

ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ
МЕЖДУНАРОДНАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ

ODESSA STATE ACADEMY
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE
INTERNATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING

МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ОПТИМИЗАЦИЯ
КОМПОЗИТОВ

Материалы к международному семинару,
посвященному **80-летию**

Виталия Анатольевича Вознесенского

Одесса, 22-23 апреля 2014

MODELLING
AND OPTIMISATION
OF COMPOSITES

Proceedings of the International Seminar
commemorating the **80th anniversary of the birth**
of *Vitaly Voznesensky*

Odessa, 22-23 April 2014

Одесса
«Астропринт»
2014

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ЛИТЫХ СМЕСЕЙ

Н.Р. Антонюк, Н.В. Лушников* (Одесса, Ровно", Украина)

Введение. Существуют разные подходы к поиску компромиссных решений при анализе экспериментально-статистических моделей свойств строительных материалов. Для данного поиска компромисса использован компьютерный итерационный метод (В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко), в котором используются экспериментально-статистические модели и метод статистических испытаний Монте-Карло [1] для случайного сканирования полей свойств. Преимуществом данного метода многокритериального поиска является возможность определения гарантирующих рецептурно-технологических решений разных уровней - допустимых, оптимальных и компромиссных.

Данный метод применен для поиска компромиссных составов высокопрочного бетона на основе литых смесей.

Условия натурного эксперимента. Объектом исследования являлись литые бетонные смеси и высокопрочные бетоны на их основе, модифицированные комплексной добавкой «суперпластификатор-метакаолин», предназначенные для монолитного домостроения. Предмет исследования - технологические свойства бетонных смесей и строительно-технические свойства бетона.

Использованы следующие исходные материалы: портландцемент ПЦ 1-500 (условно отвечает СЕМ I 42,5), песок кварцевый, щебень гранитный - смесь фракций: 5-10 мм (30...40%) и 10-20 мм (60...70%), суперпластификатор С-3 (СП) и метакаолин (МТК) производства ОАО «Свроресурс» (г. Киев) с удельной поверхностью 1,67*м²/г; содержанием А12О=40,3%, 5Ю2=54,6%. Эксперимент проводился по 24-ти точечному четырехфакторному плану В4¹⁴. Факторы варьирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Условия планирования эксперимента

Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
Водовязущее отношение (В/(Ц+МТК)), X1	0,34	0,37	0,40	0,03
Расход вяжущего (Ц+МТК), кг/м ³ , X2	- 450	500	550	50
Расход метакаолина, % Вяж, X3	5	10	15	5
Модуль крупности песка Мк, X4	1,6	2,0	2,4	0,4

Содержание заполнителей рассчитывали по традиционной методике с использованием известных детерминированных зависимостей [2].

Все исследованные смеси имели марку по подвижности П5 (ОК=22±1,5 см), которая достигалась соответствующим подбором расхода СП. Определялись следующие свойства:

а) для бетонных смесей:

- расход суперпластификатора (СП), % от массы вяжущего;

- сохраняемость подвижности бетонных смесей t_{C22-18} - время в ч, в течение которого подвижность уменьшается от среднего значения заданной марки до среднего значения соседней марки [3], т.е. в данном случае средняя подвижность смеси марки П5 (22 см) уменьшится до средней подвижности марки П4 (18 см): $t_{C22-18} = T_{Ц} - T_{22}$; (1)

где T22 - время от начала замешивания до достижения осадки конуса 22 см, ч;

TЦ - время от начала замешивания до достижения осадки конуса 18 см, ч.

- воздуходержание бетонной смеси, Ув %;

- показатель раствороотделения; для оперативной оценки связности смеси использован тангенс угла внешнего трения $tg\phi$ [4]: $tg\phi = (30 - OK) / (0,5Dp)$; (2)

где ОК та ОР - соответственно осадка и диаметр расплыва стандартного конуса, см.

Согласно данным, приведенным в [4], для достижения раствороотделения не больше 5% необходимо выполнение условия: $tg\phi > 0,25$.

б) для бетонов: прочность на сжатие стандартных образцов-кубов в возрасте 3, 7 и 28 суток (ГСтб МПа) и коэффициент эффективности использования метакаолина К_к.

Для определения коэффициента эффективности была использована методика, предложенная проф. В.Г. Батраковым [5].

Расчетная формула, позволяющая отделить эффекты, полученные от действия суперпластификатора и минеральной добавки, выглядит следующим образом: $K_k = \frac{R_{Цк} + K_{Цк}(C_k - C_k)}{R_{Цк}}$ (3),

где R_к - прочность бетона на сжатие в образцах с минеральной добавкой относительно прочности контрольного образца с добавкой суперпластификатора (СП), %; Ц - расход цемента в образцах с минеральной добавкой относительно расхода цемента в контрольном образце с добавкой СП, %; К_к - коэффициент снижения расхода цемента при введении добавки СП, определяется по формуле: $K_k = \frac{C_{ц0} - C_{цк}}{C_{ц0}}$ (4),

где C_{ц0}, C_к - расход цемента в контрольных образцах без добавки и с добавкой СП соответственно, кг; C_к - доза добавки СП в контрольном составе, %; C_и - доза добавки СП, необходимая для достижения смеси с минеральной добавкой подвижности, равной подвижности контрольных образцов, %.

Минеральная добавка считается высокоэффективной, если К_к > 1,2 [5].

При обработке экспериментальных данных методами математической статистики были получены полиномиальные уравнения регрессии вышеуказанных свойств, адекватные при 95%-й доверительной вероятности. Коэффициенты уравнений (после оценки значимости) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Пара-метр	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	b ₉	b ₁₀	b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄
СП, %	1,04	-0,32	-0,26	0,36	-0,13	-	-0,11	-	-	-	-0,11	-	-0,08	-	-
Вяз	0,32	-0,06	-0,03	0,04	-0,04	0,02	-	0,03	-	-0,02	-	0,02	-	-	-
t _{C2218}	2,35	0,22	-0,18	0,19	0,14	-0,11	0,07	-	0,06	-	-	-	-0,05	-	-
Ув	1,58	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,19	0,09	0,28	-0,26	-0,06	-	-	-	-	-0,06
cm3	41,6	8,0	2,0	0,9	2,7	-1,0	1,6	1,5	1,4	-1,5	0,9	-	1,2	-	-
b _{ц7}	56,3	-9,6	3,0	1,5	3,0	-1,8	-1,5	-2,8	-1,3	-1,4	1,1	1,6	-	-	-
t _{гт28}	76,5	-9,9	3,5	2,0	2,8	-3,0	-1,0	-4,2	-1,3	-0,9	1,5	2,7	-	-	-
К _к	1,37	-0,11	-0,02	0,03	0,05	-0,06	-	-0,09	-	-	-0,05	-	0,04	-0,02	-

Условия поиска оптимальных составов. Согласно нормативным данным, высокопрочным считается тяжелый бетон, имеющий границу прочности на сжатие классом выше С50/60. В то же время при оптимизации свойств товарных литых бетонных смесей для монолитного домостроения следует минимизировать расслаиваемость, повысить предел прочности на сжатие в раннем возрасте, т.е. на 3 суток твердения.

Поиск рациональных составов проведен по пяти критериям. Нормированы уровни трех критериев качества: сохраняемости подвижности ($t_{22,ц}^c > 2,5$ ч), прочности при сжатии в возрасте 28 суток ($f_{cm28} > 75$ МПа) и коэффициента эффективности метакаолина $K, > 1,4$ % согласно данным [6].

При этом должны быть оптимизированы два критерия: минимизировать раствороотделение (т.е. максимизировать значение $tg\leq r$) и максимизировать прочность на сжатие на 3 сутки твердения (f_{cm3}). Построен комплекс экспериментально-статистических моделей (ЭС-моделей), в которых оставлены только значимые ($\alpha = 0,05$) оценки коэффициентов.

Анализ этих 5 свойств по однофакторным локальным полям в точках максимума и минимума показал, что необходим поиск компромиссного состава. В качестве исходных уровней принимаются медианные значения для соответствующих полей: $tg\leq r_m = (tg\leq r_{max} + tg\leq r_{min})/2 = (0,45+0,26)/2 = 0,36$, $f_{cm3M} = 37,95$ МПа.

Вычислительный эксперимент. Поиск базируется на результатах вычислительного эксперимента на комплексе описанных ЭС-моделями полей M свойств Y (x) с использованием метода Монте-Карло.

На 1-м этапе 1-ой итерации «1-1» в области четырехмерного куба E^4 полей Y(x) генерируются 1000 случайных равномерно распределенных векторов x, к которым добавлено 16 точек вершин ($\pm 1 \dots \pm 1$). На куб (со стороной $DX = 2$) как бы брошена многомерная случайная сетка со средним шагом $Dx, / N_0 = 2 / 5,62 = 0,36$. По ЭС-моделям рассчитываются оценки уровней всех M свойств в N точках (в данном случае $M = 5, N = 1016$). На этапе «1-2» отбираются N^0 точек, попавших в допустимую область H по уровням полей критериев-ограничений. В данной задаче в допустимой области осталось 71 составов, у которых $t_{22,ц}^c > 2,5$ ч, $f_{cm28} > 75$ МПа и $K, > 1,4$, а уровни $tg\leq r$ и f_{cm3} не хуже медианных. Остальные 945 «плохих составов» удалены, область поиска существенно сократилась. На этапе «1-3» проводится пошаговое приближение к единичным оптимумам $tg\leq r^* = 0,37$, $f_{cm3,max} = 38,68$ МПа. Область поиска сокращается до области компромисса «Петроп», в котором осталось 10 составов. На рис. 1 показан результат оптимизации на «том этапе»; уровни критериев лучше медианных ($f_{cm3} = 38,68 > f_{cm3M} = 37,95$ МПа, $tg\leq r = 0,37 > tg\leq r_m = 0,36$). Дальнейшее приближение к оптимумам на 1-ой итерации невозможно. Итерационный процесс следует продолжить, генерируя новые 1000 точек в расширенной (рис. 2), с учетом шага DX , области компромисса.

Основное внимание на второй итерации (1000 + 10 «хороших» составов этапа «1-3») обращено на поиск составов, имеющих повышенную прочность на сжатие в раннем возрасте. На этапе «2-3» границы области оставшихся составов (рис. 2) значительно сблизились. У

этих составов границы диапазонов оптимизируемых критериев (рис. 1) практически сомкнулись - процесс поиска можно прекратить.

Компромиссные составы композита. После проведения двух итерационного поиска составов высокопрочного бетона на основе литых смесей, по построенным диаграммам необходимо выбрать компромиссный

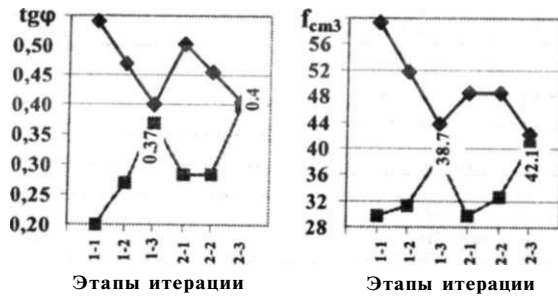


Рис.1

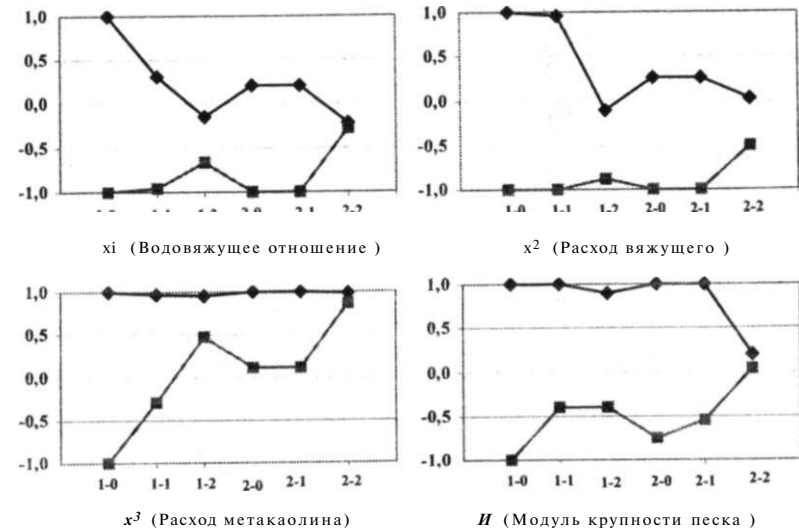


Рис.2

состав свойства, которого удовлетворяют требованиям по нормативу и оптимизируемым критериям. По результатам вычислительного эксперимента из 4 составов (этап «2-3» 2-итерация) выбран компромиссный состав со следующими параметрами: водовязущее отношение 0,36 ($x_1 = -0,27$); расход вяжущего 501 $кг/м^3$ ($x_2 = 0,02$); расход метакаолина 14,9 % Вяж. ($x_3 = 0,98$); модуль крупности 2,07 ($x_4 = 0,18$). Композиты такого состава имеют прочность при сжатии $t_{22,ц}^c = 76,9$ МПа $> f_{cm}^m = 75$ МПа, сохраняемость подвижности бетонных смесей $t_{22,ц}^c = 2,5$ ч и коэффициент эффективности метакаолина $K, = 1,4$, что удовлетворяет требованиям к гарантирующим нормируемым критериям качества. Уровни оптимизируемых критериев композита - прочность на сжатие $f_{cm3} = 42,11$ МПа $> f_{cm3M} = 37,95$ МПа и показатель расслаиваемости бетонной смеси $tg\leq r = 0,4 > tg\leq r_m = 0,36$. Литые бетонные смеси, модифицированные комплексной добавкой «суперпластификатор-метакаолин» рекомендуются для товарных бетонных смесей и высокопрочных бетонов на их основе. При оптимальном содержании метакаолина такие смеси обеспечивают не только нормативные требования к композиту в 28-дневном возрасте, но и способствуют увеличению прочности на сжатие в раннем возрасте.

Литература. 1. Вознесенский В., Ляшенко Т. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. - Одесса: Астропринт, 2006. - 116 с. 2. Дворкин Л.И., Лушнікова Н.В., Рунова Р.Ф., Троян В.В. Метакаолин в будівельних розчинах і бетонах: Монографія. - Київ: Вид-во КНУБіА, 2007.-214 с. 3. Бруссер М.И., Высоцкий С.А., Царик А.М. Определение сохраняемости удобоукладываемости бетонных смесей. //Бетон и железобетон, №3, 1989, с. 9-11. 4. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Корнейчук Ю.А. Эффективные цементно-золевые бетоны. - Ровно, 1998. - 196 с. 5. Батраков В.Г., Каприлов С.С., Иванов Ф.М., Шейнфельд А.В. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон. // Бетон и железобетон, № 12, 1990, с.15-17. 6. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. - М.: Технопроект, 1998. - 768 с.