

doi: 10.5862/MCE.62.2

Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов

Experimental-statistical models of properties of modified fiber- reinforced fine-grained concretes

*Д-р техн. наук, профессор Т.А. Низина,
аспирант А.С. Балыков,*

*Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва, г. Саранск, Россия*

*T.A. Nizina,
A.S. Balykov,*

*Ogarev Mordovia State University, Saransk,
Russia*

Ключевые слова: экспериментально-статистические модели; модифицирующие добавки; дисперсные волокна; дисперсно-армированный мелкозернистый бетон; физико-механические характеристики

Key words: experimental-statistical models; modifying additives; dispersible fibers; fiber-reinforced fine-grained concrete; physico-mechanical characteristics

Аннотация. Приведены результаты исследования физико-механических характеристик дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов с полифункциональными модифицирующими добавками. Изложена методика построения экспериментально-статистических моделей «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – свойство» для исследования плотности в нормальных влажностных условиях, предела прочности при сжатии и на растяжение при изгибе цементных композитов. Графическое отображение применяемой полиномиальной системы для каждой характеристики представляло собой вторичную модель из 7 треугольных диаграмм Гиббса – Розебома, построенных с применением программы Statistica 10.0.1011 и фиксируемых в 7 точках несущего треугольника с изолиниями максимумов исследуемых свойств. По итогам экспериментального исследования выбраны оптимальные комплексы добавок и дисперсных волокон с целью повышения исследуемых характеристик цементных композитов.

Abstract. The given papers present the results of the investigation of physico-mechanical characteristics of fiber-reinforced fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives. The methodology of the construction of experimental-statistical models «modifying additives, dispersible fibers – property» to study density at normal humidity conditions, the limit of compressive strength and the limit of tensile strength in bending cement composites is stated. The graphic reflection of the applied polynomial system for every description was a secondary model from seven triangular Gibbs-Roseboom's diagrams built with the use of the program Statistica 10.0.1011 and fixed at seven points of a bearing triangle with the isolines of maximums of the investigated properties. According to the results of our experimental study, the most optimal complexes additives and dispersed fibers to increase the investigated characteristics of cement composites have been selected.

Введение

Создание в середине XIX века цементного бетона дало толчок стремительному развитию строительной отрасли, что обусловлено многогранностью его применения как строительного материала. За последние 60 лет цементные бетоны общестроительного назначения прошли несколько этапов своего развития, начиная от малокомпонентной рецептуры (цемент, песок, щебень, вода) с добавлением пластификатора: сульфитно-дрожжевой бражки, сульфитно-спиртовой барды, лигносульфатов; позднее стали применяться более эффективные пластификаторы – суперпластификаторы первого поколения на нафталиновой и меламиновой основах. Затем рецептура усложнилась до 6–7 и более компонентной с введением супер- и гиперпластификаторов второго поколения на карбоксилатной основе и дисперсных наполнителей: пуццоланического микрокремнезема, кислой золы, микрокварца, каменной муки (базальтовой, гранитной и др.) [1–7].

Nizina T.A., Balukov A.S. Eksperimentalno-statisticheskie modeli svoystv modifitsirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 13-25. doi: 10.5862/MCE.62.2

Увеличение числа компонентов и, соответственно, рост общего количества рецептурно-технологических факторов цементных композиций приводит к возникновению такого понятия как «проклятие размерности» [8]. Для его преодоления должно быть проведено значительное число исследований физико-механических, эксплуатационных и технологических свойств материала (учитывая и экономическую составляющую процесса), причем координаты оптимумов исследуемых характеристик качества системы часто не совпадают. Решение таких сложных многокритериальных задач возможно только при комплексной реализации рациональных физических и вычислительных экспериментов, применении информативных и содержательных экспериментально-статистических моделей, позволяющих принимать компромиссные решения при их оптимизации.

Литературный обзор

Активация бетонов различного рода модификаторами за счет тонкодисперсных наполнителей широко использовалась ещё в полиструктурной теории, разработанной В.И. Соломатовым и его школой (1985–2000 гг.), которая предусматривала замену до 20...50 % портландцемента минеральными наполнителями для экономии его в составах бетонов [9–11]. Но целью данной модификации являлось не кардинальное изменение реологии бетонных смесей с суперпластификаторами, а снижение расхода цемента.

В настоящее время существует обширная номенклатура модификаторов; многие из них являются специфичными, то есть оказывают избирательное воздействие на одни характеристики бетона, мало или вообще не изменяя другие. Поэтому актуальным направлением в получении высококачественных цементных композитов, имеющих более широкий спектр применения, является использование комплексных модификаторов, состоящих из индивидуальных добавок различного функционального назначения. Полифункциональность и многокомпонентность применяемых модификаторов позволяет эффективно управлять процессами структурообразования на различных этапах приготовления бетона и получать композиты с высокими эксплуатационными свойствами. Таким образом, технологические свойства бетонной смеси и эксплуатационные свойства затвердевшего бетона обеспечиваются высокими функциональными свойствами самих компонентов и их комбинацией [1, 12].

Современные высококачественные бетоны объединяют широкий спектр композитов различного функционального назначения. Среди них можно выделить высокопрочные и ультравысокопрочные бетоны [13–16], самоуплотняющиеся бетоны (SVB, SCC) [17, 18], самонивелирующиеся (SLS), высококоррозионностойкие бетоны [19], реакционно-порошковые бетоны, в том числе и дисперсно-армированные бетоны (Reaktionspulver beton – RPB или Reactive Powder Concrete – RPC) [20–22]. Данные виды бетонов обладают улучшенными физико-механическими характеристиками, в частности высокой прочностью при сжатии и на растяжение при изгибе, трещиностойкостью, коррозионной стойкостью и т.д.

Базой для создания и совершенствования высококачественных порошковых бетонов стали исследования Ш.Т. Бабаева, А.А. Комара [23], Ю.М. Баженова [1, 2, 24], В.Г. Батракова [25] и других ученых, а также создание в России композиционных вяжущих низкой водопотребности (ВНВ). Большой вклад в развитие порошково-активированных бетонов нового поколения на цементных и минерально-шлаковых (геосинтетических) вяжущих внес В.И. Калашников и его научная школа [3–7, 26–28]. Им было предложено оценивать эффективность применения бетонов нового поколения не по показателю прочности, а по удельному расходу цемента на единицу прочности (при сжатии, растяжении и т.д.), который снизился по сравнению с бетонами старого поколения для предела прочности при сжатии с 10...14 кг/МПа до 2,5...5 кг/МПа.

Многочисленные исследования показывают, что получению высококачественных бетонов способствовали революционный прогресс в области пластифицирования бетонных и растворных смесей в виде создания суперпластификаторов и гиперпластификаторов на поликарбоксилатной, полиакрилатной и полигликолиевой основе [17, 18], а также появление более активных пуццоланических добавок с высоким содержанием наночастиц верхнего нанометрического уровня (100..300 нм): микрокремнеземов, дегидратированных каолинов и высокодисперсных зол [17, 20]. В результате этого появилась возможность получать сверхтекучие цементно-минеральные дисперсные системы [1].

Кроме высокоактивных пуццоланических добавок в технологии бетонов всё большее распространение и применение в нашей стране получают модификаторы гидроизоляционного типа, в частности система материалов «Пенетрон» одноименного завода гидроизоляционных

Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2(62). С.13-26.

материалов (г. Екатеринбург), в том числе и добавка в бетонную смесь «Пенетрон Адмикс», дающая возможность повысить прочность, водонепроницаемость и морозостойкость бетона, стойкость к воздействию агрессивных химических и биологических сред. «Пенетрон Адмикс» действует на основе трех принципов: реакции в твердом состоянии, броуновского движения и силы поверхностного натяжения жидкостей. Результатом применения данной добавки является заполнение пор, капилляров и микротрещин цементных композитов нерастворимыми химически стойкими кристаллами [29].

Таким образом, стремительные темпы роста выпуска высококачественных бетонов в настоящее время становятся объективной реальностью, обусловленной значительной экономией материальных и энергетических ресурсов. Однако использованию таких бетонов сопутствует ряд трудностей и рисков, к которым можно отнести:

- недостаточную прочность мелкозернистых бетонов на растяжение при изгибе (рост данной характеристики отстает от роста прочности при сжатии);
- недостаточную трещиностойкость высокопрочных бетонов;
- повышенный расход цемента при изготовлении высокопрочных бетонов, приводящий к повышению усадочных деформаций и внутренних напряжений, накоплению микродефектов, увеличивающих опасность хрупкого разрушения конструкций.

Для устранения перечисленных выше недостатков целесообразно использование дисперсного армирования бетонов фиброй разных типов, что позволяет получить цементные композиты, обладающие вязким характером разрушения [1, 30, 31]. Большое влияние на эффективность дисперсного армирования оказывает прочность контактной зоны цементного камня и волокна; при этом отрицательным фактором служит наличие крупного заполнителя, препятствующего равномерному распределению волокон в матрице бетона и созданию пространственного каркаса дисперсной арматуры. Так, например, в работах Ю.М. Баженова [1, 2] определена способность фибры сдерживать развитие волосяных трещин при расстоянии между отдельными армирующими волокнами не более 10...12 мм (максимальная крупность заполнителя, которую не следует превышать). Мелкозернистая структура цементных композитов обладает рядом достоинств, среди которых можно выделить возможность создания тонкодисперсной однородной высококачественной структуры без включений зерен крупного заполнителя, имеющих иное строение по отношению к цементно-песчаной матрице; высокую тиксотропию и способность к трансформации бетонной смеси; возможность формирования конструкций и изделий методом литья, экструзии, прессования, штампования, набрызга и др. [1].

В бетонах присутствуют трещины различных масштабных уровней – от субмикро- (уровень структуры цементного камня) до макромасштабного уровня (уровень структуры конгломератного типа – бетон с крупным заполнителем). В работе [32] показано, что процесс разрушения структуры цементного композита под действием силовых факторов зарождается на микроуровне как локальный акт продвижения первичной микротрещины до точки бифуркации, которая является дефектом структуры в виде зерна наполнителя или поры, при этом в устье трещины происходит сброс критической плотности энергии. Таким образом, процесс разрушения образца складывается из локальных актов разрушения на микромасштабном уровне и имеет дискретный характер, а целесообразность применения дисперсного армирования диктуется фрактальной иерархией процесса трещинообразования.

На сегодняшний день актуальным направлением является применение многоуровневого армирования, исходящего из гипотезы о конгруэнтности (соразмерности, соответствия) армирующих элементов «блокируемым» трещинам соответствующего уровня структуры (микро-, мезо-, макро-) – цементирующего вещества (новообразований), цементного микробетона, мелкозернистого бетона [33, 34]. При этом армирующими элементами на макромасштабном уровне могут выступать волокна, а на микромасштабном уровне – высокодисперсные минеральные наполнители, которые вводятся в бетонную смесь совместно с цементом [1].

В настоящее время передовым опытом можно считать введение в состав бетона наночастиц-инициаторов (астраленов, фуллеренов, фуллероидов и т.д.), позволяющих направленно использовать процесс самоформирования цементного камня. Интересным технологическим направлением использования структурирующих наночастиц бетонных смесей является предварительное их нанесение на твердые носители [35, 36], при этом параллельно решается задача «последовательного разбавления», необходимого для равномерного распределения крайне

мало количества необходимых наноинициаторов по объему бетонной смеси. Одним из наиболее перспективных носителей являются высокомодульные микроволокна, среди которых всё больший интерес представляет применение промышленных отходов базальтовой фибры, производимой из расплава базальтовых пород. При совместном применении фибр и наноинициаторов каждое отдельное волокно в процессе созревания бетона «разрастается» в преимущественном направлении его расположения, тем самым усиливая эффекты дисперсного армирования [35, 36].

При разработке композиционных материалов для обеспечения требуемого комплекса свойств необходимы определенные количественные соотношения между показателями качества материала, параметрами его структуры, рецептурно-технологическими и эксплуатационными факторами. Решение данных задач осуществляется в основном с помощью получаемых по экспериментальным данным моделей разных типов, среди которых благодаря развитию компьютерных технологий и математической теории эксперимента широко используются многофакторные полиномиальные модели.

В физической химии, в металловедении и других химико-технологических науках в качестве стандартных инструментов исследований широко применяются симплексы (выпуклые многогранники, не имеющие диагональных сечений): прямая, треугольник, тетраэдр, пентатоп и др. [37, 39]. 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. 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.

Для получения специального класса экспериментально-статистических моделей для описания систем «смесь I, смесь II, технология – свойства» Т.В. Ляшенко был предложен принципиально новый подход, дающий возможность перехода от раздельного анализа диаграмм «химико-минералогический состав – свойство» и «зерновой состав – свойство» наполненных полимерных композиций к объединенному [37]. Согласно предлагаемой методике, системы «смесь I, смесь II, технология – свойства» (MIMITQ; «mixture, technology, quality») при фиксации одной или двух групп переменных переходят в системы «смесь I, смесь II – свойства» (MIMIQ) и «смесь (состав) – свойства» (MQ).

Постановка задачи и описание исследования

Основная цель данной работы состояла в построении и анализе экспериментально-статистических моделей «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – свойство» следующих физико-механических характеристик, модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов: плотность в нормальных влажностных условиях (ГОСТ 12730.1-78), прочность при сжатии (ГОСТ 310.4) и на растяжение при изгибе (ГОСТ 310.4) в возрасте 28 суток.

В ходе экспериментального исследования изготавливались серии из 8 образцов-призм 40x40x160 мм 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 поселке Смольный Ичалковского района Республики Мордовия, доля которого составляла 65 % от массы твердой фазы фибробетонной смеси. Для снижения водоцементного отношения, обеспечения водоредуцирующего и пластифицирующего эффектов был использован высококачественный суперпластификатор Melflux 1641 F производства BASF Constraction Polymers (Trostberg, Германия), вводимый в количестве 0.5 % от массы вяжущего.

Многоуровневое дисперсное армирование бетонов обеспечивалось отдельным или комплексным введением трех видов фибр ($0 \leq w_i \leq 1; \sum w_i = 1; i = 1, 2, 3$):

- 1) полипропиленовое мультифиламентное волокно с длиной резки 12 мм, диаметром 25...35 мкм, плотностью 0,91 г/см³ (w_1 , ППН);
- 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/см³ (w_2 , ПАН);

Низина Т.А., Бальков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2(62). С.13-26.

3) модифицированная астраленами базальтовая микрофибра под фирменным названием «Астрофлекс-МБМ» длиной 100... 500 мкм, средним диаметром 8...10 мкм, насыпной плотностью 800 кг/м³, с содержанием астраленов 0.0001...0.01 % от массы фибры (w_3 , МБМ).

В качестве активных минеральных пуццоланических модификаторов использовались ($0 \leq v_i \leq 1$; $\sum v_i = 1$; $i = 1, 2, 3$):

1) микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ-85) производства ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (v_1 , МКУ), ТУ 5743–048–02495332–96;

2) высокоактивный метакаолин белый производства ООО «Мета-Д» (v_2 , ВМК), ТУ 572901–001–65767184–2010;

3) гидроизоляционная добавка в бетонную смесь «Пенетрон Адмикс» (v_3 , Адмикс).

Технология приготовления 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 ($B/C = 0.2$); на третьем – производилась корректировка составов водой для получения равноподвижных составов. Данная ступенчатая схема приготовления дисперсно-армированной бетонной смеси позволила избежать комкования волокон при перемешивании, тем самым позволив максимально использовать преимущества дисперсного армирования цементных композитов.

В результате эксперимента был использован насыщенный D-оптимальный план, содержащий 15 опытных точек [37]. Уровни варьирования исследуемых факторов в кодированных величинах и их численные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов эксперимента

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

Экспериментально-статистические модели зависимости исследуемых физико-механических показателей качества мелкозернистых фибробетонов от его наполнителей в виде модифицирующих добавок (смесь I) и дисперсных волокон (смесь II) задавались в виде приведенного полинома MIMIQ «смесь I, смесь II – свойство» вида [39]:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & b_{12} \cdot v_1 \cdot v_2 + b_{13} \cdot v_1 \cdot v_3 + b_{23} \cdot v_2 \cdot v_3 + d_{12} \cdot w_1 \cdot w_2 + d_{13} \cdot w_1 \cdot w_3 + \\ & + d_{23} \cdot w_2 \cdot w_3 + k_{11} \cdot v_1 \cdot w_1 + k_{21} \cdot v_2 \cdot w_1 + k_{31} \cdot v_3 \cdot w_1 + k_{12} \cdot v_1 \cdot w_2 + \\ & + k_{22} \cdot v_2 \cdot w_2 + k_{32} \cdot v_3 \cdot w_2 + k_{13} \cdot v_1 \cdot w_3 + k_{23} \cdot v_2 \cdot w_3 + k_{33} \cdot v_3 \cdot w_3. \end{aligned} \quad (1)$$

Данный полином (1) 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 многочлена имеют четкий физический смысл [37]: каждый из девяти коэффициентов k_{ij} в модели (1) численно равен величине свойства композита \hat{y} , наполненного одной парой основных мононаполнителей (модификатор + фибра); коэффициенты b_{ij} и d_{ij} оценивают нелинейность (синергизм или

Nizina T.A., Balukov A.S. Eksperimentalno-statisticheskie modeli svoystv modificirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 13-25. doi: 10.5862/MCE.62.2

антагонизм по отношению к данному свойству) влияния смешивания двух модификаторов (b_{ij}) или фибр (d_{ij}).

Перед решением задач по данным моделям выполнялся их полный статистический регрессионный анализ методом наименьших квадратов. Все этапы регрессионного анализа, а в конечном итоге и вычисление коэффициентов полинома (1) проводились с применением компьютерных технологий в виде разработанной оболочки в программе Microsoft Excel. В результате статистической обработки полиномиальных моделей были получены коэффициенты уравнений регрессии, отражающих связь между исследуемыми свойствами композитов и содержанием варьируемых факторов.

Из модели $\hat{y}(v_1, v_2, v_3; w_1, w_2, w_3)$ (MiMiQ) получаются два вида моделей «смесь I (модифицирующие добавки) – свойство» ($\hat{y}(v_1, v_2, v_3); MiQ$) и «смесь II (дисперсные волокна) – свойства» ($\hat{y}(w_1, w_2, w_3); MiQ$) при фиксировании соответствующей группы рецептурных факторов, при этом для каждого типа моделей и каждой исследуемой физико-механической характеристики построено по 7 треугольных диаграмм Гиббса – Розебома в виде двумерных карт линий уровня (рис. 1–3) с использованием программы Statistica 10.0.1011.

Для дальнейшего анализа влияния наполнителей на свойства цементных композитов вводился обобщающий показатель – числовая характеристика поля свойства в виде абсолютного значения исследуемого показателя, соответствующего ее максимуму \hat{y}_{max} . Для этого были синтезированы 2 плана эксперимента, содержащие по 7 точек каждый (табл. 2). ЭС-модели вида «смесь I – максимум свойства» ($\hat{y}_{max}(v_1, v_2, v_3); MiQ_{max}$) и «смесь II – максимум свойства» ($\hat{y}_{max}(w_1, w_2, w_3); MiQ_{max}$), отражающие связь между варьируемыми факторами и максимумами исследуемых свойств, представляют собой полиномиальные уравнения (2) и (3):

$$\hat{y}_{max} = b_1 \cdot v_1 + b_2 \cdot v_2 + b_3 \cdot v_3 + d_{12} \cdot v_1 \cdot v_2 + d_{13} \cdot v_1 \cdot v_3 + d_{23} \cdot v_2 \cdot v_3 + k_{123} \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot v_3; \quad (2)$$

$$\hat{y}_{max} = b_1 \cdot w_1 + b_2 \cdot w_2 + b_3 \cdot w_3 + d_{12} \cdot w_1 \cdot w_2 + d_{13} \cdot w_1 \cdot w_3 + d_{23} \cdot w_2 \cdot w_3 + k_{123} \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot w_3. \quad (3)$$

В результате регрессионного анализа ЭС-моделей (2) и (3) были получены коэффициенты соответствующих уравнений (табл. 3).

Используя данные таблицы 3, с помощью программы Statistica 10.0.1011 для полиномов (2) и (3) построены по две треугольные диаграммы Гиббса-Розебома для каждой исследуемой характеристики, отображающие соответствующие системы $\hat{y}_{max}(v_1, v_2, v_3)$ и $\hat{y}_{max}(w_1, w_2, w_3)$.

Таблица 2. Планы экспериментального исследования максимумов свойств

№ состава	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

Таблица 3. Числовые значения коэффициентов регрессий (2) и (3)

Члены уравнений регрессии	Числовые значения коэффициентов регрессии для исследуемого свойства композита		
	плотность, кг/м ³	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) на обобщающий показатель \hat{y}_{\max} , отражающий роль дисперсного армирования (w_i), и наоборот, влияния дисперсных волокон (w_i) на тот же обобщающий показатель \hat{y}_{\max} , характеризующий роль полифункционального модифицирования (v_i). Для отображения изменяющихся трехкомпонентных диаграмм «модифицирующие добавки – свойство» и «дисперсные волокна – свойство» целесообразно использовать [37] их дискретный набор на треугольнике «дисперсные волокна – максимум свойства» и «модифицирующие добавки – максимум свойства» соответственно, 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 7 точках-центроидах (3 угла + 3 середины сторон + центр тяжести). В качестве основных информационных элементов для анализа исследуемых свойств были приняты вторичные модели $\hat{y}_{\max(w)}(v)$, представленные на рисунках 1–3. Обозначения и уровни варьирования параметров приведены в таблице 1.

Результаты исследования

Проведенный анализ ЭС-моделей «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – плотность» показал, что увеличение содержания ВМК, а в ещё большей степени добавки Адмикс в общей массе применяемых модификаторов позволило получить цементные композиты с наибольшей плотностью (рис. 1), причем максимальные результаты были достигнуты при равном соотношении ПАН-фибры и МБМ (по 50 %). Напротив, повышение доли микрокремнезема и полипропиленовой фибры приводит к снижению плотности фибробетонов. Самая низкая плотность зафиксирована у цементных композитов, модифицированных добавкой микрокремнезема ($v_1 = 1$) и дисперсно армированных комплексом волокон «ППН+МБМ» при долях фибр, близких к равным ($w_1 = w_3 = 0,5$).

Более высокие значения плотности мелкозернистого бетона, модифицированного гидроизоляционной добавкой «Пенетрон Адмикс» (состоящей, в основном, из монокальциевого алюмината $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, диалюмината кальция $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, полугидрата гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, клинкерных минералов C_3S и C_2A , а также $\text{Ca}(\text{OH})_2$), с нашей точки зрения, можно объяснить следующим образом. При гидратации цемента, а также в результате реакций между компонентами данной добавки и ионными комплексами кальция и алюминия, оксидами и солями металлов, содержащимися в цементном камне, появляются новообразования в виде гидросиликатов кальция тоберморитоподобной структуры, а также гидросульфоалюминатов кальция состава $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ (эттрингит) или $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и гидрокарбоалюминатов кальция состава $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ в незначительных количествах [40]. Данные

Nizina T.A., Balukov A.S. Eksperimentalno-statisticheskie modeli svoystv modificirovannyh dispersno-armirovannyh melkozernistykh betonov [Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 13-25. doi: 10.5862/MCE.62.2

нерастворимые кристаллические новообразования, располагаясь в порах и дефектах цементного камня, уплотняют его структуру.

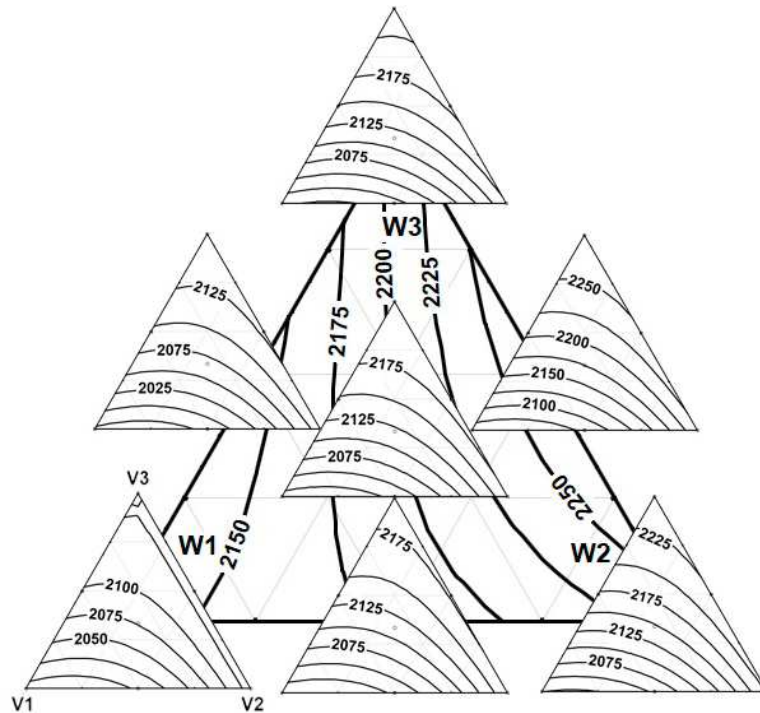


Рисунок 1. Диаграммы «модифицирующие добавки – свойство» и изолинии максимальных значений плотности цементных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на треугольнике «дисперсные волокна – свойство»

По результатам исследования ЭС-моделей «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – предел прочности на растяжение при изгибе» (рис. 2) и «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – предел прочности при сжатии» (рис. 3) установлено, что среди вводимых в состав бетонов активных минеральных добавок высокоактивный метаксаолин оказал наилучшее влияние на исследуемые прочностные характеристики мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов. При применении ПАН-волокна и МБМ повышение содержания ВМК привело к значительному росту предела прочности при сжатии и на растяжение при изгибе; наибольшие результаты были зафиксированы при максимальном количестве метаксаолина ($v_2 = 1$) и следующем содержании данных дисперсных волокон (рис. 2, 3):

а) для предела прочности на растяжение при изгибе – при процентном соотношении фибр, близких к равным, то есть. ($w_2 = w_3 = 0,5$);

б) для предела прочности при сжатии – при максимальном использовании ПАН-фибры ($w_2 = 1$).

Однако, увеличение доли метаксаолина при максимальном содержании ППН ($w_1 = 1$) не приводит к повышению прочностных показателей исследуемых составов (рис. 2, 3); в этом случае более благоприятным для повышения предела прочности на растяжение при изгибе является применение добавки Адмикс и МКУ (рис. 2), а предела прочности при сжатии – комплекса применяемых добавок (МКУ+ВМК+Адмикс) (рис. 3).

Среди других используемых модификаторов для повышения предела прочности на растяжение при изгибе более предпочтительным является совместное использование добавки Адмикс с ПАН-фиброй и МБМ, а МКУ – с ППН и ПАН-волокном, особенно при их равных долях в паре вводимых фибр ($w_2 = w_3 = 0,5$ и $w_1 = w_2 = 0,5$ соответственно) (рис. 2). Для приведенных выше модификаторов (Адмикс, МКУ) зона максимальных значений предела прочности при сжатии зафиксирована при практически равном соотношении фибр, то есть при $w_1 \approx w_2 \approx w_3$ (рис. 3).

По результатам анализа ЭС-моделей «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – свойство» (рис. 1–3) можно сделать вывод о взаимозависимости физико-механических характеристик дисперсно-армированных бетонов с полифункциональными модифицирующими Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2(62). С.13-26.

добавками. Наиболее высокие показатели исследуемых свойств были зафиксированы у составов с метаксаолином, армированных полиакрилонитрильным волокном. Введение же в бетонную смесь микрокремнезема приводило к снижению плотности и прочности цементных композитов, что свидетельствует о негативном влиянии МКУ на процессы структурообразования цементных композитов по сравнению с другими видами применяемых добавок [39, 41].

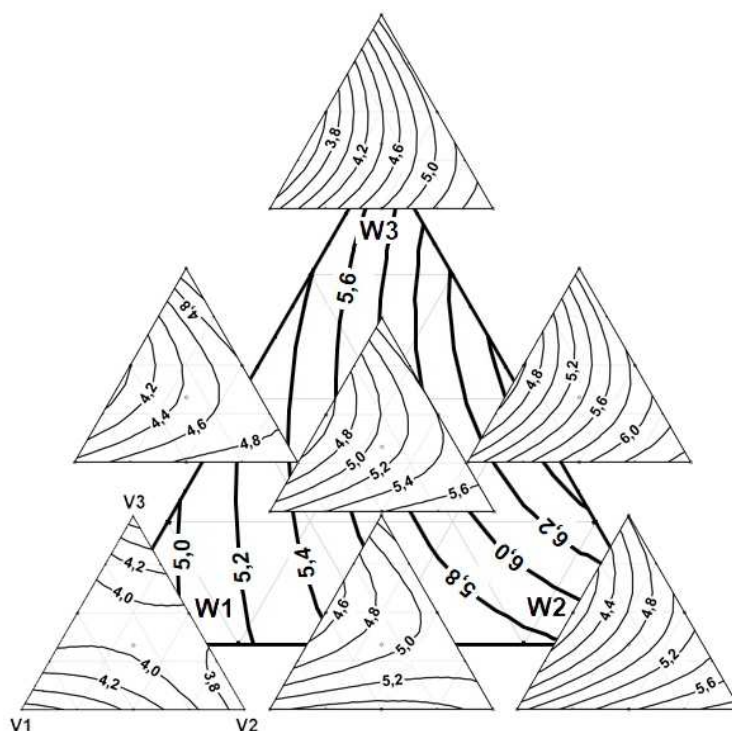


Рисунок 2. Диаграммы «модифицирующие добавки – свойство» и изолинии максимальных значений предела прочности на растяжение при изгибе цементных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на треугольнике «дисперсные волокна – свойство»

При применении тонкодисперсных активных пуццоланических добавок преимущества ВМК по отношению к МКУ, на наш взгляд, объясняются:

1) разной химической природой данных добавок; в отличие от МКУ, ВМК является смесью активного кремнезема и глинозема почти в равных пропорциях, то есть является не силикатным, а алюмосиликатным пуццоланом;

2) большей (в 2.5 раза) пуццоланической активностью метаксаолина, характеризующейся количеством связанной извести (более 1000 мг/г $\text{Ca}(\text{OH})_2$ для ВМК вместо 300... 400 мг/г $\text{Ca}(\text{OH})_2$ для МКУ) за счет взаимодействия SiO_2 со свободным CaO , приводящим к образованию низкоосновных гидросиликатов кальция типа CSH (I); этим и обуславливается меньшая дозировка метаксаолина по сравнению с микрокремнеземом;

3) ускорением протекания реакции ВМК с известью по сравнению с МКУ, что обеспечивает ее надежное связывание в первые сутки твердения;

4) стабильностью свойств ВМК в силу того, что метаксаолин является целевым продуктом, производящимся в условиях полного контроля при дегидратации каолиновой глины (природного гидроалюмосиликата) при температуре 550...900 °С; микрокремнезем же представляет собой отход промышленности, получаемый в процессе газоочистки технологических печей при производстве кремнийсодержащих сплавов и обладает менее стабильными свойствами;

5) более высокой пластичностью и технологичностью бетонных и растворных смесей, отсутствием поверхностной липкости бетона с добавкой ВМК, присущей бетонам с МКУ;

6) меньшим расходом суперпластификаторов в случае использования ВМК по сравнению с МКУ для достижения одинаковой подвижности растворных и бетонных смесей и др.

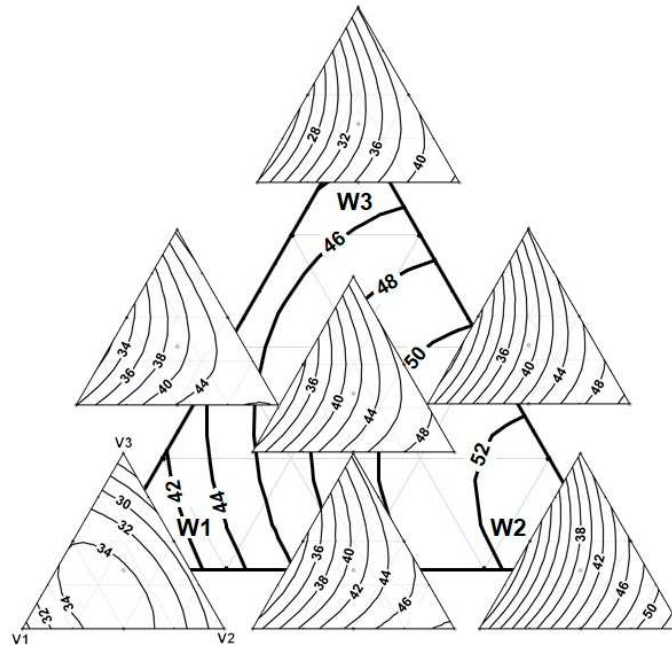


Рисунок 3. Диаграммы «модифицирующие добавки – свойство» и изолинии максимальных значений предела прочности при сжатии цементных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на треугольнике «дисперсные волокна – свойство»

Заключение

В связи с многокомпонентностью современных бетонов для создания материалов различного функционального назначения с высоким комплексом свойств требуется системный подход к выбору исходных компонентов, технологиям изготовления композитов, методам планирования и анализа экспериментальных исследований. Такой подход реализуется путем использования системы критериальных показателей эффективности модифицирующих добавок с целью создания бетонов различного функционального назначения. Немаловажную роль при этом играет и применение информативных многофакторных экспериментально-статистических моделей, позволяющих установить взаимосвязь и количественные соотношения между показателями качества материала, параметрами его структуры, рецептурно-технологическими и эксплуатационными факторами при одновременной минимизации трудозатрат и извлечении максимального количества сведений об изучаемом объекте.

В результате проведенного экспериментального исследования:

1) Разработаны экспериментально-статистические модели плотности и прочностных показателей цементных композитов (рис. 1–3), отражающие влияние модифицирующих добавок (v_i) и дисперсного армирования (w_i) на обобщающий показатель \hat{y}_{\max} ;

2) Построены изолинии, отражающие влияние 6 варьируемых факторов в двухмерном пространстве; полученные графические зависимости представляют собой вторичную модель из 7 треугольных диаграмм Гиббса – Розебома, выполненных с применением программы Statistica 10.0.1011 и фиксируемых в опорных точках несущего треугольника с изолиниями максимумов исследуемых свойств;

3) Из анализа ЭС-моделей изменения физико-механических характеристик дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов выявлены оптимальные комплексы полифункциональных модифицирующих добавок и дисперсного армирования; установлено, что наиболее высокие показатели исследуемых свойств имеют композиты с метакаолином, армированные полиакрилонитрильным волокном; сделан вывод о взаимозависимости исследуемых показателей качества фибробетонов.

Литература

1. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 368 с.

References

1. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony*. [Modified high-quality concretes]. Moscow: Publishing Association of Building universities, 2006. 368 p. (rus)

Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2(62). С.13-26.

2. Баженов Ю.М. Технология бетона. Учебник. М.: Изд-во АСВ, 2007. 528 с.
3. Калашников В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения // *Бетон и железобетон*. 2012. № 1. 82 с.
4. Калашников В.И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 1996. 89 с.
5. Калашников В.И., Иванов И.А. О характере пластифицирования минерально-дисперсных композиций в зависимости от концентрации в них твердой фазы // *Механика и технология композиционных материалов: Тр. II нац. конф.*, 1979. С. 455-458.
6. Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 8 (34). С. 47-53.
7. Белякова В.С., Калашников В.И., Москвин Р.Н., Белякова Е.А. Современные бетоны с использованием каменной муки из песчаников Пензенской области // *Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: материалы IX Международной конференции молодых учёных*. Пенза: ПГУАС, 2014. С. 148-152.
8. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих (повышение прочности и морозостойкости, минимизация расхода ресурсов) // *Современное промышленное и гражданское строительство*. Т. 3, №1. 2007. С. 5-15.
9. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. Киев: Будівельник, 1991. 144 с.
10. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов // *Известия ВУЗов. Строительство и архитектура*. 1985. №8. С. 58-64.
11. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Селяв В.П. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. Ташкент: Фан, 1991. 345 с.
12. Селяв В.П., Низина Т.А., Балбалин А.В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбонатных пластификаторов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. Ч. 2, Вып. 31 (50), Волгоград. 2013. С. 156-163.
13. Schmidt M. Jahre Entwicklung bei Zement, Zusatzmittel und Beton. Ceitzum Baustoffe und Materialprüfung. Schriftenreihe Baustoffe. Fest-schrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Jng. Peter Schiesse. Heft 2. 2003. Pp. 189-198.
14. Bornemann R., Fenling E. Ultrahochfester Beton – Entwicklung und Verhalten. *Leipziger Massivbauseminar*. 2000. Bd. 10. Pp. 1-15.
15. Schmidt M., Bornemann R. Möglichkeiten und Crensen von HochfesterBeton. *Proc. 14. Jbausil*. 2000. Bd. 1. Pp. 1083–1091.
16. Schmidt M. und Fehling E. Ultra-Hochfester Beton. Perspektive fur die Betonfertigteilindustrie. *Beton und Fenigteiltechnik*. 2003. H. 3. Pp. 16-29.
2. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona*. [Technology of concrete]. Textbook. Moscow: Publishing House of the ABU, 2007. 528 p. (rus)
3. Kalashnikov V.I. Kak prevratit betony starogo pokoleniya v vysokoeffektivnyye betony novogo pokoleniya [How to turn the concretes of the old generation in high-performance concretes new generation]. *Concrete and reinforced concrete*. 2012. No. 1. 82 p. (rus)
4. Kalashnikov V.I. *Osnovy plastifitsirovaniya mineralnykh dispersnykh sistem dlya proizvodstva stroitelnykh materialov* [Basics plasticizing mineral dispersed systems for the production of building materials: doctoral theses]. Voronezh, 1996. 89 p. (rus)
5. Kalashnikov V.I., Ivanov I.A. O kharaktere plastifitsirovaniya mineralno-dispersnykh kompozitsiy v zavisimosti ot kontsentratsii v nikh tverdoy fazy [About character of the plasticizing of mineral-dispersed compositions depending on the concentration in them solid phase]. *Mechanics and technology of composite materials: Proc. II nat. conf.* Sofia: Bulgarian Academy of Sciences, 1979. Pp. 455-458. (rus)
6. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuznetsov Yu.S., Volodin V.M., Belyakova Ye.A. Betonov novogo pokoleniya na osnove sukhikh tonkozernisto-poroshkovykh smesey [Next generation concretes on the basis of fine-grained dry powder mixes]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 8 (34). Pp. 47-53. (rus)
7. Belyakova V.S., Kalashnikov V.I., Moskvin R.N., Belyakova Ye.A. Sovremennyye betony s ispolzovaniyem kamennoy muki iz peschanikov Penzenskoy oblasti [Modern concretes with the use of stone flour from sandstones of the Penza region]. *Theory and practice of increasing the efficiency of building materials: materials of the IX International conference of young scientists*. Penza: PSUAC, 2014. Pp. 148-152. (rus)
8. Voznesenskiy V.A., Lyashenko T.V., Dovgan A.D. Kompromissnaya mnogofaktornaya optimizatsiya garantirovannogo kachestva shlakoshchelochnykh vyazhushchikh (povysheniye prochnosti i morozostoykosti, minimizatsiya raskhoda resursov) [Compromise multifactor optimization of guaranteed quality of slag-alkali binders (strength freeze resistance increase, minimization of resource rate)]. *Modern industrial and civil engineering*. Vol. 3, No. 1. 2007. Pp. 5-15. (rus)
9. Solomatov V.I., Vyrovoy V.N., Dorofeyev V.S., Sirenko A.V. *Kompozitsionnyye stroitelnyye materialy i konstruksii ponizhennoy materialoyemkosti* [Composite building materials and constructions of decreased material consumption]. Kiev: Budivelnik, 1991. 144 p. (rus)
10. Solomatov V.I. Razvitiye polistrukturnoy teorii kompozitsionnykh stroitelnykh materialov [Development of the polystructural theory of composite building materials]. *Proceedings of higher educational institutions. Building and architecture*, 1985. No. 8. Pp. 58-64. (rus)
11. Solomatov V.I., Vyrovoy V.N., Selyav V.P. *Polistrukturnaya teoriya kompozitsionnykh stroitelnykh materialov* [Polystructural theory of composite building materials]. Tashkent: Fan, 1991. 345 p. (rus)
12. Selyayev V.P., Nizina T.A., Balbalin A.V. Mnogofunktsionalnyye modifikatory tsementnykh kompozitov na osnove mineralnykh dobavok i polikarboksilatnykh plastifikatorov [Multifunctional modifiers of cement composites based on mineral admixtures and polycarboxylate plasticizers]. *Bulletin of Volgograd state University of architecture and construction*. Series: Construction and architecture. Vol. 2, No. 31 (50), Volgograd. 2013. Pp. 156-163. (rus)
13. Schmidt M. Jahre Entwicklung bei Zement, Zusatzmittel und Beton. Ceitzum Baustoffe und Materialprüfung. Schriftenreihe Baustoffe. Fest-schrift zum 60. Geburgstag von Prof. Dr.-Jng. Peter Schiesse. Heft 2. 2003. Pp. 189-198.

Nizina T.A., Balukov A.S. Eksperimentalno-statisticheskie modeli svoystv modificirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 13-25. doi: 10.5862/MCE.62.2

17. Kleingelhöfer P. Neue Betonverflüssiger auf Basis Policarboxilat. *Proc. 13. Jbausil*. Weimar. 1997. Bd. 1. Pp. 491-495.
18. Grube P., Lemmer C., Rühl M. Vom Gussbeton zum Selbstverdichtenden. *Beton*. Pp. 243-249.
19. Frank D., Friedemann K., Schmidt D. Optimierung der Mischung sowie Verifizierung der Eigenschaften Sauerresistente Hochleistungbetone. *Betonwerk+Fertigteil-Technik*. 2003. No. 3. Pp. 30-38.
20. Richard P., Cheyrezy M. Composition of Reactive Powder Concrete. Scientific Division Bouygues. *Cement and Concrete Research*. Vol. 25. No. 7. 1995. Pp. 1501-1511.
21. Brameshuber W., Schubert P. Neue Entwicklungen bei Beton und Mauerwerk. *Öster. Ingenieur-und Architekten-Zeitschrift*. 2003. Pp. 199-220.
22. Kordms S. Selbstverdichtender Beton in Beitrage zum 41. *Forschungskolloquium des DafStb*; 3. Marz. 2003.
23. Бабаев Ш.Т., Комар А.А. Энергосберегающая технология железобетонных конструкций из высокопрочного бетона с химическими добавками. М.: Стройиздат, 1987. 240 с.
24. Баженов Ю.М. Бетоны XXI века // Ресурсо- и энергосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Международной конференции. Белгород, 1995. С. 3-5.
25. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М.: Стройиздат, 1998. 768 с.
26. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. №10. С. 4-6.
27. Калашников В.И. Порошковые высокопрочные дисперсно-армированные бетоны нового поколения // Популярное бетоноведение. 2008. №6. С. 5-7.
28. Калашников В.И. Основные принципы создания высокопрочных и особовысокопрочных бетонов // Популярное бетоноведение. 2008. №3. С. 102-107.
29. Технологический регламент на проектирование и выполнение работ по гидроизоляции и антикоррозионной защите монолитных и сборных бетонных и железобетонных конструкций. 2-е изд., перераб. и доп. М.: СРО «РСПППГ», 2008. 64 с.
30. Симакина Г.Н. Высокопрочный дисперсно-армированный бетон: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2006. 161 с.
31. Боровских И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2009. 168 с.
32. Селяев В.П., Куприяшклина Л.И., Неверов В.А., Селяев П.В. Фрактальные модели разрушения бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2015. №1. С. 11-22.
33. Рабинович Ф.Н. Об уровнях дисперсного армирования бетонов // Известия Вузов. Строительство. 1981. №11. С. 30-36.
34. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Повышение трещиностойкости цементного бетона при многоуровневом дисперсном армировании его структуры // Современные проблемы строительного материаловедения: седьмые академические чтения РААСН. Белгород, 2001. С. 587-598.
35. Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // Нанотехнологии в строительстве. 2012. №3. С. 6-21.
36. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологий // Инженерно-строительный журнал. 2009. №6. С. 25-33.
14. Bornemann R., Fenling E. Ultrahochfester Beton – Entwicklung und Verhalten. *Leipziger Massivbauseminar*. 2000. Bd. 10. Pp. 1-15.
15. Schmidt M., Bornemann R. Möglichkeiten und Crensen von HochfesterBeton. *Proc. 14. Jbausil*. 2000. Bd. 1. Pp. 1083–1091.
16. Schmidt M. und Fehling E. Ultra-Hochfester Beton. Perspektive für die Betonfertigteilindustrie. *Beton und Fertigteiltechnik*. 2003. H. 3. Pp. 16-29.
17. Kleingelhöfer P. Neue Betonverflüssiger auf Basis Policarboxilat. *Proc. 13. Jbausil*. Weimar. 1997. Bd. 1. Pp. 491-495.
18. Grube P., Lemmer C., Rühl M. Vom Gussbeton zum Selbstverdichtenden. *Beton*. Pp. 243-249.
19. Frank D., Friedemann K., Schmidt D. Optimierung der Mischung sowie Verifizierung der Eigenschaften Sauerresistente Hochleistungbetone. *Betonwerk+Fertigteil-Technik*. 2003. No. 3. Pp. 30-38.
20. Richard P., Cheyrezy M. Composition of Reactive Powder Concrete. Scientific Division Bouygues. *Cement and Concrete Research*. Vol. 25. No. 7. 1995. Pp. 1501-1511.
21. Brameshuber W., Schubert P. Neue Entwicklungen bei Beton und Mauerwerk. *Öster. Ingenieur-und Architekten-Zeitschrift*. 2003. Pp. 199-220.
22. Kordms S. Selbstverdichtender Beton in Beitrage zum 41. *Forschungskolloquium des DafStb*; 3. Marz. 2003.
23. Babayev Sh.T., Komar A.A. *Energoberegayushchaya tekhnologiya zhelezobetonnykh konstruksiy iz vysokoprochnogo betona s khimicheskimi dobavkami* [Energy saving technology of reinforced concrete structures from high-strength concrete with chemical admixtures]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 240 p. (rus)
24. Bazhenov Yu.M. Betony XXI veka [Concretes of XXI Century]. *Resource and energy saving technologies of building materials, products and constructions: proceedings of the International conference*. Belgorod, 1995. Pp. 3-5. (rus)
25. Batrakov V.G. *Modifitsirovannyye betony* [Modified concretes]. Moscow: Stroyizdat, 1998. 768 p. (rus)
26. Kalashnikov V.I. Raschet sostavov vysokoprochnykh samouplotnyayushchikhsya betonov [Calculation of composition of high-strength self-compacting concretes]. *Building materials*. 2008. No. 10. Pp. 4-6. (rus)
27. Kalashnikov V.I. Poroshkovyye vysokoprochnyye dispersno-armirovannyye betony novogo pokoleniya [High-strength powder fiber-reinforced concretes of new generation]. *Popular Concrete Science*. 2008. No. 6. Pp. 5-7. (rus)
28. Kalashnikov V.I. Osnovnyye printsipy sozdaniya vysokoprochnykh i osobovysokoprochnykh betonov [Main principles of production of high- and the highest-strength concretes]. *Popular Concrete Science*. 2008. No. 3. Pp. 102-107. (rus)
29. *Tekhnologicheskyy reglament na proyektirovaniye i vypolneniye rabot po gidrozolyatsii i antikorrozionnoy zashchite monolitnykh i sbornykh betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy* [Technological regulation for design and execution of works on waterproofing and corrosion protection of monolithic and precast concrete and reinforced concrete structures]. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow: Self-regulating organization "Russian Union of manufacturers and suppliers of penetrating waterproofing", 2008. 64 p. (rus)
30. Simakina G.N. Vysokoprochnyy dispersno-armirovannyy beton: dis. ... kand. tekhn. nauk [High-strength fiber-reinforced concrete: dis. ... Cand. techn. Sciences]. Penza, 2006. 161 p. (rus)
31. Borovskikh I.V. Vysokoprochnyy tonkozernistyy bazaltfibrobeton: dis. ... kand. tekhn. nauk [High-strength fine-grained basalt fibre concrete: dis. ... Cand. techn. Sciences]. Kazan, 2009. 168 p. (rus)
32. Selyayev V.P., Kupriyashkina L.I., Neverov V.A., Selyayev P.V. *Fraktalnyye modeli razrusheniya betonov* [Fractal

Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2(62). С.13-26.

37. Ляшенко Т.В. Оптимизация наполнителей полиэфирных связующих на основе моделей нового класса: дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1984. 236 с.
38. 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.
39. Низина Т.А., Балыков А.С. Анализ комплексного влияния модифицирующих добавок и дисперсного армирования на физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2015. №4. С. 25-33.
40. Капустин Ф.Л., Спиридонова А.М., Метелева Л.Е. Отчет о НИР «Состав продуктов твердения цементного камня до и после нанесения проникающей капиллярной смеси «Пенетрон». Екатеринбург: ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2010. 43 с.
41. Низина Т.А., Балбалин А.В. Влияние минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики цементных композитов // Вестник ТГАСУ. 2012. №2. С. 148-153.
- models of destruction of concretes]. *Regional architecture and construction*. 2015. No. 1. Pp. 11-22. (rus)
33. Rabinovich F.N. Ob urovnyakh dispersnogo armirovaniya betonov [About levels of particulate reinforcement of concretes]. *Proceedings of higher educational institutions. Building*. 1981. No. 11. Pp. 30-36. (rus)
34. Chernyshov Ye.M., Korotkikh D.N. Povysheniye treshchinostoykosti tsementnogo betona pri mnogourovnevnom dispersnom armirovanii yego struktury [Increasing the crack resistance of cement concrete in multilevel disperse reinforcement of its structure]. *Modern problems of building materials: seventh academic reading of RAABS*. Belgorod, 2001. Pp. 587-598. (rus)
35. Figozskiy O.L., Beylin D.A., Ponomarev A.N. Uspekhi primeneniya nanotekhnologii v stroitelnykh materialakh [Successful implementation of nanotechnologies in building materials]. *Nanotechnologies in construction*. 2012. No. 3. Pp. 6-21. (rus)
36. Ponomarev A.N. Vysokokachestvennyye betony. Analiz vozmozhnostey i praktika ispolzovaniya metodov nanotekhnologii [High-quality concretes. Analysis of the opportunities and the practice of using nanotechnology methods]. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No 6. Pp. 25-33. (rus)
37. Lyashenko T.V. Optimizatsiya napolniteley poliefirnykh svyazuyushchikh na osnove modeley novogo klassa: dis. ... kand. tekhn. nauk [Optimization of fillers polyester connectives on the basis of models of new class: dis. ... Cand. techn. Sciences]. Odessa, 1984. 236 p. (rus)
38. Koval S. Optimizatsiya reologicheskikh parametrov matritsy samouplotnyayushchegosya betona s ispolzovaniyem modeley «smes – tekhnologiya – svoystva» [Optimization of the rheological parameters of matrix of self-compacting concrete with the use of models «mixture – technology – properties»]. *Bulletin of the National Technical University «KhPI»: Collection of scientific works. Thematic issue «Chemistry, chemical technology and ecology»*. Kharkiv: National Technical University «KhPI», 2011. No. 59. Pp. 86-92. (rus)
39. Nizina T.A., Balykov A.S. Analiz kompleksnogo vliyaniya modifitsiruyushchikh dobavok i dispersnogo armirovaniya na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki melkozernistykh betonov [Analysis of the combined effect of the modifier additives and particulate reinforcement on the physico-mechanical characteristics of fine-grained concretes]. *Regional architecture and construction*. 2015. No. 4. Pp. 25-33. (rus)
40. Kapustin F.L., Spiridonova A.M., Meteleva L.Ye. *Otchet o NIR «Sostav produktov tverdeniya tsementnogo kamnya do i posle naneseniya pronikayushchey kapillyarnoy smesi «Penetron»* [Report on research work "Composition of the products of hardening cement paste before and after the application of mixture of penetrating the capillary «Penetron»]. Yekaterinburg: SEE HPE «Ural State Technical University – UPI named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», 2010. 43 p. (rus)
41. Nizina T.A., Balbalin A.V. Vliyaniye mineralnykh dobavok na reologicheskkiye i prochnostnyye kharakteristiki tsementnykh kompozitov [Influence of mineral additives on the rheological and strength characteristics of cement composites]. *Bulletin of the Tomsk state University of architecture and construction*. 2012. No. 2. Pp. 148-153. (rus)

Татьяна Анатольевна Низина,
+7(917)9936389; эл. почта: nizinata@yandex.ru
Артёмий Сергеевич Балыков,
+7(927)183-28-82; эл. почта:
artbalrun@yandex.ru

Tatyana Nizina,
+7(917)9936389; nizinata@yandex.ru
Artemy Balykov,
+7(927)183-28-82; artbalrun@yandex.ru

© Низина Т.А., Балыков А.С., 2016

Nizina T.A., Balukov A.S. Eksperimentalno-statisticheskie modeli svoystv modifitsirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 13-25. doi: 10.5862/MCE.62.2