

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ

**С.Коваль** (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г.Одесса)

Проанализирована проблема поиска оптимальных модификаторов качества бетона и предложен комплексный научный подход к ее решению на основе многофакторного моделирования технологических ситуаций применения добавок.

*Описание проблемной ситуации и постановка проблемы исследований.* Магистральным направлением, определяющим прогресс бетона на современном этапе, является использование полифункциональных добавок – модификаторов, что позволяет решать сложные технологические задачи управления комплексом свойств смеси и бетона. Создание полифункциональных модификаторов на базе высокотехнологичных компонентов (суперпластификаторов-СП, ультрадисперсных материалов и др.) явилось предпосылкой для разработки высокофункциональных, высококачественных бетонов (НРС-High Performance Concrete), имеющих принципиально новый уровень свойств по отношению к традиционному. Эффективность модифицирования бетона определяется выбором рационального состава добавок и их условий применения, с учетом совместимости с применяемыми цементами, за счет подбора рациональных добавок в составе единого комплекса, что позволяет усилить достигаемые эффекты и т.д.

В основе методов управления свойствами бетона лежит теоретическое знание о его структуре и свойствах. Благодаря исследованиям в области химии и гидратации цемента, физико-химической механики выявлены определяющие параметры микро и макро структур, разработаны пути оптимизации физико-химических процессов структурообразования. Продолжающееся развитие теоретической базы модифицированного бетона идет в направлении углубления представлений о механизме действия добавок (вплоть до атомно-молекулярного уровня структуры), выявлении закономерностей структурообразования и деструкции цементных систем, разработки подходов и критериев для прогнозирования поведения добавок.

Однако, несмотря на успехи в создании теоретической базы и накопленный практический опыт использования добавок, проблема

модифицирования бетона является актуальной для строительного материаловедения и технологии. К причинам ее усложнения можно отнести:

- множественность критериев оценки модифицированных бетонов, что приводит к необходимости принятия компромиссных решений;

- многокомпонентность рецептуры добавок, что ведет к необходимости учета как индивидуального, так и совместного влияния компонентов;

- комплексный характер процессов модификации, что затрудняет анализ воздействий добавок исходя из теоретических положений и т.д.

При этом, как отмечают ведущие специалисты, многие важные аспекты действия индивидуальных добавок до настоящего времени неизвестны, а существующий уровень исследований не позволяет выразить их эффект в строгой аналитической форме для количественного прогнозирования тех или иных характеристик цементных систем. Следовательно, получение оптимальных результатов, наиболее соответствующих реальным технологическим задачам комплексной модификации, не представляется возможным без количественного анализа взаимосвязи между характеристиками добавок (вид, состав, концентрация и т.д.) и функциональными свойствами бетона.

Из общего множества феноменологических моделей, составляющих теоретическую базу строительного материаловедения, с позиций решения конкретных инженерных задач наиболее эффективными являются экспериментально-статистические модели (ЭС-модели), количественно связывающие параметры состава и технологии с показателями свойств материалов. Развитие методологии ЭС-моделирования, как составной части компьютерного материаловедения, открывает новые возможности исследования, проектирования и оптимизации модифицированных бетонов.

*Цель исследований* - повышение эффективности бетона за счет выбора рациональных решений по управлению его структурой и свойствами на основе комплексного научного подхода, реализующего теоретическое знание закономерностей структурообразования модифицированных цементных систем и многофакторное моделирование воздействий добавок в конкретных рецептурно-технологических ситуациях.

*Объект исследований* -цементный бетон, модифицированный полифункциональными добавками с целью обеспечения заданного комплекса его свойств и долговечности. *Предмет исследований* -количественные зависимости, описывающие взаимосвязь между многокомпонентным составом добавок и показателями качества и надежности бетона.

*Методический подход и результаты исследования.* Получение содержательных результатов в задачах оптимизации модификаторов определяется соответствующей технологией их исследования, которая

обеспечивает согласованность различных этапов — от выработки содержательных физико-химических гипотез и их математической формализации до выявления эффективной инженерной информации, а в ряде случаев, и нового материаловедческого знания. Схема на рис.1 показывает место и роль ЭС-моделей в задачах анализа и оптимизации модификаторов качества бетона.

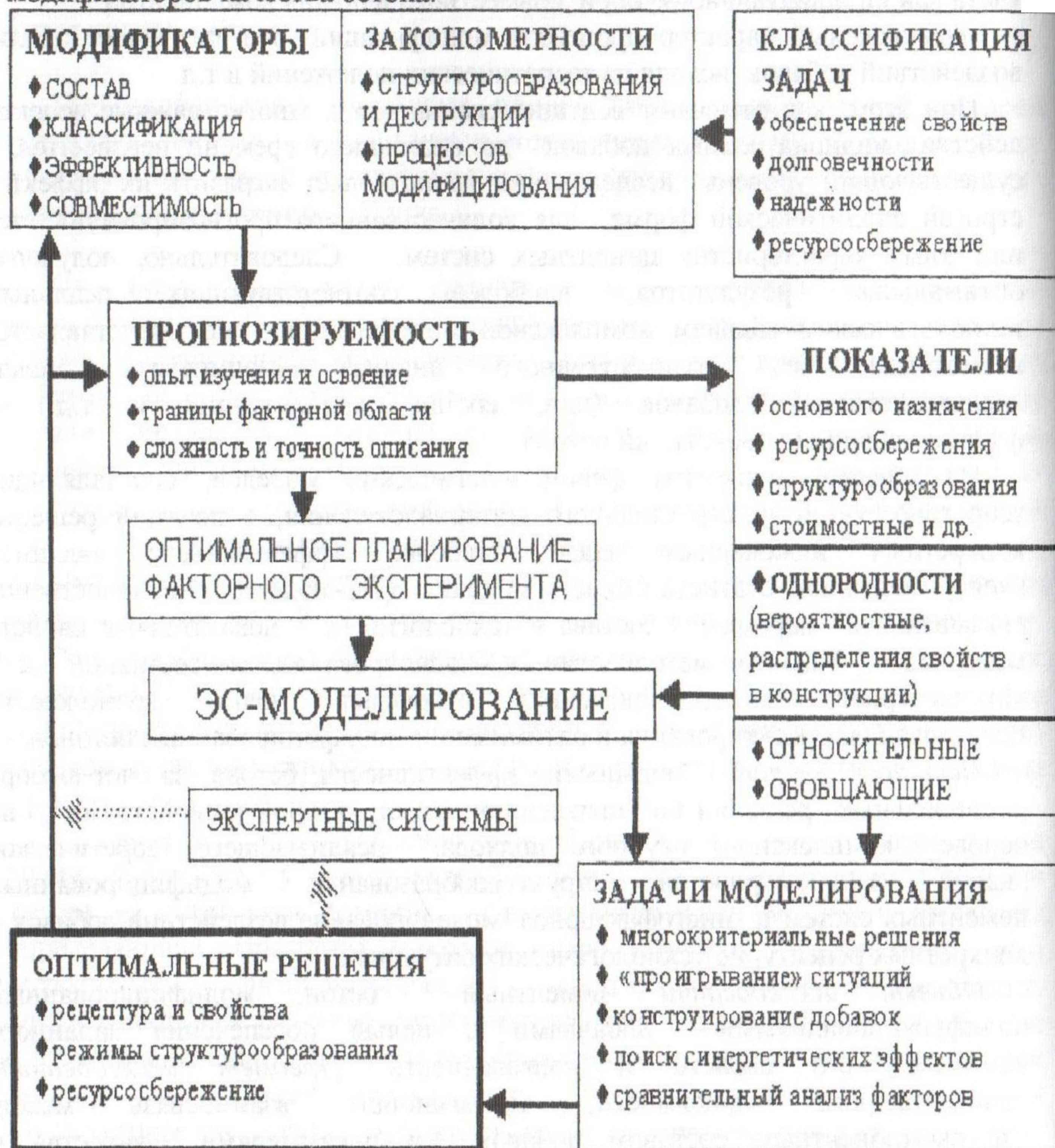


Рис.1. Схема использования экспериментально-статистических моделей в задачах анализа и оптимизации модифицированных материалов. Эффективность моделирования обеспечивается блоком «прогнозируемости добавок», который формируется по принципу полноты и

достоверности априорной информации; он используется для выбора критериев оценки и отбора факторов, определяющих условия модификации, для определения центра эксперимента и границ факторного пространства, для предвидения характера поверхностей отклика и возможных эффектов взаимодействий.

Одним из важных элементов этого блока является классификация, разделяющая добавки по степени их изученности и освоения [1]. Ряд добавок настолько хорошо изучен традиционными методами, что получение в дополнительных исследованиях принципиально новой научной информации или еще более лучшей «привязки» их к конкретной технологии практически не зависит от методологической основы дополнительных исследований.

Моделируемые критерии качества - показатели основного назначения, технологические, эксплуатационные и др. относятся к разным этапам существования материала и выступают либо в роли собственно критерия оптимальности бетона, либо как ограничения области допустимых решений в многофакторном пространстве параметров его рецептуры и технологии.

Наиболее полезная для объяснения достигаемых эффектов информация выявляется при оценке взаимосвязи технологических эффектов, параметров структуры и физико-химических процессов (величина адсорбции, степень гидратации, характеристики порообразования и т.д.).

По полученным ЭСМ решается комплекс оптимизационных задач: исследуются зависимости влияния факторов, рассчитываются оптимальные дозировки, анализируются условия изменения свойства  $Y_i$  при фиксации на постоянном уровне свойства  $Y_j$  (изопараметрический анализ), оценивается возможная экономии ресурса  $R$  при  $Y = \text{const}$  и др., принимаются компромиссные решения по группе свойств [2-10]. Важными элементами оценки интенсивности модифицирующих воздействий являются обобщающие показатели полей свойств - перепадов и градиентов, а также экстремальных точек - минимальных и максимальных значений показателей качества в исследуемом факторном пространстве [3].

Так как результат модифицирования зависит не только от состава добавок, но и во многом может изменяться в конкретных условиях получения бетона, оценка эффективности добавок ведется при одновременном изменении уровней группы факторов включенных в эксперимент (рецептурных, технологических, эксплуатационных), т.е. на некотором «множестве технологических ситуаций» [3]. В ходе анализа многофакторных ЭСМ определяются такие области рецептурно-технологического пространства, в которых та или иная добавка обеспечивает заданные показатели качества, наиболее эффективна по одному или группе параметров, а также по относительным показателям - приростам свойств

$\Delta Y = Y_d - Y_0$ , по отношению к моделируемому эталону ( $Y_0$  - бетон без добавок, бетон с эталонной добавкой). Методики сравнения реализованы в НИИЖБ при оценке эффективности суперпластификатора С-3 в бетоне на цементях со сменяемыми минеральными добавками, при определении областей применения вновь синтезированных СП т.н. «нового поколения», а также адаптации добавок зарубежных фирм к условиям производителей бетона в Украине [5].

*Совместимость* составляющих многокомпонентных добавок учитывается в полиномиальных моделях коэффициентами взаимодействий высоких порядков, а также специальными блоками структурированных моделей типа «смесь-технология-свойства» [3], отражающими влияние дисперсности и состава минеральных компонентов, их взаимодействия с добавками иных типов.

Построение специального критерия  $K_s$  *синергетической активности* совмещаемых добавок предусматривает количественную оценку «веса» каждого из компонентов в формировании свойства (прирост  $\Delta Y = Y_d - Y_0$ ), суммирование этих весов ( $K_{ad} = \sum \Delta Y$  - аддитивный эффект), сравнение полученного в эксперименте эффекта  $K_f$  для комплексной добавки с расчетным аддитивным эффектом ( $K_s = K_f - K_{ad}$ ) [6]. В результате анализа ЭСМ выявлены аддитивные, а в ряде случаев и синергетические эффекты для смесей микрокремнеземов в органоминеральном комплексе [5], в системах ряда многокомпонентных добавок [6], установлены возможности инициирования этих эффектов при управлении параметрами тепловой обработки бетона [7] и в условиях механохимической активации цемента [8].

Повышение *надежности* бетона (обеспеченности свойств, долговечности, снижения риска отказа) основывается на информации о влиянии добавок не только на средние оценки свойств, а и на характеристики распределения этих свойств [3, 9-11].

В комплекс показателей входят числовые характеристики распределений (параметрические - дисперсии, коэффициенты вариации и асимметрии и т.п.; непараметрические - квантили, размахи, и т.д.; их производные и обобщающие показатели свойств). Так как информация о законах распределения в большинстве случаев отсутствует, для принятия решений используются вероятностные показатели  $Y_\alpha$ , определяемые по результатам многократно повторяемых физических экспериментов или с использованием методов компьютерной статистики при генерировании оценок свойств [9-10].

Установлены факты влияния добавок на вариацию реологических, структурно-механических и эксплуатационных характеристик цементных материалов, показаны возможности повышения стабильности этих свойств при использовании определенных комбинаций добавок [9]. Вышеизложенный

подход, позволяющий уменьшить отказы рецептурной системы и обеспечить получение гарантированных свойств материалов, реализован, в частности, при создании фиброармированных транспортных конструкций, разработке ремонтных растворов [11] и бетонов, эксплуатирующихся в агрессивной среде [10].

При обеспечении *однородности* бетона в конструкции эффективность добавок характеризуют не только параметры расщепляемости смесей, но и показатели однородности пространственно-геометрического поля свойств - критерии, основанные на оценке статистических распределений, анализе эшюры свойств, при разделении систематической и случайной составляющей этого поля [12].

При оценке влияния комплексных пластифицирующе-стабилизирующих добавок на однородность бетона из высокоподвижных и литых смесей в вертикально формуемых элементах установлено, что рациональное соотношение между ингредиентами зависит от вида заполнителя в бетоне (плотный или пористый), от способа бетонирования конструкций (обычного или подводного), от причин, вызывающих опасность появления неоднородности (случайных или систематических) [12,13]. При совмещении добавок оптимального состава с рациональными заполнителями (в частности, по гранулометрии) достигается практически полная однородность свойств бетона или нивелируется влияние «плохих» заполнителей.

Для оптимизации составов модифицированных бетонов специального назначения проводятся специальные опыты для получения ЭСМ, так как экспериментальные затраты на реализацию планов оправданы необходимостью обеспечения повышенной надежности принимаемых решений. В случае оптимизации бетонов общестроительного назначения используются информационные возможности накопленных ЭСМ с целью создания *экспертных систем*, позволяющих учитывать конкретные технико-экономические условия изготовления бетона [14].

### Литература

1. Вознесенский В.А., Коваль С.В. Системология и компьютерный поиск оптимальных модификаторов качества композитов. - Киев: «Знание», 1993. - 18 с.
2. Современные методы оптимизации композиционных материалов / Под ред. В.А.Вознесенского. - Киев: Будівельник, 1983. - 144 с.
3. Ляшенко Т.В. Поля свойств строительных материалов (концепция, анализ, оптимизация) // Прогнозирование в материаловедении: Мат-лы 41 межд. сем. - Одесса: Астропринт. - 2002. - С.9-14
4. Kowal S. The Comparative Analysis of the Additives at Obtaining of High-Strength Concrete // Sump. High Strength/High Performance Concrete, -Leipzig, 2002 p.

5. Kowal S. Zur Auswahl optimaler Rezepturen bei der Steuerung rheologischer Eigenschaften von Morteln // 13 Int. Baustofftagung (Ibausil). -Band 2. - Weimar: Bauhaus-Universität. - 1997. - S.489-494.
6. Коваль С.В. Компьютерный анализ синергетических эффектов в системе модифицированного композита // Композиційні матеріали для будівництва. – Макіївка: ДонДАБА, 2000. – С.8-11.
- A. Usharov-Marshak, S. Koval, T. Babayevskaya. Concretes on the basis of portland cement, modified by chemical admixtures //15 Int. Baustofftagung (Ibausil). - Weimar: Bauhaus-Universität. - 2003.
7. Коваль С.В. Анализ синергетических взаимодействий в системе комплексной добавки под влиянием технологических факторов // Моделирование и оптимизация в материаловедении. -Одесса: Астропринт, 2001.-С.58-60.
8. Экспериментально-статистическое моделирование и оптимизация вероятностных показателей качества строительных композитов /В.А.Вознесенский, С.В.Коваль, Т.В.Ляшенко, В.А.Феофанов. -Киев: «Знание», 1991. -24 с.
9. Коваль С.В., Феофанов В.А. Моделирование и управление процессами деструкции композиционных материалов.-Киев: «Знание», 1988. -16 с
10. Коваль С.В. Трансформация распределений свойств цементных композитов под влиянием добавок //Вестник ОГАСА, №9. 2003. С.21-30.
11. The Application of Experimental Statistical Models to Multicriterion Desing of Claidite Concrete / V.Voznesensky, S.Koval, T.Liashenko, V.Kushneruk // Structural Lighveight Aggregate Concrete: Proc.Int.Symp. –Oslo, 1995, -S.260-272.
12. Коваль С.В. Компьютерный анализ эффективности управления однородностью пространственных полей свойств бетона с помощью полифункциональных модификаторов// Науковий вісник будівництва . Харків, ХДТУБА, №8.- 1999. с.36-42
13. Коваль С.В., Савченко С.В. Версия компьютерной системы выбора добавок для изготовления модифицированного бетона // Моделирование и оптимизация в материаловедении.- Одесса: Астропринт, 2003.-С.60.