

DOI: 10.12737/22644

Низина Т.А., д-р техн. наук, проф.,

Балыков А.С., аспирант

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Макарова Л.В., канд. техн. наук, доц.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ «СОСТАВ - СВОЙСТВО» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ\*

nizinata@yandex.ru

В статье приведены результаты использования экспериментально-статистических моделей «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – свойство» для исследования физико-механических характеристик модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов. Показаны преимущества применения моделей данного класса. Приведены графические зависимости, представляющие собой вторичную модель из 7 треугольных диаграмм Гиббса-Розебома, построенных с применением программы Statistica 10.0.1011, фиксируемых в 7 точках несущего треугольника с изолиниями максимумов исследуемых свойств.

**Ключевые слова:** экспериментально-статистическая модель «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – свойство», план эксперимента, коэффициенты полиномиального уравнения, треугольная диаграмма Гиббса-Розебома, дисперсно-армированный мелкозернистый бетон.

**Введение.** При разработке композиционных строительных материалов с требуемым комплексом свойств на основе методов планирования эксперимента требуется получить количественные соотношения между показателями качества материала, параметрами его структуры, рецептурно-технологическими и эксплуатационными факторами [1–7]. Решение данных задач осуществляется, как правило, с помощью полу-

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2 + \dots + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^m. \quad (1)$$

Преимущества использования полиномиальных моделей класса (1) и основанных на них методов планирования эксперимента на гиперкубе в рецептурно-технологических исследованиях очевидны. Однако с их помощью решить задачи анализа и оптимизации свойств строительных материалов, например, мелкозернистых фибробетонов под влиянием дисперсного армирования и модифицирующих добавок как мно-

чаемых по экспериментальным данным моделей разных типов, среди которых наиболее широко используются многофакторные полиномиальные модели [1, 8], в частности класс регрессионных моделей, эквивалентных разложению функции  $Y(x_1, x_2, \dots, x_k) = Y(\vec{x})$  в ряд Тейлора [8, 9] – полиномы степени  $m$  от  $k$  взаимонезависимых переменных:

гокомпонентных систем невозможно в тех случаях, когда нужно охватить область эксперимента весь диапазон содержания определенного вида фибры или модификатора (от 0 до 100 %). Это обусловлено тем, что все способы описания рецептуры  $q$ -компонентной системы [8, 10] вытекают из уравнения её материального баланса, имеющего в правой части константу  $G_\Sigma$ :

$$G_1 + G_2 + \dots + G_i + \dots + G_q = \sum_{i=1}^q G_i = G_\Sigma = const. \quad (2)$$

Равенство (2) линейно связывает все рецептурные факторы: любое изменение содержания любого компонента системы влечет за собой изменение содержания хотя бы одного другого.

$$v_1 + v_2 + \dots + v_i + \dots + v_q = 1. \quad (3)$$

Использование полиномиальных моделей (1) для описания  $q$ -компонентной системы возможно при определенных вариантах записи варьируемых факторов и представляет некоторые сложности, что в конечном итоге сказывается на качестве исследования многокомпонентных систем. Поэтому для их описания в работе [8]

Разделив обе части (2) на  $G_\Sigma$ , состав запишется в виде долей (в частности, массовых) каждого компонента  $0 \leq v_i \leq 1$ :

предлагается применять иные чем (1) классы экспериментально-статистических моделей и приемов планирования эксперимента.

**Методология.** В физической химии, в металлургии и других химико-технологических науках в качестве стандартных инструментов исследований широко применяются симплексы

(выпуклые многогранники, не имеющие диагональных сечений): прямая, треугольник, тетраэдр, пентагон и др. [8, 11]. Для наглядного представления изменения исследуемых характеристик материалов при варьировании в составах трех факторов предпочтительным является использование правильного треугольника как базы трехкомпонентных диаграмм, позволяющего выразить точно, графическим путем, не только качественно, но и количественно взаимные отношения и свойства, не зная в большинстве случаев алгебраического уравнения функции, определяющей соотношения между составом и свойствами однородного тела. Наглядность треугольника послужила основанием для выбора его Гиббсом (по соотношению отрезков) и Розебомом (по соотношению высот) в качестве поля для отображения отношений связей между трехкомпонентным составом и термодинамическими константами вещества.

Т.В. Ляшенко был предложен [8] существенно новый подход, заключающийся в разработке специального класса полиномиальных моделей для описания систем «смесь I, смесь II, технология – свойства», дающего возможность перехода от раздельного анализа диаграмм «химико-минералогический состав – свойство» и «зерновой состав – свойство» наполненных полимерных композиций к объединенному. Данная методика учитывала как физические особенности композитов, так и опыт моделирования систем «технология – свойства» и «состав – свойства». Кроме этого были предложены алгоритмы решения оптимизационных задач в системах с линейно связанными элементами, а

$$\hat{y} = b_{12} \cdot v_1 \cdot v_2 + b_{13} \cdot v_1 \cdot v_3 + b_{23} \cdot v_2 \cdot v_3 + d_{12} \cdot w_1 \cdot w_2 + d_{13} \cdot w_1 \cdot w_3 + d_{23} \cdot w_2 \cdot w_3 + k_{11} \cdot v_1 \cdot w_1 + k_{21} \cdot v_2 \cdot w_1 + k_{31} \cdot v_3 \cdot w_1 + k_{12} \cdot v_1 \cdot w_2 + k_{22} \cdot v_2 \cdot w_2 + k_{32} \cdot v_3 \cdot w_2 + k_{13} \cdot v_1 \cdot w_3 + k_{23} \cdot v_2 \cdot w_3 + k_{33} \cdot v_3 \cdot w_3. \quad (4)$$

Модель (4) является более содержательной и информативной по сравнению с рассматриваемым ранее полиномом (1), благодаря учету в своей структуре ряда физических особенностей объектов моделирования. К основным преимуществам данной модели можно отнести охват полной области составов наполнителя, включая однокомпонентные; четкий физический смысл численных параметров моделей; низкие экспериментальные затраты на их построение по сравнению с моделями того же уровня информативности (например, полиномы Шеффе) и т.д. [8].

**Основная часть.** В процессе экспериментального исследования изучалось влияние дисперсных волокон и модифицирующих добавок на предел прочности при сжатии (ГОСТ 310.4) и на растяжение при изгибе (ГОСТ 310.4), плот-

также методы и средства отражения результатов моделирования для решения конкретных инженерных задач с использованием полученных моделей.

Системы «смесь I, смесь II, технология – свойства» ( $M_I M_{II} TQ$ ; «mixture, technology, quality») при фиксировании одной или двух групп переменных переходят в системы «смесь I, смесь II – свойства» ( $M_I M_{II} Q$ ) и «смесь (состав) – свойства» ( $MQ$ ) [8]. Систему  $M_I M_{II} Q$  целесообразно и эффективно применять, в том числе для моделирования и исследования свойств модифицированных мелкозернистых фибробетонов при совместном влиянии модифицирующих добавок (смесь I) и дисперсного армирования (смесь II). При этом приведенный ниже полином (4) для описания данной модели представляет собой многочлен второй степени относительно трех линейно связанных факторов  $v_i$ , задающих смесь I (модифицирующие добавки), и трех линейно связанных факторов  $w_i$ , задающих смесь II (дисперсные волокна), коэффициенты которого имеют четкий физический смысл [8]. Каждый из девяти коэффициентов  $k_{ij}$  в модели (4) численно равен величине свойства композита  $\hat{y}$ , наполненного одной парой основных мононаполнителей (модификатор + фибра); коэффициенты  $b_{ij}$  и  $d_{ij}$  оценивают нелинейность (синергизм или антагонизм по отношению к данному свойству) влияния смешивания двух модификаторов ( $b_{ij}$ ) или фибр ( $d_{ij}$ ):

ность в нормальных влажностных условиях (ГОСТ 12730.1-78) в возрасте 28 суток дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов.

При построении полиномиальных моделей физико-механических характеристик использовались данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, при планировании которых были учтены результаты исследований, приведенных в работах [12–15] и предварительных экспериментов по определению границ целесообразного применения модифицирующих добавок и фибр.

Серии образцов-призм  $40 \times 40 \times 160$  мм изготавливались с использованием портландцемента класса ЦЕМ I 42,5Б производства ОАО «Мордовцемент»; в качестве мелкозернистого заполнителя применялся речной песок с размером зерна менее 5 мм, добываемый в посёлке

Смольный Ичалковского района Республики Мордовии; в качестве пластификатора для обеспечения необходимых реологических свойств – высококачественный суперпластификатор Melflux 1641 F производства BASF Constraction Polymers (Trostberg, Германия), вводимый в количестве 0,5 % от массы вяжущего.

В эксперименте варьировалось 6 рецептурных факторов, образующие две группы:

1) массовые доли модифицирующих добавок ( $0 \leq v_i \leq 1; \sum v_i = 1; i = 1, 2, 3$ ):  $v_1$  – микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ-85) производства ОАО «Кузнецкие ферросплавы», МКУ;  $v_2$  – высокоактивный метакраолин белый производства ООО «Мета-Д», ВМК;  $v_3$  – гидроизоляционная добавка в бетонную смесь «Пенетрон Адмикс» производства завода гидроизоляционных материалов «Пенетрон» (г. Екатеринбург), Адмикс;

2) массовые доли дисперсных волокон ( $0 \leq w_i \leq 1; \sum w_i = 1; i = 1, 2, 3$ ):  $w_1$  – полипропиленовое мультифиламентное волокно с длиной резки 12 мм, диаметром 25÷35 мкм, плотностью 0,91 г/см<sup>3</sup>, ППН;  $w_2$  – полиакрилонитрильное синтетическое волокно специальной обработки для бетонов FibARM Fiber WB с длиной резки 12 мм, диаметром 14÷31 мкм, плотностью 1,17±0,03 г/см<sup>3</sup>, ПАН;  $w_3$  – модифицированная астраленами базальтовая микрофибра под фир-

менным названием «Астрофлекс-МБМ» длиной 100÷500 мкм, средним диаметром 8÷10 мкм, насыпной плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>, с содержанием астраленов 0,0001÷0,01 % от массы фибры, МБМ.

Уровни варьирования исследуемых рецептурных факторов в кодированных величинах и их численные значения представлены в таблице 1. Для исследования физико-механических характеристик модифицированных мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов был синтезирован насыщенный D-оптимальный план эксперимента [8], содержащий 15 опытных точек.

Технология изготовления дисперсно-армированной бетонной смеси включала несколько этапов. На первом этапе осуществлялось введение и перемешивание в сухом состоянии требуемого количества вяжущего, заполнителя и модифицирующих добавок; на втором – вводились дисперсные волокна с первой порцией воды (В/Ц=0,2); на третьем – производилась корректировка составов водой для получения равноподвижных составов. Данная ступенчатая схема приготовления дисперсно-армированной бетонной смеси позволяет избежать комкования волокон при перемешивании, тем самым позволив максимально использовать преимущества дисперсного армирования цементных композитов.

Таблица 1

#### Уровни варьирования исследуемых факторов экспериментального исследования

Варьируемые факторы			Уровни варьирования			
			0	0,333	0,5	1
Вид добавки	$v_1$	МКУ, % от массы цемента	0	6,667	10	20
	$v_2$	ВМК, % от массы цемента	0	2	3	6
	$v_3$	Адмикс, % от массы цемента	0	0,5	0,75	1,5
Вид фибры	$w_1$	ППН, % от массы цемента	0	0,333	0,5	1
	$w_2$	ПАН, % от массы цемента	0	0,5	0,75	1,5
	$w_3$	МБМ, % от массы цемента	0	1,667	2,5	5

Прочностные характеристики (предел прочности при сжатии и на растяжение при изгибе) определялись на установке WilleGeotechnik® (модель 13-PD/401) для испытания строительных материалов. Настройка основных параметров и фиксирование полученных экспериментальных результатов осуществлялось с применением программного обеспечения GEOSYS 8.7.8.

Экспериментально-статистические модели зависимости исследуемых физико-механических показателей качества мелкозернистых фибробетонов от его наполнителей, включающих моди-

фицирующие добавки (смесь I) и дисперсные волокна (смесь II) задавались в виде приведенного полинома  $M_1M_{II}Q$  «смесь I, смесь II – свойство» вида (4). Выбор используемого плана эксперимента и аппроксимирующего полинома второй степени обусловлен приведенными выше преимуществами данных ЭС-моделей.

По результатам проведенных исследований были получены полиномиальные уравнения отражающих связь между исследуемыми свойствами композитов и содержанием варьируемых факторов:

- предел прочности при сжатии (МПа)

$$\sigma_{\text{сж.}} = 12,65 \cdot v_1 \cdot v_2 - 25,24 \cdot v_1 \cdot v_3 - 2,98 \cdot v_2 \cdot v_3 + 24,16 \cdot w_1 \cdot w_2 + 29,04 \cdot w_1 \cdot w_3 + 11,09 \cdot w_2 \cdot w_3 + 29,17 \cdot v_1 \cdot w_1 + 31,09 \cdot v_2 \cdot w_1 + 36,32 \cdot v_3 \cdot w_1 + 28,21 \cdot v_1 \cdot w_2 + 53,36 \cdot v_2 \cdot w_2 + 40,76 \cdot v_3 \cdot w_2 + 24,12 \cdot v_1 \cdot w_3 + 42,26 \cdot v_2 \cdot w_3 + 38,29 \cdot v_3 \cdot w_3; \text{ гПа} \quad (5)$$

- предел прочности на растяжение при из-

$$\sigma_{\text{изг.}} = 0,65 \cdot v_1 \cdot v_2 - 3,28 \cdot v_1 \cdot v_3 - 1,02 \cdot v_2 \cdot v_3 + 2,16 \cdot w_1 \cdot w_2 + 1,02 \cdot w_1 \cdot w_3 + 3,03 \cdot w_2 \cdot w_3 + 4,70 \cdot v_1 \cdot w_1 + 3,69 \cdot v_2 \cdot w_1 + 4,73 \cdot v_3 \cdot w_1 + 4,92 \cdot v_1 \cdot w_2 + 5,88 \cdot v_2 \cdot w_2 + 4,82 \cdot v_3 \cdot w_2 + 3,68 \cdot v_1 \cdot w_3 + 5,59 \cdot v_2 \cdot w_3 + 5,13 \cdot v_3 \cdot w_3. \quad (6)$$

- плотность в нормальных влажностных условиях (кг/м<sup>3</sup>)

$$\rho = -240,7 \cdot v_1 \cdot v_2 + 163,4 \cdot v_1 \cdot v_3 + 5,63 \cdot v_2 \cdot v_3 + 1,35 \cdot w_1 \cdot w_2 - 110 \cdot w_1 \cdot w_3 + 179,4 \cdot w_2 \cdot w_3 + 1989,6 \cdot v_1 \cdot w_1 + 2139,5 \cdot v_2 \cdot w_1 + 2124,3 \cdot v_3 \cdot w_1 + 2025,4 \cdot v_1 \cdot w_2 + 2203,9 \cdot v_2 \cdot w_2 + 2237,7 \cdot v_3 \cdot w_2 + 2006,5 \cdot v_1 \cdot w_3 + 2147,3 \cdot v_2 \cdot w_3 + 2210,5 \cdot v_3 \cdot w_3. \quad (7)$$

Из модели  $\hat{y}(v_1, v_2, v_3; w_1, w_2, w_3)$  (M<sub>I</sub>M<sub>II</sub>Q) получают два вида моделей «смесь I (модифицирующие добавки) – свойство» ( $\hat{y}(v_1, v_2, v_3)$ ; M<sub>I</sub>Q) и «смесь II (дисперсные волокна) – свойство» ( $\hat{y}(w_1, w_2, w_3)$ ; M<sub>II</sub>Q) при фиксировании соответствующей группы рецептурных факто-

ров. При этом для каждой исследуемой физико-механической характеристики и каждого вида моделей построено по 7 треугольных диаграмм Гиббса-Розебома в виде двумерных карт линий уровня (рис. 1, 2) с использованием программы Statistica 10.0.1011.

Таблица 2

**Планы экспериментального исследования максимумов свойств**

№ со-става	Варьируемые факторы в кодированных величинах					
	Вид добавки			Вид фибры (волокна)		
	$v_1$ (МКУ)	$v_2$ (ВМК)	$v_3$ (Адмикс)	$w_1$ (ППН)	$w_2$ (ПАН)	$w_3$ (МБМ)
1	1	0	0	1	0	0
2	0	1	0	0	1	0
3	0	0	1	0	0	1
4	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0
5	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5
6	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5
7	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333

Для дальнейшего анализа влияния наполнителей на свойства цементных композитов вводился обобщающий показатель – числовая характеристика поля свойства в виде абсолютного значения исследуемого показателя, соответствующего её максимуму  $\hat{y}_{\text{max}}$ . Для этого были синтезированы 2 плана эксперимента, содержащий по 7 точек каждый (таблица 2), уровни варьирования рецептурных факторов представле-

$$\hat{y}_{\text{max}} = b_1 \cdot v_1 + b_2 \cdot v_2 + b_3 \cdot v_3 + d_{12} \cdot v_1 \cdot v_2 + d_{13} \cdot v_1 \cdot v_3 + d_{23} \cdot v_2 \cdot v_3 + k_{123} \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot v_3; \quad (8)$$

$$\hat{y}_{\text{max}} = b_1 \cdot w_1 + b_2 \cdot w_2 + b_3 \cdot w_3 + d_{12} \cdot w_1 \cdot w_2 + d_{13} \cdot w_1 \cdot w_3 + d_{23} \cdot w_2 \cdot w_3 + k_{123} \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot w_3. \quad (9)$$

Используя коэффициенты полиномиальных уравнений (8) и (9), приведенные в таблице 3, были построены по 2 треугольные диаграммы Гиббса-Розебома для каждой исследуемой ха-

рактеристики, отображающие соответствующие системы  $\hat{y}_{\text{max}}(v_1, v_2, v_3)$  и  $\hat{y}_{\text{max}}(w_1, w_2, w_3)$ .

**Числовые значения коэффициентов регрессий (8) и (9)**

Члены уравнений регрессии	Числовые значения коэффициентов регрессии для исследуемого свойства композита		
	плотность, кг/м <sup>3</sup>	предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	предел прочности при сжатии, МПа
$v_1/w_1$	2060,8 / 2139,5	5,35 / 4,73	34,73 / 36,32
$v_2/w_2$	2220,5 / 2237,7	6,49 / 5,88	53,36 / 53,36
$v_3/w_3$	2268,9 / 2210,5	5,73 / 5,59	45,60 / 42,26
$v_1 \cdot v_2/w_1 \cdot w_2$	-240,7 / -29,03	0,068 / 0,778	3,85 / 13,70
$v_1 \cdot v_3/w_1 \cdot w_3$	163,4 / -140,4	-3,86 / 0,106	-26,08 / 21,11
$v_2 \cdot v_3/w_2 \cdot w_3$	5,63 / 179,4	-1,02 / 3,03	-10,94 / 11,09
$v_1 \cdot v_2 \cdot v_3/w_1 \cdot w_2 \cdot w_3$	0 / 45,57	0,87 / -2,47	13,20 / 8,10

На заключительном этапе эксперимента методами компьютерной графики для каждой исследуемой физико-механической характеристики производился синтез вторичных моделей с целью анализа влияния модифицирующих добавок ( $v_i$ ) и дисперсных волокон ( $w_i$ ) на обобщающий показатель  $\hat{y}_{max}$ , отражающий соответственно роль дисперсного армирования ( $w_i$ ) и модифицирования активными минеральными добавками ( $v_i$ ). Для отображения изменяющихся трехкомпонентных диаграмм «модифицирующие добавки – свойство» и «дисперсные волокна – свойство» целесообразно использовать [5] их дискретный набор на соответствующих

треугольниках «дисперсные волокна – максимум свойства» и «модифицирующие добавки – максимум свойства», при этом вторичные модели  $\hat{y}_{max(w)}(v)$  и  $\hat{y}_{max(v)}(w)$  отображаются в виде треугольника, «скользящего» по несущему треугольнику и фиксируемого в семи точках-центроидах (3 угла + 3 середины сторон + центр тяжести). Примеры получаемых графических моделей, описывающих изменение предела прочности при сжатии дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на треугольниках «дисперсные добавки – максимум свойства» и «модифицирующие добавки – максимум свойства» приведены, соответственно, на рис. 1.

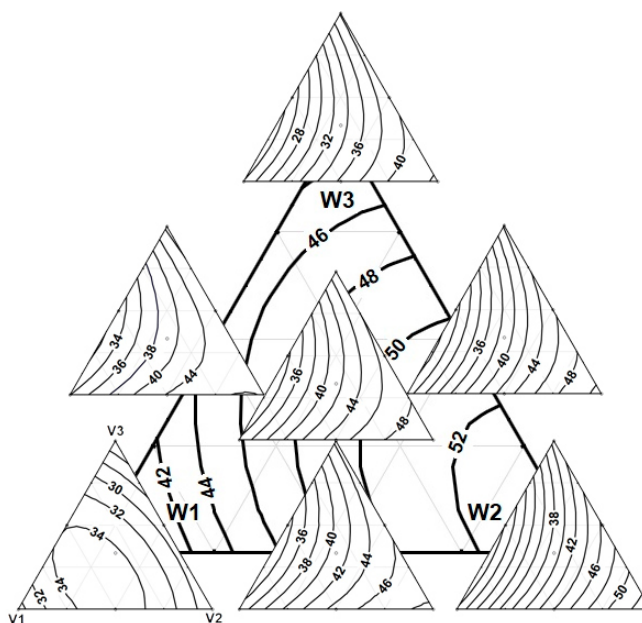


Рис. 1. Диаграммы «модифицирующие добавки – свойство» и изолинии максимальных значений предела прочности при сжатии цементных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на треугольнике «дисперсные волокна – максимум свойства» (МПа)

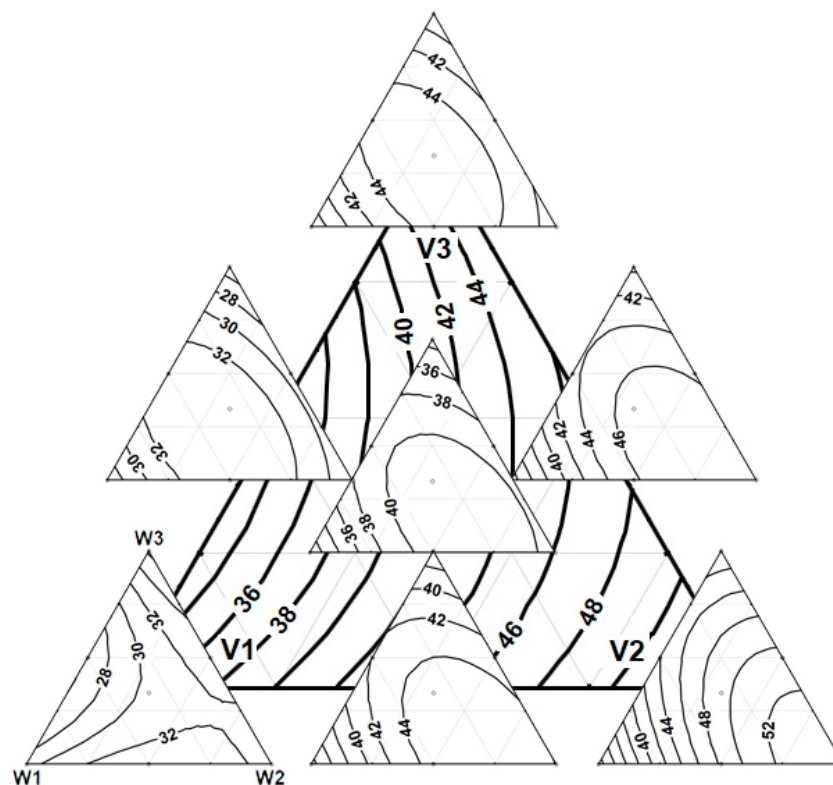


Рис. 2. Диаграммы «дисперсные волокна – свойство» и изолинии максимальных значений предела прочности при сжатии цементных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на треугольнике «модифицирующие добавки – максимум свойства» (МПа)

**Выводы.** Экспериментально-статистические модели вида «смесь I, смесь II – свойство» являются более содержательными по сравнению с аналогами благодаря учету в своей структуре ряда физических особенностей объектов моделирования, а также низкими экспериментальными затратами на их построение по сравнению с моделями того же уровня информативности. Графическое отображение данной системы в виде вторичной модели, представляющей дискретный набор 7 треугольных диаграмм исследуемых свойств от содержания наполнителей на несущем треугольнике с изолиниями обобщающего показателя, позволяет наглядно показать изменение исследуемых свойств дисперсно-армированных модифицированных мелкозернистых бетонов и извлечь максимальные сведения при анализе данной модели.

\*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-33-50103.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 207 с.
2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2006. 116 с.
3. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Иванов Я.П., Николов И.И. ЭВМ и оптимизация

композиционных материалов. Киев: Будивельник. 1989. 240 с.

4. Ляшенко Т.В. Области допустимых технологических решений в полном и локальных полях свойств композитов // Вісник Одес. ДАБА. Одеса: Місто майстрів. 2001. Вип. 5. С. 75–80.

5. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Методы компьютерного материаловедения и технология бетона // Будівельні конструкції: Міжвід. наук. техн. зб. Киев: НДІБК. 2002. Вип. 56: Сучасні проблеми бетону та його технологій. С. 217–226.

6. Карповский Е.Я., Ляшенко Т.В., Чернецкий А.А. Повышение качества и эффективности исследований при использовании математической теории эксперимента. Киев: Общество «Знание» УССР, 1981. 26 с.

7. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В., Смирнов Е.В. Преодоление неопределенностей целей в задаче многокритериальной оптимизации на примере разработки сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации // Строительные материалы. 2006. № 9. Наука. № 8. С. 23–26.

8. Ляшенко Т.В. Оптимизация наполнителей полиэфирных связующих на основе моделей нового класса: дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1984. 236 с.

9. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 340 с.

10. Вознесенский В.А., Выровой В.Н., Керш В.Я. и др. Современные методы оптимизации композиционных материалов. Киев: Будівельник, 1983. 144 с.

11. Коваль С. Оптимизация реологических параметров матрицы самоуплотняющегося бетона с использованием моделей «смесь – технология – свойства» // Вестник НТУ «ХПИ»: Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. №59. С. 86–92.

12. Селяев В.П., Низина Т.А., Балбакин А.В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия:

Строительство и архитектура. Ч. 2. Вып. 31 (50), Волгоград. 2013. С. 156–163.

13. Низина Т.А., Балыков А.С. Построение экспериментально-статистических моделей «состав – свойство» физико-механических характеристик модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. С. 54–66.

14. Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2. С. 13–25.

15. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Балыков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок // Строительные материалы. 2016. №7. С. 68–72.

---

**Nizina T.A., Balykov A.S., Makarova L.V.**

**APPLICATION OF MODELS «COMPOSITION – PROPERTY» FOR RESEARCH PROPERTIES OF MODIFIED FIBER-REINFORCED FINE-GRAINED CONCRETES**

*In the article results of use of experimental-statistical models "modifying additives, dispersible fibers – property" for study of physico-mechanical characteristics of modified fiber-reinforced fine-grained concretes are shown. Advantages of application of the models in this class are displayed. 7 triangular Gibbs-Roseboom's diagrams fixed in 7 points of bearing triangle with the isolines of maximums of the investigated properties, built with the use of the program Statistica 10.0.1011, and graphic dependences of its are given.*

**Key words:** *experimental-statistical models «modifying additives, dispersible fibers – property», plan of experiment, coefficient of polynomial equation, triangular Gibbs-Roseboom's diagram, statistical regression analysis, fiber-reinforced fine-grained concrete.*

---

**Низина Татьяна Анатольевна**, доктор технических наук, профессор, кафедры строительных конструкций.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва.

Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, 24.

E-mail: nizinata@yandex.ru

**Балыков Артемий Сергеевич**, аспирант.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва.

Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, 24.

E-mail: artbalrun@yandex.ru

**Макарова Людмила Викторовна**, кандидат технических наук, доцент.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Адрес: Россия, 430005, г. Пенза, ул. Титова, 28.

E-mail: mak.78\_08@inbox.ru