

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА СУХИХ СМЕСЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ЛИНЕЙНУЮ УСАДКУ ФИБРОПОЛИМЕРЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ

Вознесенский В. А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса), Соха В. Г. («Хенкель Баутехник (Украина)», г. Киев)

По комплексу экспериментально-статистических моделей проанализировано влияние состава равноподвижных смесей на предел прочности при изгибе и линейную усадку фиброполимерцементного композита в первые пять суток твердения.

**Технико-экономическая постановка задачи.** Сухие строительные смеси для устройства полов составляют значительную долю производства этой прогрессивной группы материалов для современного строительства [1]. К таким сухим смесям предъявляется ряд специфических требований [2]. Для их выполнения необходимо введение дополнительных ингредиентов и выбор таких соотношений в многокомпонентной системе, которые при сохранении технологичности смесей обеспечивали бы повышение прочности и уменьшение усадки, а следовательно, снижение вероятности появления опасных трещин в готовом сооружении.

**Условия эксперимента для выбора рациональных составов сухих смесей для высокопрочных полов.** По оптимальному плану эксперимента, включающему 18 составов, варьировались четыре фактора. Два из них характеризовали зерновой состав минеральной составляющей, общее количество которой оставалось постоянным (56.5 массовых частей на 100 м.ч. сухой смеси). Первый – массовое отношение  $X_1$  доломитового наполнителя (Д) к песку (П) варьировалось на не равноотстоящих уровнях 0.25, 0.5 и 1, которые нормализовались к  $-1 \leq x_1 \leq +1$  как  $x_1 = \log_2 X_1 + 1$ . Отношение  $X_2$ , масс гранитного отсева (Г) крупностью до 1.2 мм и песка, варьировалось на уровнях 5, 7.5 и 10 и нормировалось стандартно как  $x_2 = (X_2 - 7.5) / 2.5$ . Еще два фактора  $X_3$  и  $X_4$  (м.ч.) отражали специфическую модификацию сухих смесей, направленную на повышение трещиностойкости полов. Это содержание тонкодисперсного полиамидного волокна марки «6,7/3», которое тоже варьировалось на не равноотстоящих уровнях 0.05, 0.1 и 0.2, нормализованных как  $x_3 = \log_2 X_3 + 3.322$ , а также редиспергируемого полимерного порошка Vinnapas LL 222 [3], на уровнях 1.5, 2.75 и 4, нормализованных как  $x_4 = (X_4 - 2.75) / 1.25$ . Содержание остальных компонентов



сухой смеси (минеральные вяжущие, противоусадочная добавка «1,6-Nexandiol», суперпластификатор и др.) оставалось постоянным. Для приготовления смесей использован лабораторный смеситель, аналогичный по конструкции промышленному оборудованию.

Все 18 сухих смесей после смешивания с водой должны были иметь равную подвижность. Она оценивалась по диаметру расплыва смеси, что отражает специфику технологии самовыравнивающихся полов. Подбор водопотребности смесей равной подвижности (21 см через 10 мин.) осуществлен по интерполяционной методике [4]. Максимальное опытное значение Ц/В (Ц – суммарное содержание портландцемента и глиноземистого цемента) составляет 1.49, а минимальное – 1.11. Изменение почти на треть Ц/В – одного из основных структурообразующих факторов – позволило получить для исследования 18 изореологичных композиций с широким диапазоном свойств.

Измерение линейной усадки  $\epsilon$  (мм/м) с помощью электронного цифрового микрометра проведено на образцах длиной 100 см, твердеющих в специальной форме-линейке с подвижной торцевой стенкой; физико-механические показатели определены на образцах-балочках 4x4x16; опытные работы выполнены в аккредитованной исследовательской лаборатории компании «Хенкель Баутехник (Украина)».

**Модель цементно-водного отношения для равноподвижных смесей.** По 18 экспериментальным значениям В/Ц построена четырехфакторная нелинейная структурированная ЭС-модель с 12 значимыми (односторонний риск 0.05) оценками коэффициентов.

Модель (1) описывает полное поле Ц/В, при котором композиции имеют равный расплыв. Основные обобщающие показатели [5-6] этого поля:

$$\begin{array}{l}
 \text{Ц/В} = 1.36 \pm 0x_1 \pm 0x_1^2 + 0.02x_1x_2 \\
 \quad \quad \quad -0.02x_2 - 0.03x_2^2 \quad \quad \quad \text{(а)} \\
 \quad \quad \quad -0.14x_3 - 0.03x_3^2 - 0.01x_3x_4 \\
 \quad \quad \quad + 0.05x_4 \pm 0x_4^2 \quad \quad \quad \text{(б)} \\
 \quad \quad \quad -0.03x_1x_3 \\
 \quad \quad \quad -0.04x_1x_4 \\
 \quad \quad \quad -0.01x_2x_3 \\
 \quad \quad \quad -0.01x_2x_4 \quad \quad \quad \text{(в)}
 \end{array} \quad (1)$$



максимум 1.54 (при  $x_1 = x_3 = -1$ ,  $x_2 = -0.46$  и  $x_4 = +1$ ), минимум 1.04 (при  $x_1 = x_4 = -1$ ,  $x_2 = x_3 = +1$ ), абсолютный прирост  $\Delta\{Ц/В\}=0.50$  и относительный  $\delta\{Ц/В\}= 1.48$ .

На рис. 1 показано индивидуальное влияние факторов на Ц/В в зоне его максимума. Основным фактором, повышающим Ц/В (за счет редуцирования водопотребности изореологичных смесей), является содержание полимерного компонента Vinnapas.

В противоположенном направлении действует увеличение содержания полимерной фибры, которая, образуя сетчатый пространственный каркас, затрудняет деформирование дисперсной системы «сухая смесь + вода». Этот эффект (противодействие гравитационным силам в растекающейся композиции) не зависит от содержания других ингредиентов (коэффициент  $|b_3| > |b_{14}| + |b_{24}| + |b_{34}|$ , [5]).

Аналогично ведет себя и каркас из не округлых зерен гранитного отсева, если превышен уровень Г/П  $\approx 2.1...2.2$ . Полезность тонкомолотого наполнителя для повышения Ц/В определяется уровнями других компонентов – в модели (1) нет линейного эффекта, но сумма коэффициентов  $b_{1i}$  может достигать +0.09 (в смесях с высоким Г/П при малой их модификации полимерными волокнами и порошком LL 222).

**Прочность и усадка композитов в раннем возрасте.** Характеристики композита для высокопрочных покрытий полов определялись в период от 1 до 28 суток твердения. Их анализ выполнен по комплексу ЭС-моделей с привлечением методов компьютерного материаловедения [6-7]. Для предела прочности на растяжение при изгибе  $R_5$  (МПа) и усадки  $\epsilon_5$  (мм/м) после 5 суток твердения построены модели (2-3).

$$R_5 = 2.73 \begin{array}{l} \boxed{+ 0.16 x_1 \pm 0 x_1^2 + 0.16 x_1 x_2} \\ \boxed{\pm 0 x_2 - 0.28 x_2^2} \quad (a) \\ \boxed{+ 0.14 x_3 - 0.28 x_3^2 - 0.08 x_3 x_4} \\ \boxed{+ 0.29 x_4 + 0.44 x_4^2} \quad (б) \end{array} \begin{array}{l} \boxed{-0.12 x_1 x_3} \\ \boxed{\pm 0 x_1 x_4} \\ \boxed{\pm 0 x_2 x_3} \\ \boxed{\pm 0 x_2 x_4} \end{array} \quad (2)$$

$$\epsilon_5 = 0.38 \begin{array}{l} \boxed{\pm 0 x_1 - 0.09 x_1^2 - 0.05 x_1 x_2} \\ \boxed{\pm 0 x_2 + 0.19 x_2^2} \quad (a) \\ \boxed{-0.08 x_3 + 0.08 x_3^2 - 0.03 x_3 x_4} \\ \boxed{-0.11 x_4 + 0.04 x_4^2} \quad (б) \end{array} \begin{array}{l} \boxed{+0.06 x_1 x_3} \\ \boxed{+0.03 x_1 x_4} \\ \boxed{+0.03 x_2 x_3} \\ \boxed{+0.03 x_2 x_4} \end{array} \quad (3)$$



Модель (2) описывает полное поле прочности с максимумом  $R_{5,max}=3.64$

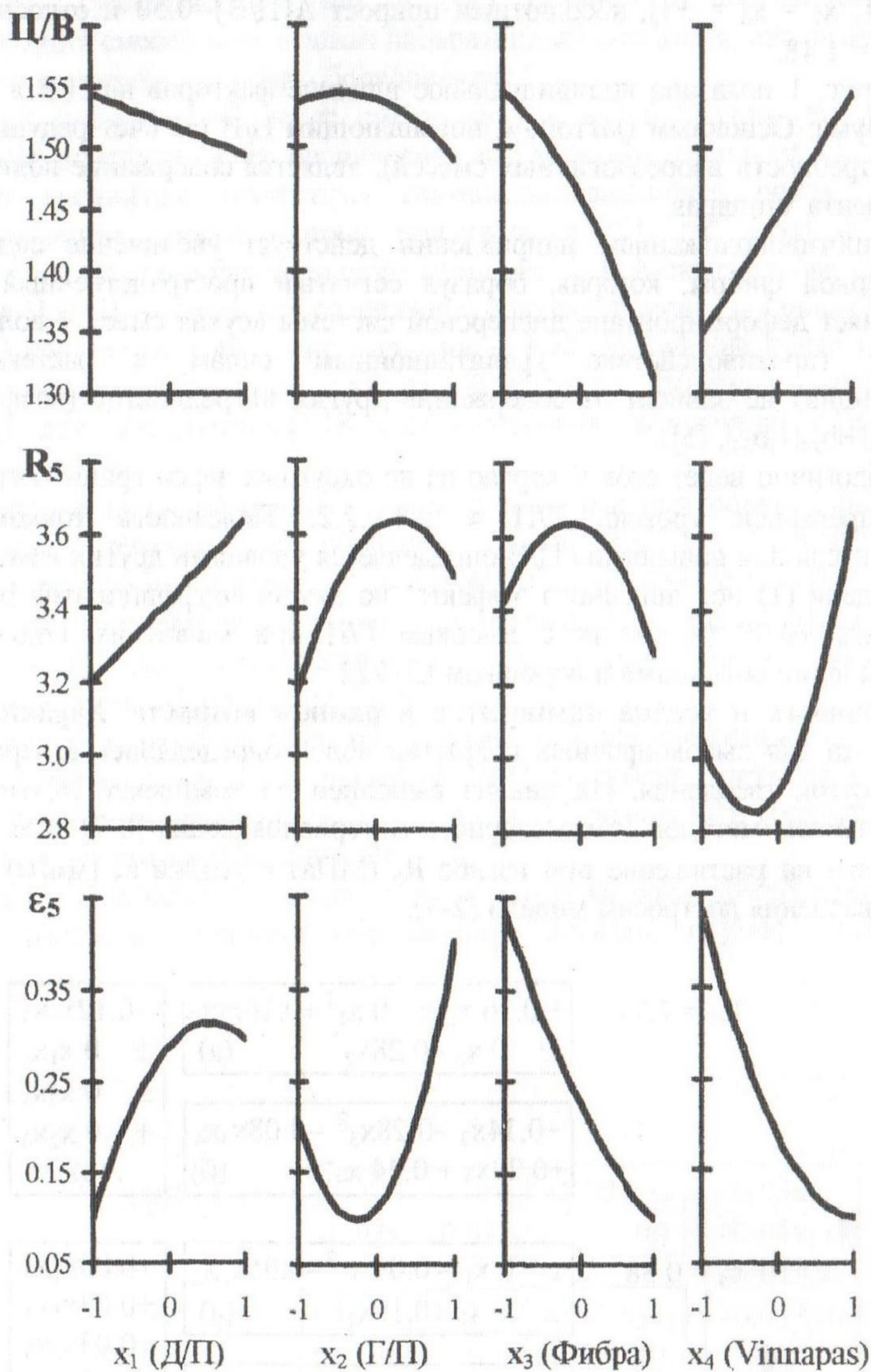


Рис. 1. Однофакторные кривые влияния компонентов фиброполимерцементной смеси в зонах максимумов Ц/В и прочности  $R_5$  и минимума усадки  $\epsilon_5$



МПа ( $x_1=x_4 = 1$ ,  $x_2 = 0.28$ ,  $x_3 = -0.12$ ),  $R_{5,\min} = 1.51$  МПа ( $x_1=x_3 = -1$ ,  $x_2 = 1$ ,  $x_4 = -0.42$ ), прирост абсолютный  $\Delta\{R_5\} = 2.13$  и относительный  $\delta\{R_5\} = 2.40$ ; модель (3) – полное поле линейной усадки с  $\varepsilon_{5,\max} = 0.90$  мм/м ( $x_1 = -0.22$ ,  $x_2=x_3=x_4 = -1$ ), минимумом  $\varepsilon_{5,\min} = 0.10$  ( $x_1 = -1$ ,  $x_2 = -0.26$ ,  $x_3 = x_4 = 1$ ), приросты  $\Delta\{\varepsilon_5\} = 0.80$  и  $\delta\{\varepsilon_5\} = 9.0$ .

На рис. 1 показано влияние факторов на эти показатели качества композита в наиболее технически интересных условиях, то есть, влияние на предел прочности  $R_5$  в зоне максимума, а на усадку  $\varepsilon_5$  в зоне минимума.

Увеличение содержания полимерного компонента Vinparas вызывает значительный рост  $R$  и снижение усадки прежде всего потому, что он увеличивает Ц/В равноподвижных смесей. Существенными факторами улучшения свойств композита следует считать и введение тонкой полимерной фибры, и изменение зернового состава минеральной составляющей смеси. Улучшение достигается в случае создания оптимального пространственного каркаса с волокнистым армированием, причем положительный эффект может возникать, несмотря на уменьшение прочности и плотности цементного камня, за счет увеличения начального водосодержания (понижения уровня Ц/В).

Из анализа трех полных полей и графиков на рис. 1 следует, что предпочтительны высокий уровень  $x_4$  и уровень  $x_2$  близкий к среднему (в диапазоне от  $-0.46$  до  $+0.26$ ). Уровни двух других факторов  $x_1$  и  $x_3$  для Ц/В<sub>max</sub>,  $R_{\max}$  и  $\varepsilon_{\min}$  разнятся существенно.

Совместное влияние двух тонкодисперсных компонентов – доломитового наполнителя и полимерной фибры диаметром  $14\mu\text{m}$  – целесообразно проанализировать на локальных полях Ц/В( $x_1, x_3$ ),  $R_5(x_1, x_3)$  и  $\varepsilon_5(x_1, x_3)$ , при близких к оптимальным уровням  $x_2 = 0$  и  $x_4 = +1$ . Эти поля показаны на рис. 2.

Увеличение прочности композита от 2.8 до 3.6 МПа под влиянием наполнителя (Д/П  $\rightarrow 1.00$ ) и фибры (до 0.06-0.11 м.ч.) происходит, несмотря на снижение Ц/В в равноподвижных смесях от 1.5 до 1.3. Это можно объяснить, с одной стороны, уменьшением толщины межзеренных слоев цементного клея, что ведет к снижению вероятности появления в них опасных дефектов, с другой, влиянием пространственной решетки из тонких полимерных волокон, не только армирующих, но и реорганизующих макроструктуру композита.

Линейная усадка в зоне оптимума прочности вдвое ниже, чем у композитов с Ц/В<sub>max</sub>, главным образом за счет введения волокон.



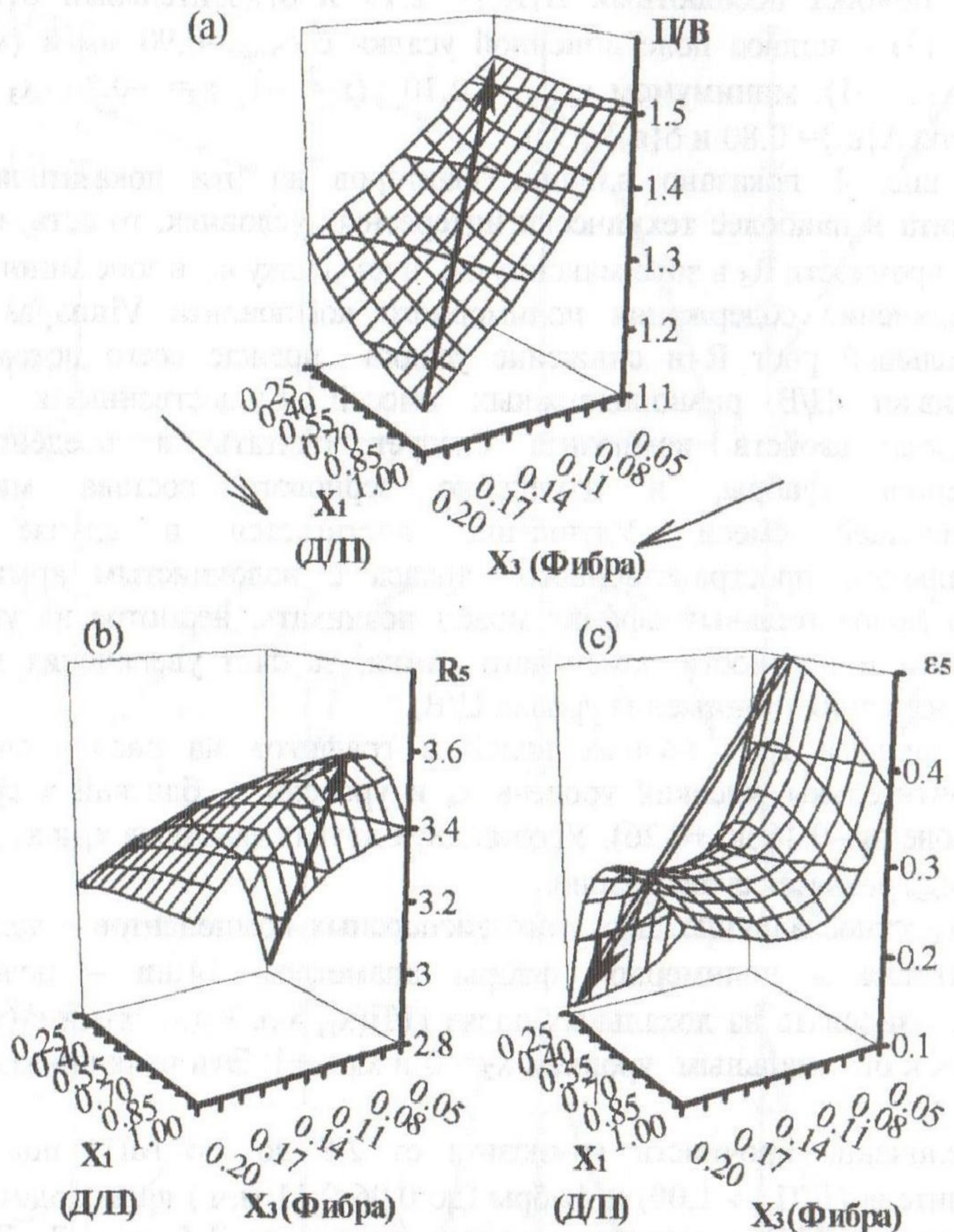


Рис. 2. Локальные поля в координатах содержания тонкодисперсных компонентов:

- а. цементно-водного отношения равноподвижных смесей (усредненный градиент направлен от состава с максимальной поверхностью этих компонентов к составу с минимальной),
- б. предела прочности при изгибе композита после пяти суток твердения (градиент в сторону повышенного содержания каркасообразующих компонентов – наполнителя и фибры),
- с. линейной усадки за тот же период (антиградиент направлен к составу с «густым» пространственным армированием при малом содержании тонкодисперсных зерен).



Однако состав, обеспечивающий  $R_{5,max}$  (рис. 2b), не обеспечивает минимальную усадку – для ее достижения требуется увеличение содержания фибры до верхнего уровня (0.20) при снижении доли тонкомолотого наполнителя до 0.25 (рис.2с).

В таких условиях окончательное решение о рациональном составе фиброполимерцементной сухой смеси следует искать как компромиссное, в частности, используя метод Монте-Карло [6-9].

### Литература

1. Соха В.Г., Карапузов Е.К. Строительные материалы “Ceresit” – широкий ассортимент и неограниченные возможности. – Строительные материалы и изделия. – 2003. – №1. – С. 31-33; – №2. – С. 33-34; – №6. – С. 32-34.
2. Соха В.Г. Армополимерцементные смеси для устройства высокопрочных покрытий промышленных полов. – Строительные материалы и изделия. – 2003. – №5. – С. 5-7.
3. Сухие строительные смеси: Справ. пособие / Е.К.Карапузов, Г. Лутц, Х. Гарольд и др. – К.: Техніка, 2000. – 226 с.
4. Моделирование влияния системы «целлюлозные волокна – метилцеллюлоза – суперпластификатор» на водопотребность сухих строительных смесей / Н.Р. Антонюк, В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Е.К. Карапузов, В.Г. Соха // Вісник Дон. ДАБА. Композиційні матеріали для будівництва: Зб. наук. пр. – Макеевка, 2003. – Вип. 2003-1(38). – С. 9-12.
5. 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. – К., 1996. – 105 с.
6. Ляшенко Т.В. Поля свойств строительных материалов (концепция, анализ, оптимизация). Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.05 / ОГАСА. – Одесса, 2003. – 34 с.
7. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Методы компьютерного материаловедения и технология бетона // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. – К.: НДБК. – 2002. – Вип. 56: Сучасні проблеми бетону та його технологій. – С. 217-226.
8. Поиск составов фиброполимерцементных сухих смесей с компромиссными уровнями прочности и усадки с помощью метода Монте-Карло / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, В.Г. Соха, Е.К. Карапузов // Структура, свойства и состав бетона: Мат-лы науч.-практ. сем. – Ровно, 2003. – С. 23-26.
9. Analysis of concrete property fields and search for the best compositions using Monte Carlo method / T. Lyashenko, V. Voznesensky, S. Boiko, D. Shtakelberg // Brittle Matrix Composites 7: Proc. VII Int. Symp. BMC7. – Cambridge and Warsaw: Woodhead Publ. Ltd., ZTUREK, 2003. – P. 351-358.