой концентрации SP, W/C=0,43)

полнить требования ($SR \leq 1 \%$, $D \geq 70$ см, $R_{28} \geq 60$ МПа) практически весьма сложно без оптимизации параметров зернового состава.

Так как к наиболее дорогостоящим компонентам относятся поликарбоксилатный суперпластификатор, важна оценка возможности снижения его расхода без ухудшения качества бетонной смеси и затвердевшего бетона.

Сравнение координат точек на рис. 5 показывает, что без изменения свойств бетона за счет корректировки, в частности, количества золы уноса возможно снизить к-во СП практически в 1,2...1,3 раза.

Проведена идентификация оптимизированных составов относительно принадлежности к бетонам класса SCC. Так состав № 5 бетонной смеси (кг/м³): C = 400, W = 187, P = 756, щебень фр. 4/8 $\dot{z}_d = 404$, щебень фр. 8/16 $\dot{z}_g = 431$, SP = 6 кг, Поп = 154 кг обеспечивает расплыв конуса d = 75 см, что соответствует [2] классу SF2 по расплыву (d = 66...75 см). По показателю сегрегации – класс SR2 (раствороотделение менее 5 %). Класс SF2 определен

В случае уменьшения количества мелкой фракции щебня \dot{z}_d до $< 45 \%$ и песка Pp $< 48 \%$ существенно возрастает расслаиваемость смеси; в то же время добавление песка свыше 55 % приводит к резкому ухудшению расплыва.

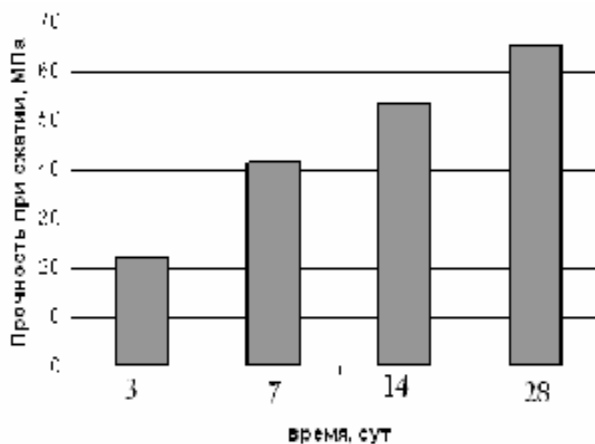
Если область Ω оказывается меньше 15%, то технологические решения становятся, как правило, неустойчивыми из-за увеличения в ней доли, связанной с риском моделирования [5]. Поэтому вы-

по времени расплыва $T_{50} = 5$ с и истечению из воронки «Funnel» ($T_v=12$ с).

Согласно проведенного теста «L-Box» (рис. 6а), устанавливающего способность смеси к самовыравниванию, бетонная смесь относится к классу RA2 (отклонение от горизонтали менее 0,2). Бетон достаточно быстро набирает прочность, и в «марочном» возрасте $R^{28} = 65,3$ МПа, что соответствует классу B60.



а)



б)

Рис. 6. Тест «L-Box» для оптимизированной смеси (а), рост во времени (б) и рост прочности бетона состава № 3

Неоспоримым преимуществам SCC противопоставляются более высокие затраты на материалы, разработку рецептуры, производство, обеспечение качества и контроль, по сравнению с обычным бетоном. Сферы применения SCC ограничены случаями, когда он может обеспечить наилучшее соотношение затрат и эффекта, например, в мостостроении, в многоэтажном монолитно-каркасном домостроении, при высоком насыщении армирующими элементами железобетонных конструкций.

Список литературы: 1. *Aïtcin P.C.: High-Performance Concrete. E & FN SPON, 1998.* 2. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete” Specification, Production and Use, 2005.* 3. *Specification and guidelines for self-compacting concrete, EFNARC, 2002.* 4. *Коваль С.В. Модифицированные бетоны: моделирование и оптимизация // Строительные материалы и изделия, 2004. – № 4. – С. 20 – 24.* 5. *Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 с.*

Поступила в редколлегию 11.09.08