

ВЕТВЯЩИЙСЯ ПОИСК КОМПРОМИССНОГО СОСТАВА ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ДОБАВКИ В БЕТОН С ГАРАНТИРОВАННЫМИ УРОВНЯМИ НОРМИРУЕМЫХ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА

Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., (*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*), **Руссу И.В.** (*Технический университет Молдовы*)

Найдены составы многокомпонентной добавки, гарантированно обеспечивающей два нормативных требования к бетону и компромиссное увеличение ряда критериев его долговечности и биохимической стойкости

Введение. Бетонные и железобетонные конструкции перерабатывающих предприятий агропромышленного комплекса эксплуатируются в условиях одновременного воздействия на них растворов органических кислот, сахара, различных микроорганизмов, часто изменяющегося температурно-влажностного режима и других факторов, существенно снижающих их долговечность.

Для первичной биозащиты конструкций, работающих в таких сложных эксплуатационных условиях, эффективна модификация бетона многокомпонентными добавками [1, 2]. К решению задач оптимизации состава добавок и их воздействия на бетоны целесообразно [3] привлечение элементов компьютерного строительного материаловедения [4], в частности, случайного сканирования рецептурных полей свойств методом Монте-Карло – для поиска компромиссных решений.

Условия натурального эксперимента и моделирования. В эксперименте изменялось содержание (в массовых частях на 100 м.ч. цемента) четырех ингредиентов добавки. Содержание варьировалось на неравно отстоящих уровнях $X_{\min} \leq X_{in} \leq X_{\max}$. При этом нижний уровень соответствовал отсутствию ингредиента, $X_{\min} = 0$ м.ч. или $x_{\min} = -1$ при нормализации [5].

Этот достаточно эффективный в поисковых исследованиях прием [6, 7] позволяет по одной четырехфакторной модели оценивать воздействие на бетон 15 добавок – 4 моно-, 6 двух-, 4 трех- и 1

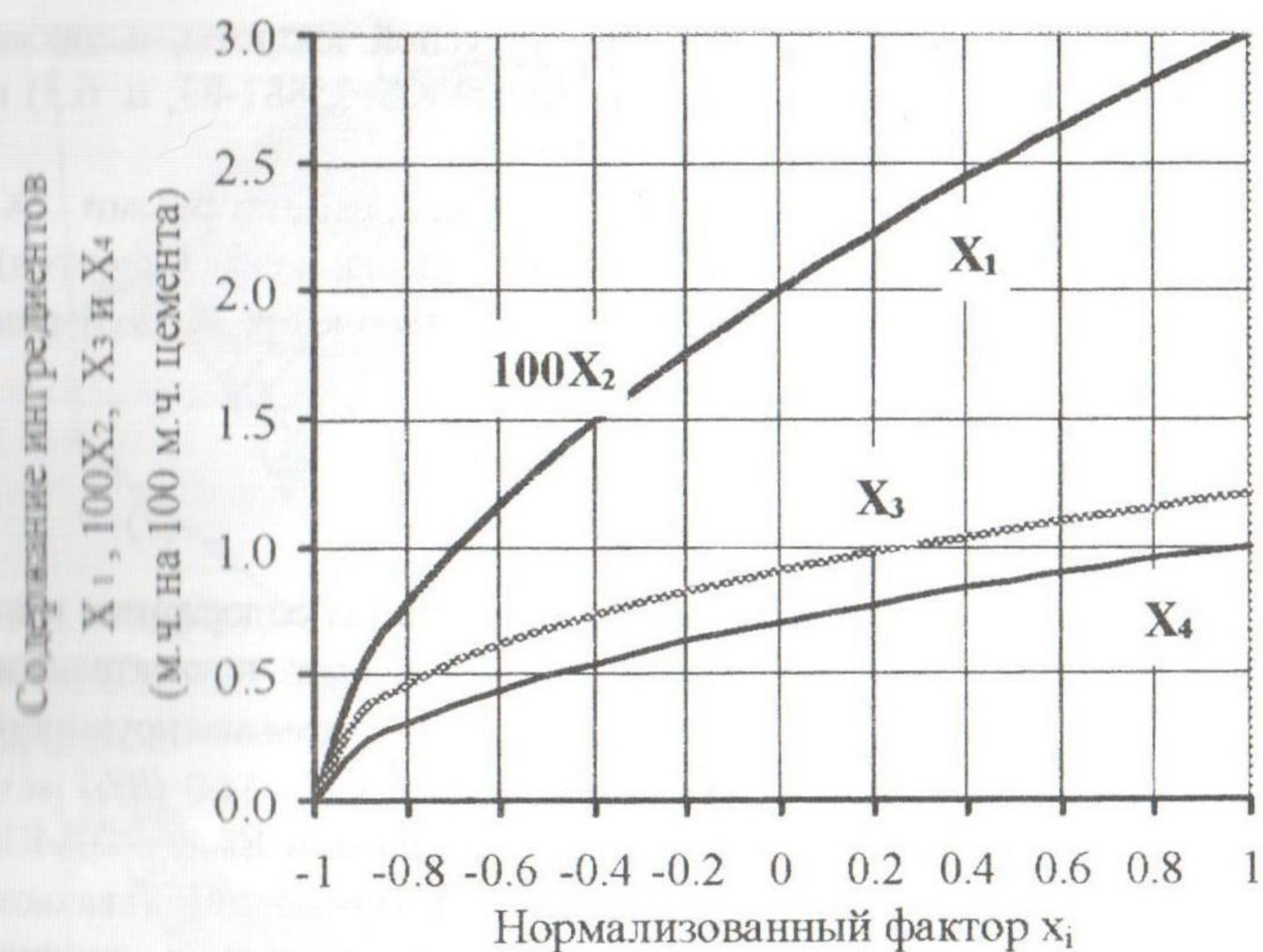


Рис. 1. Нелинейные взаимосвязи натуральных (X_i) и нормализованных (x_i) переменных

четырёхкомпонентной. Сдвиг внутреннего уровня X_{in} вверх от центра варьирования обеспечивал повышенную «концентрацию» экспериментальных составов в предполагаемых зонах оптимумов. Нелинейная нормализация к $|x| \leq 1$ и возврат к именованным переменным X (1) проводились по специальным формулам [7, с. 88], в которых учитывается условие $X_{min} = 0$.

$$x = (X/X_{in})^\gamma - 1; \gamma = 0.693 / \ln(X_{max}/X_{in}); X = X_{in}(1+x)^{1/\gamma} \quad (1)$$

Уровни X_{in} и X_{max} ингредиентов: кольматирующего (X_1 , бентонитовая глина) – 2 и 3 м.ч., гидрофобизирующего (X_2 , «Релаксол универсал ВМ») – 0.02 и 0.03 м.ч., пластифицирующего (X_3 , лигносульфонат) – 0.9 и 1.2 м.ч., биоцидного (X_4 , бензоат натрия) – 0.7 и 1 м.ч. Нелинейная взаимосвязь именованных и нормализованных уровней факторов отражена на рис. 1 (функция не показана для гидрофобного ингредиента, поскольку $X_2 = 0.01X_1$).

В натурном эксперименте определялись свойства мелкозернистых бетонов (Ц/П = 1:2, В/Ц=0.57) с добавками 18 составов, соответствующих оптимальному плану. Подвижность смесей находилась в пределах $4 \leq H \leq 11$ см (по осадке конуса). На образцах $4 \times 4 \times 16$ см определены пределы прочности (МПа) на сжатие (R) и растяжение при изгибе (R_b) в разные сроки воздушно-влажностного твердения и после различной длительности

экспозиции (до 180 суток) в 2% растворе уксусной кислоты, а также соответствующие коэффициенты стойкости (по ГОСТ 25881-83, п. 6.3) и другие показатели.

Влияние ингредиентов добавки описано четырехфакторными ЭС моделями (в которых оставлены только значимые оценки коэффициентов). Так, для прочности при сжатии через 28 суток твердения R получена модель

$$R = 22.1 - 1.5x_3 + 0.9x_4 - 3.7x_1^2 - 1.3x_2^2 - 1.4x_3^2 - 2.0x_4^2 + 1.6x_1x_2 + 0.9x_1x_3 + 0.6x_2x_4 - 0.7x_3x_4. \quad (2)$$

Она описывает полное поле [4] прочности, в координатах содержания всех компонентов добавки, со следующими обобщающими показателями: максимум $R_{\max} = 22.7$ МПа при $x_1 = -0.07$ ($X_1 = 1.92$ м.ч. кольматирующего ингредиента), $x_2 = -0.03$ (0.02 м.ч. гидрофобизатора), $x_3 = -0.60$ (0.61 м.ч. пластификатора) и $x_4 = 0.32$ ($X_4 = 0.81$ биоцида); минимум $R_{\min} = 9.0$ МПа при $x_1 = x_4 = -1$ (два ингредиента отсутствуют) и $x_2 = x_3 = +1$ (высокое содержание гидрофобизатора и пластификатора); медианное среднее $R_{Me} = 0.5(R_{\max} + R_{\min}) = 15.8$ МПа. Важнейший обобщающий показатель поля (2) – доля факторного пространства, в которой выполняется требование $R \geq 15$ МПа. Она составляет около $\Omega \approx 97\%$ (рассчитывается методом Монте-Карло [5]). По средним уровням прочности норматив не выполняется только у $\Psi \approx 4\%$ исследованных добавок.

Гарантированные уровни нормативных критериев качества. Наиболее общее нормативное требование для механических свойств композитов – «уровень не меньше чем ...», конкретизируемое в данной задаче как $R \geq R_{\text{норм}} = 15$ МПа. Для свойств технологических смесей требование, как правило, «уровень внутри нормативного коридора от ... до ...», что сформулировано здесь как подвижность $N_{\text{норм}}^H = 6 \leq N \leq N_{\text{норм}}^B = 10$ см. С этими границами сравниваются эмпирические значения R и N бетонов с комбинированной добавкой.

Гарантированный (с односторонним риском α) уровень Y^* критерия качества материала возникает только при учете доверительного интервала $\Delta_\alpha Y$ [5, 8].

В вычислительных экспериментах с ЭС-моделями $\Delta_\alpha Y$ определяют три величины [4, 8]: во-первых, допустимый риск α выхода расчетного значения за пределы норматива, учитываемый квантилем t_α распределения вероятностей (как правило, для механических свойств риск $\alpha = 0.05$ и $t_{05} = 1.645$, а для технологических – допустим больший риск $\alpha = 0.10$ и $t_{10} = 1.248$); во-вторых, среднеквадратичная ошибка натурального эксперимента s_{3Y} ; в третьих, значение функции дисперсии предсказания модели d_Y , которое

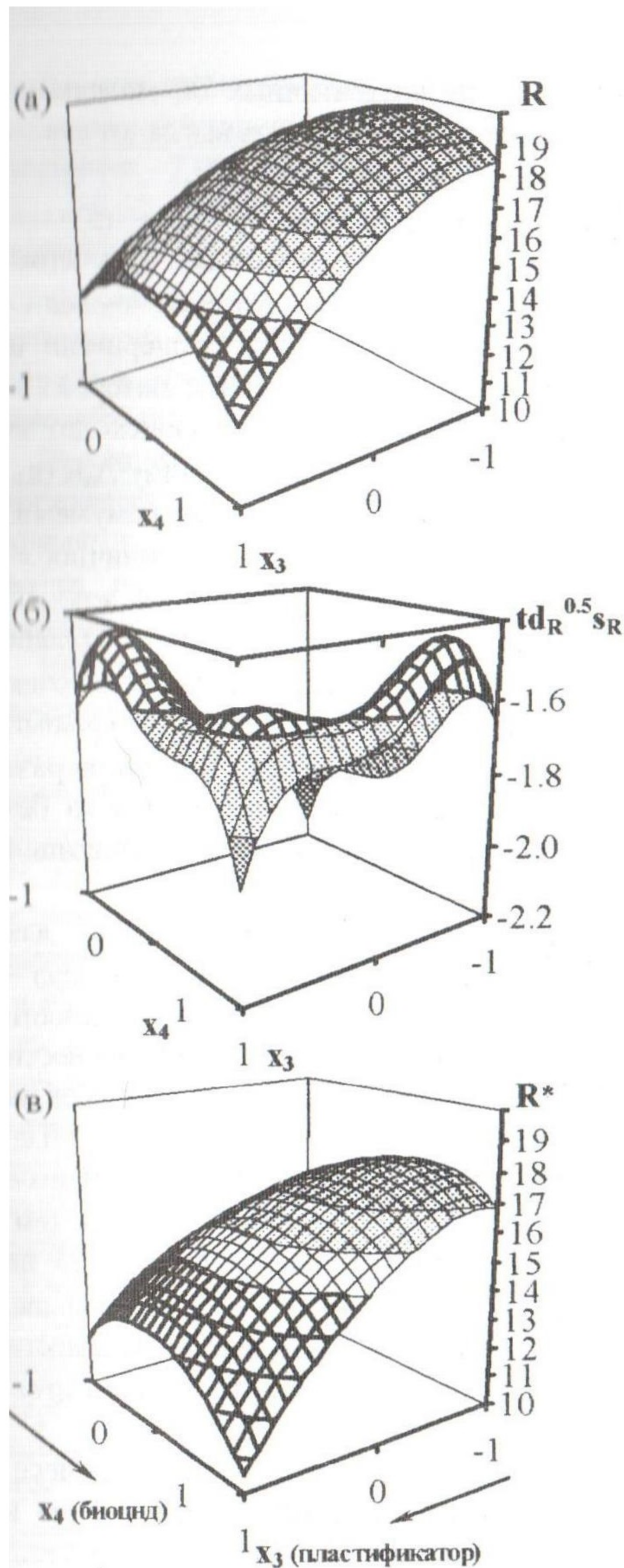


Рис. 2. Локальные поля расчетной прочности R (а), доверительного интервала при риске 5% (б) и гарантированной прочности (в) в координатах (x_3, x_4)

зависит от матрицы плана эксперимента, от формы модели Y и вектора координат x , в которых рассчитывается (предсказывается) уровень свойства.

$$\Delta_\alpha Y = t_\alpha \cdot s_{\Delta Y} \cdot d_Y^{0.5} \quad (3)$$

Трансформация одного из локальных полей [4] прочности R в координатах двухкомпонентной добавки «пластификатор + биоцид» (без кольматирующего компонента и гидрофобизатора), связанная с переходом к гарантированному уровню, показана на рис. 2.

Поле, представляющее средние расчетные уровни, (рис. 2а) описано моделью (4), полученной из полного поля (2) при $x_1 = x_2 = -1$.

$$R\{x_1 = x_2 = -1\} = 18.6 - 2.3x_3 + 0.3x_4 - 1.4x_3^2 - 2.0x_4^2 - 0.7x_3x_4 \quad (4)$$

Это поле имеет максимум 19.7 МПа вблизи $x_3 = -0.87$ и $x_4 = 0.20$ (содержание пластификатора около 0.39 и бензоата натрия около 0.77 м.ч., рис. 1). Доля допустимых решений в этом поле $\Omega \approx 96\%$; норматив не выполняется только в узкой области высокого содержания пластификатора (отмечена жирной сеткой, 4%).

Функция дисперсии предсказания d для квадратичных ЭС-моделей – полином четвертой степени. Для локального поля R (4) она выглядит как

$$d_R\{x_1=x_2=-1\} = 0.70 - 0.07(x_3+x_4) - 0.37(x_3^2+x_4^2) + 0.14x_3x_4 - 0.03(x_3^3+x_4^3) + 0.04(x_3^2x_4+x_3x_4^2) + 0.08x_3^2x_4^2 + 0.34(x_3^4+x_4^4) \quad (5)$$

На рис. 2б соответствующая (5) поверхность отражена с учетом постоянного множителя $t_{\alpha} \cdot s_{\alpha R} = 1.645 \cdot 1.32 = 2.17$ МПа, который численно равен «единичному» доверительному интервалу при $d=1$ (эксперимент в одной точке факторного пространства, т.е., с одним составом материала). Переход от средних к гарантированным уровням прочности происходит за счет снижения (отрицательные ординаты на рис. 2б) на величину $\Delta_{\alpha}R(x_3, x_4)$. Поверхность имеет сложную форму с несколькими экстремумами. Среднее значение $\Delta_{\alpha}R$ около -1.65 МПа (на 26% ниже «единичного» доверительного интервала!). Область $|\Delta_{\alpha}R| \leq 1.65$, выделенная жирной сеткой, вытянута вдоль сторон квадрата $x_3=1$ и $x_4=1$. Пониженные уровни $|\Delta_{\alpha}R|$ возникают в той части квадрата, в которой находится больше точек натурального эксперимента (в пространстве x_1, x_2, x_3, x_4). Минимальный уровень доверительного интервала $|\Delta_{\alpha}R|_{\min} = 1.43$ примерно в полтора раза ниже и максимального (2.15), и единичного (2.17), что достигнуто без дополнительных материальных затрат только за счет реализации многофакторного эксперимента.

Аналитически исследовать полученную по (3-5) модель для гарантированного уровня прочности $R^* = R - t_{0.5} \cdot s_{\alpha R} \cdot d_R^{0.5}$ не имеет смысла – достаточно численно оценить координаты точек поля R^* ; поверхность которого показана на рис. 2в. Она приблизительно подобна поверхности на рис. 2а, но не является фрагментом точного эллипсоида. Гарантированный уровень прочности имеет максимум 18.0 МПа, несколько сдвинутый в сторону большего содержания ингредиентов ($x_3 \approx -0.79$ и $x_4 \approx 0.32$, т.е. пластификатора 0.45 м.ч. и биоцида 0.81 м.ч. (см. рис. 1). Доля факторной области, в которой с риском более 0.05 не выполняется требование $R \geq 15$ МПа, составляет $\Psi = 28\%$ (в 7 раз больше, чем по средней прочности). Это, естественно, сокращает возможности управления составом многокомпонентной добавки, но гарантирует качество модифицируемого бетона.

В аналогичных процедурах, связанных с гарантией подвижности смеси, учитывалось положение средних расчетных значений по отношению к середине «коридорного» норматива $H = 8$ см. При расчете гарантированных уровней $H_{\alpha} = H \pm t_{10} \cdot s_{\alpha H} \cdot d_H^{0.5}$ для всех составов с подвижностью $H \leq 8$ см берется знак минус, а для остальных – плюс.

Три критерия качества не нормированы, для них разыскивается компромиссное решение при условии повышения их уровня по сравнению со средним медианным по полному полю свойства [4]. Коэффициент

биохимической стойкости [1-2] после 180 суток экспозиции в 2% уксусной кислоте рассчитан как $K_{\text{бхс}} = R_{\text{b.180}}^{\text{ук}} / R_{\text{b.28}}$. Максимум полного поля $K_{\text{бхс}}$ составляет 2.06 и минимум 1.19, а средний медианный уровень $K_{\text{бхс.Me}} = 1.62$. Предел прочности $R_{180}^{\text{ук}}$ находится в границах 17.3-37.5, с медианным уровнем 27.4 МПа. Не тривиален третий критерий $K_{\text{S.6/1}}$ – отношение коэффициентов биохимической стойкости после 6 и 1 месяцев экспозиции, которое можно рассматривать как показатель стабильности защитных свойств модифицированного бетона; в полном поле он изменялся от 0.80 до 1.75 ($K_{\text{S.6/1.Me}} = 1.27$).

Вычислительный эксперимент. Итерационная процедура поиска компромиссных решений на полях свойств материала, описанных ЭС-моделями, основана [4] на методе Монте-Карло. При решении данной задачи генерировалось 1000 случайных равномерно распределенных векторов x (составов), к которым добавлены 16 вершин ($\pm 1, \pm 1, \pm 1, \pm 1$).

На первой итерации на полных полях пяти свойств в этих 1016 точках рассчитаны по ЭС моделям, аналогичным (2), оценки $R, H, K_{\text{бхс}}, R_{180}^{\text{ук}}$ и $K_{\text{S.6/1}}$. Прежде всего, из них отобраны N_{Ω} составов, попавших в допустимую область Ω по гарантированным уровням R^* (одно из локальных полей этого критерия представлено на рис. 2в), также критерия H^* . Таких составов оказалось 854, а остальные 162 точки удалены. Далее на этом этапе отсортировывались составы, которые обеспечивают у трех критериев долговечности уровни «не хуже медианного по полному полю», т.е. $K_{\text{бхс}} \geq 1.62, R_{180}^{\text{ук}} \geq 27.4$ МПа и $K_{\text{S.6/1}} \geq 1.27$. Совместное выполнение этих трех начальных условий поиска компромисса оказалось весьма жестким требованием – пришлось удалять 844 состава. Осталось 10 составов, которые гарантируют мелкозернистому бетону выполнение нормативов и дают удовлетворительные уровни критериев долговечности. На заключительном этапе первой итерации при пошаговом приближении к единичным оптимумам удалось лишь незначительно повысить $R_{180}^{\text{ук}}$ (на 1.1 МПа), после чего осталось 8 конкурирующих комплексных добавок.

На рис. 3 и 4 для критериев оптимальности и рецептурных факторов показаны все изменения в уровнях, происходящие на 3 этапах первой итерации. В диапазоне A_1-B_1 на этапе «1-1» находятся все возможные значения критериев долговечности (рис. 3) и содержания ингредиентов (рис. 4). Далее за счет «взаимных уступок» (основной принцип любого компромисса!), естественно, происходит сужение диапазонов.

Однако у факторов x_1 и x_4 диапазоны A_3-B_3 по сравнению с исходными практически не изменились. Это свидетельствует о том, что равновозможные компромиссные решения находятся в анклавах, близких к противоположенным границам содержания ингредиентов и поиск необходимо разветвить.

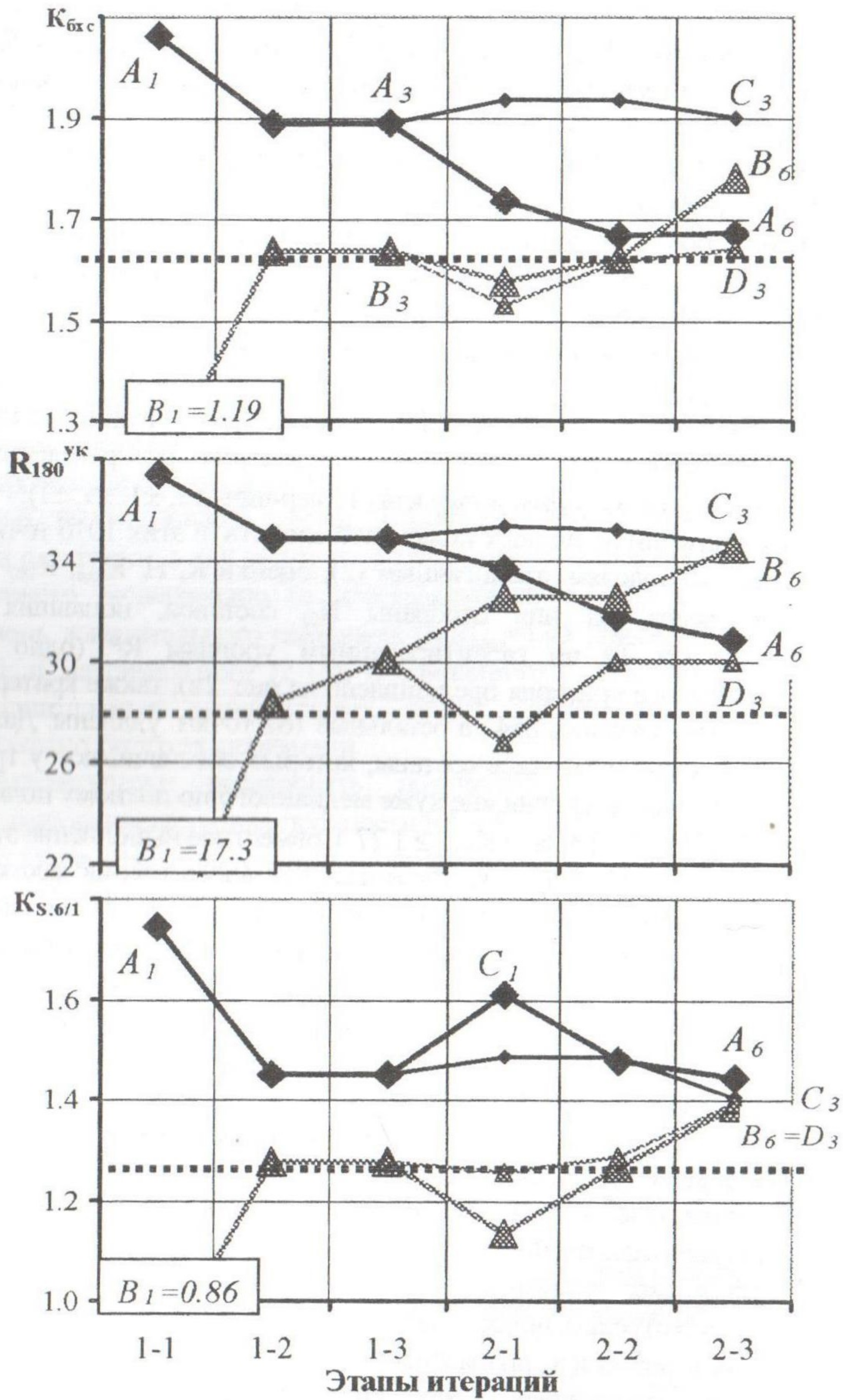


Рис. 3. Изменение трех критериев долговечности при поиске компромиссных составов комплексной добавки



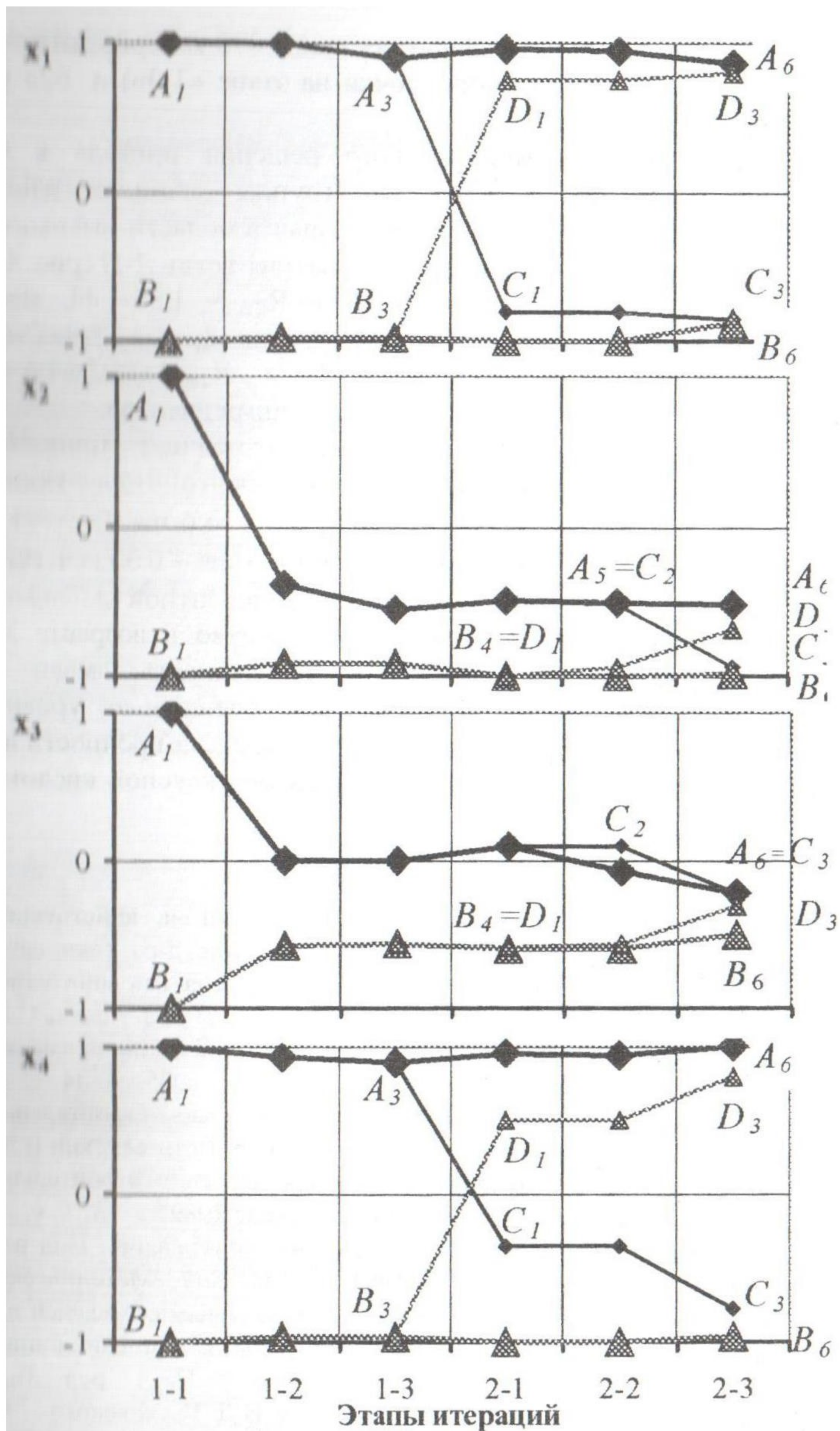


Рис. 4. Изменение верхнего (◆) и нижнего (▲) уровней факторов в вычислительном эксперименте; в точках A_3 и B_3 происходит ветвление поиска компромиссного решения на версии C и D соответственно

На 2-ой итерации из 1000 случайных составов 375 генерируются у верхних границ x_1 и x_4 (3 «хороших» точки на этапе «1-3») и 625 у нижних (5 «хороших» точек из 8).

Каждая ветвь поиска компромиссного решения привела к 4 конкурирующим составам. Однако эти группы составов дают существенно различные результаты. Проходящая в области высокого содержания бентонитовой глины и бензоата натрия ветвь *A-D* (рис. 4) приводит к $K_{6xc}=1.64-1.67$, $R_{180}^{yk}=30.0-30.8$ и $R_{S,6/1}=1.39-1.44$. Все критерии несколько превышают медианный уровень. Другая ветвь *B-C* не только дает лучшие результаты $K_{6xc}=1.78-1.90$, $R_{180}^{yk}=34.5-34.6$ и $R_{S,6/1}=1.39-1.40$, но и требует меньшего расхода ингредиентов.

Заключение. Рекомендован (с учетом возможной точности дозирования ингредиентов) такой состав добавки: бентонитовая глина – 0.75 м.ч. ($x_1 = -0.81$), гидрофобизатор – не вводится ($x_2 = -1$), лигносульфонат – 0.70 м.ч. ($x_3 = -0.45$) и бензоат натрия – 0.35 м.ч. ($x_4 = -0.74$). Мелкозернистый бетон с такой трехкомпонентной добавкой имеет гарантированные предел прочности на сжатие в возрасте 28 суток выше норматива (16.7 МПа) и подвижность смеси в нормативном коридоре (6.9 см), а также повышенные уровни коэффициента биохимической стойкости (1.82), предела прочности на сжатие после 180 суток экспозиции в 2% растворе уксусной кислоты (34.9 МПа) и коэффициента стабильности (1.37).

Литература

1. Русу И.В. Коррозионная стойкость и защита бетона конструкций предприятий по переработке плодов и овощей. Автореф. дис. д-ра. техн. наук. – Кишинэу, 2005. – 54 с.
2. Rusu I. Coroziunea și protecția betonului expus mediilor lichide alimentare. – Chișinău, Primex-com, 2004. – 151 p.
3. Коваль С.В. Развитие научных основ модифицирования бетонов полифункциональными добавками. Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Одесса, 2005. – 34 с.
4. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса, Астропринт, 2006. – 116 с.
5. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительнотехнологических задач на ЭВМ. – К.: Вища школа, 1989. – 327 с.
6. Современные методы оптимизации композиционных материалов / Под ред. В.А. Вознесенского. – К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
7. Методические рекомендации по применению экспериментально-статистических моделей для анализа и оптимизации состава, технологии и свойств композиционных материалов на основе щелочных вяжущих систем / Науч. ред. В.А. Вознесенский, П.В. Кривенко. – ОГАСА, НИИВМ им. В.Д. Глуховского. – К., 1996. – 105 с.
8. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов – К.: Будивельник, 1989. – 240 с.