



## КОМПРОМІСНА БАГАТОФАКТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ ГАРАНТОВАНОЇ ЯКОСТІ ШЛАКОЛУЖНИХ В'ЯЖУЧИХ (ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ І МОРОЗОСТІЙКОСТІ, МІНІМІЗАЦІЯ ВИТРАТИ РЕСУРСІВ)

**В. А. Вознесенський, Т. В. Ляшенко, О. Д. Довгань**

*Одеська державна академія будівництва та архітектури,*

*вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029.*

*E-mail: frabu@paso.net*

*Отримана 7 лютого 2007; прийнята 22 лютого 2007.*

**Анотація.** Розглянуто дослідження шлаколужних композицій, в якому по оптимальному плану експерименту варіювалося вісім факторів. П'ять факторів складу-дозування цеоліту, сульфату натрію, цементу, пластифікатора, а також питома поверхня в'язучого. Три інших фактора визначають умови термічної обробки — тривалість попередньої та ізотермічної витримки та температуру. В експерименті визначені міцність, морозостійкість і коефіцієнт стійкості у розчині сульфата натрію. За даними, отриманими для 54 комбінацій складів і режимів ТВО, побудовані нелінійні експериментально-статистичні моделі, що описують поля трьох властивостей у 8 рецептурно-технологічних координатах. З використанням моделей та методу Монте-Карло для ітераційного сканування полів властивостей, визначені: по-перше, склади та режими, що максимізують гарантований рівень якості в'язучого, по-друге, мінімальні ресурси, що гарантують необхідний рівень якості. Метод дозволяє знаходити компромісні рішення в комбінованих оптимізаційних задачах, коли набір критеріїв оптимальності включає і властивості, і фактори, що їх визначають.

**Ключові слова:** в'язуча система "шлак-цеоліт- $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -портландцемент", поле властивості, міцність, довговічність, компроміс, метод Монте-Карло.

## КОМПРОМИССНАЯ МНОГОФАКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ГАРАНТИРОВАННОГО КАЧЕСТВА ШЛАКОЩЕЛОЧНЫХ ВЯЖУЩИХ (ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И МОРОЗОСТОЙКОСТИ, МИНИМИЗАЦИЯ РАСХОДА РЕСУРСОВ)

**В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, А. Д. Довгань**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,*

*ул. Дидрихсона, 4, г. Одесса, Украина, 65029.*

*E-mail: frabu@paso.net*

*Получена 7 февраля 2007; принята 22 февраля 2007.*

**Аннотация.** Рассматривается исследование шлакощелочных композиций, в котором по оптимальному плану эксперимента варьировались восемь факторов. Пять факторов состава-дозировки цеолита, сульфата натрия, цемента, пластификатора, а также удельная поверхность вяжущего. Три других фактора назначают условия тепловой обработки — продолжительность предварительной и изотермической выдержки и температуру. В эксперименте определены прочность, морозостойкость и коэффициент стойкости в растворе сульфата натрия. По данным, полученным для 54 комбинаций составов и

режимов ТВО, построены нелинейные экспериментально-статистические модели, описывающие поля трех свойств в 8 рецептурно-технологических координатах. С использованием моделей и метода Монте-Карло для итерационного сканирования полей свойств, определены: во-первых, составы и режимы, которые максимизируют гарантированный уровень качества вяжущего, во-вторых, минимальные ресурсы, гарантирующие требуемый уровень качества. Метод позволяет находить компромиссные решения в комбинированных оптимизационных задачах, когда набор критериев оптимальности включает и свойства, и определяющие их факторы.

**Ключевые слова:** вяжущая система "шлак–цеолит– $\text{Na}_2\text{SO}_4$ –портландцемент", поле свойства, прочность, долговечность, компромисс, метод Монте-Карло.

## A COMPROMISE MULTIFACTOR OPTIMIZATION OF A GUARANTEED QUALITY OF SLAG-ALKALI BINDERS (STRENGTH FREEZE RESISTANCE INCREASE, MINIMIZATION OF RESOURCE RATE)

V. A. Voznecensky, T. V. Lyashenko, A. D. Dovgan'

*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architectur,  
4, Didrikhson str., 65029 Odesa, Ukraine.*

*Reicieved 7 February 2007, accepted 22 February 2007.*

**Abstract.** There is considered an investigation of slag-alkali compositions in which by an experiment optimal plan eight factors varied. Five factors of the composition are zeolite dosage, sodium sulfate, cement, plasticizer, and a binder specific surface. Three other factors specify the conditions of heat treatment - durability of a preliminary and isothermal holding and temperature. In the experiment there were determined strength, freeze resistance and resistance coefficient in the solution of sodium sulfate. By the data obtained for 54 combinations and TVO modes there were plotted non-linear experimental-statistical models describing the fields of three properties in 8 prescribed-technological coordinates. Using Monte-Carlo models and method for iterative scanning of property fields, there were determined, first, compositions and modes that maximize a guarantee level of a binder quality; second, minimal resources guaranteeing a required level of quality. The method makes it possible to find compromise solutions in combined optimization tasks when the set of optimality criteria include both the properties and the factors determining them.

**Keywords:** a bunding system "slag–zeolite– $\text{Na}_2\text{SO}_4$ –Portland cement", field of properties, strength, durability, compromise, Monte-Carlo method.

## Введение

При разработке (исследовании, модификации...) эффективных материалов приходится преодолевать трудности, порожденные “проклятием размерности”. С одной стороны, увеличение многокомпонентности составов — одно из магистральных направлений обеспечения качества строительных материалов [1] при существенном росте общего числа рецептурно-технологических факторов (РТ-факторов). С другой — должны быть гарантированы (с определенным риском  $\alpha$ ) уровни большого числа технологических и эксплуатационных свойств материала, включая критерии экологии и ресурсосбережения. Нетривиальные продуктивные решения можно получить при комплексной реализации рациональных (и по теоретическим предпосылкам, и по исполнению) физических и вычислительных экспериментов.

Многокомпонентность и мультикритериальность характерны для шлакощелочных вяжущих и бетонов. Поэтому накоплен достаточно обширный опыт построения и использования различных экспериментально-статистических (ЭС) моделей для этого класса материалов, в значительной степени обобщенный в специализированных “Методических рекомендациях” [2].

С целью поиска оптимального компромиссного рецептурно-технологического решения для вяжущей системы “гранулированный доменный шлак–цеолит–сульфат натрия–портландцемент”, разработанной и исследуемой в НИИ вяжущих материалов им. В. Д. Глуховского (П. В. Кривенко, Ж. В. Скурчинская, А. П. Семенюк [3]), применены разработанные в последнее десятилетие методы компьютерного строительного материаловедения [1], в частности, итерационное случайное сканирование полей свойств материала.

## Условия эксперимента и моделирование

На одном из этапов экспериментального исследования системы изучалось влияние восьми рецептурно-технологических факторов на предел прочности при сжатии после 28 суток твердения ( $R$ , МПа), морозостойкость ( $F$ , цикл) и коэффициент стойкости после экспозиции в

растворе сульфата натрия ( $K$ ). Факторы  $X_i$ , варьируемые в диапазонах  $X_{i0} \pm \Delta X_i$ , образуют три группы:

- состав вяжущей системы — содержание (% массы вяжущего) цеолита  $Z=X_1=10 \pm 10$ , щелочной соли  $A=X_2=5 \pm 5$  и цемента  $C=X_3=2.5 \pm 2.5$ ;
- условия приготовления вяжущего — содержание пластификатора  $P=X_4=0.4 \pm 0.4$  (% массы вяжущего) и тонкость помола  $S=X_5=320 \pm 30$  м<sup>2</sup>/кг;
- режим тепловлажностной обработки (ТВО) — время предварительной выдержки  $\tau_0=X_6=8 \pm 4$  ч, температура изотермического прогрева  $T=X_7=75 \pm 15$  °С и его продолжительность  $\tau_T=X_8=6 \pm 2$  ч.

Факторы нормализованы к условию  $-1 \leq x_i \leq +1$  как  $x_i=(X_i-X_{i0})/\Delta X_i$  [4].

При гипотезе параболической нелинейности влияния  $k=8$  факторов на характеристики системы моделирующий его полином второй степени содержит  $L_8=(k+1)(k+2)/2=45$  неизвестных коэффициентов, а обследование факторной области по плану полного факторного эксперимента [4] должно охватить  $3^8=6561$  различных РТ-ситуаций. Синтезирован специальный план эксперимента на основе структур Р. Рехтшафнера [5], но с расположением звездных точек {..., 0,  $\pm 1$ , 0, ...} на гранях гиперкуба и одной точки в его центре [6]. По такому плану экспериментально определены свойства 54 вяжущих систем.

Результаты эксперимента представлены на рис. 1, который объединяет две диаграммы рассеяния  $\{R, F\}$  и  $\{R, K\}$ . Связь между критериями качества или не обнаруживается (коэффициенты корреляции  $r\{R, F\}=-0.08$  и  $r\{F, K\}=0.25$ ), или может быть допущена с большим риском ( $r\{KR\}=-0.35$ ).

Все три критерия качества изменяются (как и следовало ожидать) в весьма широких пределах  $4.0 \leq R \leq 41.3$ ,  $2 \leq F \leq 200$  и  $0.25 \leq K \leq 3.85$ , что требует нескольких этапов моделирования. На первом — с помощью последовательного регрессионного анализа (ПРА) [4] строится квадратичная ЭС-модель адекватная 54 экспериментальным результатам только со значимыми оценками коэффициентов (при риске  $\alpha=0.1$ ). В частности, в модели прочности  $R(x_1, \dots, x_8)$ , осталось  $L\{R\}=27$  отличных от

нуля оценок (коэффициентов  $b$ ) при генерированной [1, 2] ошибке эксперимента  $s_{e.g}\{R\}=3.48$  МПа. Однако эта модель (несмотря на адекватность) не пригодна для принятия инженерных решений, поскольку значения экстремумов сильно удалены от диапазона реальных уровней прочности (рис. 1); так, минимальное расчетное значение  $R$  вообще отрицательное ( $-13$  МПа!). Поэтому на следующем этапе необходимо преобразование откликов  $Y$ . Наиболее удобным оказалась двустадийная процедура [7], на основе преобразования (1), предложенного [8] для моделирования эмпирических вероятностей  $p\{Y\}$  значений  $Y$  и гарантирующего, что рассчитанное по любой модели значение вероятности не выйдет за границы существования  $0 \leq p\{Y\} \leq 1$ .

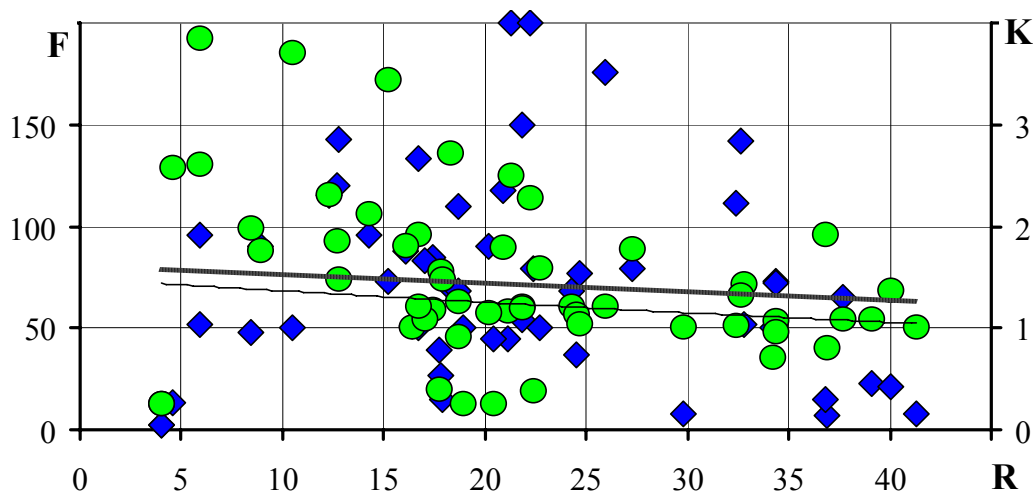
$$\kappa Y = \ln[p\{Y\}/(1-p\{Y\})] \quad (1)$$

Преобразованием (1) можно воспользоваться, если моделируемый критерий, например  $R$ , предварительно нормализовать в “инженерно разумном” диапазоне его существования – от  $R_{\min}^*$  до  $R_{\max}^*$  (несколько расширенным по сравнению с диапазоном, наблюдаемым в эксперименте).

$$p\{R\} = (R - R_{\min}^*) / (R_{\max}^* - R_{\min}^*) \quad (2)$$

Так, для предела прочности на сжатие были выбраны границы  $R_{\min}^* = 3$  МПа (вместо 4, рис. 1) и  $R_{\max}^* = 43$  МПа (вместо 41.3), что соответствует  $p\{R\} = 0$  (или  $\kappa R \rightarrow -\infty$ ) и  $p\{R\} = +1$  (или  $\kappa R \rightarrow +\infty$ ). Полином (3) для преобразованной величины содержит 29 значимых эффектов (при его построении остановка ПРА проводится при  $L\{\kappa R\} \cong L\{R\}$ ).

$$\begin{aligned} \kappa R = -0.19 & \quad \begin{aligned} & + 0.20x_1 \pm 0x_1^2 + 0.48x_1x_2 + 0.34x_1x_3 \\ & + 0.86x_2 \pm 0x_2^2 - 0.37x_2x_3 \\ & + 0.25x_3 \pm 0x_3^2 \end{aligned} \quad (a) \\ & \quad \begin{aligned} & \pm 0x_4 + 0.55x_4^2 - 0.24x_4x_5 \\ & + 0.18x_5 + 0.72x_5^2 \end{aligned} \quad (b) \\ & \quad \begin{aligned} & + 0.27x_6 - 0.97x_6^2 - 0.15x_6x_7 \pm 0x_6x_8 \\ & + 0.33x_7 - 0.89x_7^2 \pm 0x_7x_8 \\ & + 0.24x_8 - 0.36x_8^2 \end{aligned} \quad (c) \\ & \quad \begin{aligned} & \pm 0x_1x_4 \\ & - 0.22x_1x_5 \\ & \pm 0x_2x_4 \\ & \pm 0x_2x_5 \\ & + 0.27x_3x_4 \\ & + 0.28x_3x_5 \end{aligned} \quad (d) \\ & \quad \begin{aligned} & + 0.20x_1x_6 \\ & + 0.24x_1x_7 \\ & \pm 0x_1x_8 \\ & + 0.38x_2x_6 \\ & \pm 0x_2x_7 \\ & \pm 0x_2x_8 \\ & + 0.14x_4x_8 \\ & \pm 0x_5x_6 \\ & + 0.14x_5x_7 \\ & - 0.23x_5x_8 \end{aligned} \quad (e) \\ & \quad \begin{aligned} & + 0.20x_1x_6 \\ & + 0.24x_1x_7 \\ & \pm 0x_1x_8 \\ & + 0.38x_2x_6 \\ & \pm 0x_2x_7 \\ & \pm 0x_2x_8 \\ & + 0.18x_3x_6 \\ & \pm 0x_3x_7 \\ & + 0.20x_3x_8 \end{aligned} \quad (f) \end{aligned} \quad (3)$$



**Рисунок 1.** Экспериментальные значения прочности  $R$ , морозостойкости  $F$  (♦) и химической стойкости  $K$  (о) вяжущей системы для 54 РТ-вариантов

ЭС-модель (3) структурирована по трем группам факторов.

Блок (а) включает оценки эффектов трех факторов состава (при уровнях остальных факторов в центре диапазона); наибольшее влияние оказывает содержание щелочной соли, причем степень этого влияния зависит от количества цеолита и цемента (она тем выше, чем больше в системе цеолита и меньше цемента). Блок (б) оценивает роль факторов приготовления вяжущего; следует отметить, что их влияние проходит через минимум  $\kappa R$ , расположенный вблизи центра эксперимента, однако, повышенные уровни  $P$  и  $S$  могут оказаться весьма полезными для роста прочности вяжущего. В блоке (с) оценивается влияние режима ТВО; квазиоднофакторные модели [4, 8]  $R(\tau_0)$ ,  $R(T)$  и  $R(\tau_1)$  имеют максимум в пределах диапазона варьирования и излишнее увеличение уровней этих параметров не имеет смысла.

Блоки (d, e, f), которые содержат 10 оценок, соизмеримых по абсолютной величине с эффектами в основных блоках, отражают изменение во влиянии одной группы индивидуальных факторов в зависимости от уровней факторов в других группах. Так, положительное влияние предварительной выдержки  $\tau_0$  может возрасти для систем с повышенным содержанием цеолита ( $b_{16} > 0$ ), щелочной соли ( $b_{26} > 0$ ) и цемента ( $b_{36} > 0$ ).

Модель (3) имеет максимум  $\kappa R = +3.57$  и минимум  $\kappa R = -5.30$ , что соответствует  $R_{\max} = 41.9$  и  $R_{\min} = 3.2$  МПа.

Аналогичные (3) ЭС-модели построены и для других критериев качества (с учетом ошибок эксперимента  $s_{e.g}\{F\} = 18.6$  циклов и  $s_{e.g}\{K\} = 0.26$ ). Их экстремальные значения  $F_{\max} = 207$  и  $F_{\min} = 0$  циклов для морозостойкости,  $K_{\max} = 4.0$  и  $K_{\min} = 0.20$  для стойкости в растворе сульфата натрия близки к границам экспериментальных значений (рис. 1).

#### Условия поиска компромиссных составов и режимов получения шлакощелочного вяжущего с гарантированными уровнями трех критериев качества

В одном из вариантов проектного задания для трех критериев качества вяжущей системы были установлены нормативные границы пре-

дела прочности  $R_{\text{норм}} = 30$  МПа, морозостойкости  $F_{\text{норм}} = 100$  циклов и коэффициента стойкости в сульфате натрия  $K_{\text{норм}} = 1$ . Однако для повышения надежности нового материала при поиске оптимальных компромиссных РТ-решений ориентировались на более жесткие требования, перейдя к вероятностным показателям качества  $Y_\alpha$ , учитывающим риск ошибок моделирования  $\alpha < 0.5$  [9].

Для прочности гарантированный уровень  $R_\alpha$  принят при риске  $\alpha = 0.05$ . При оптимизации уровень  $R_{0.5}$  в  $u$ -той точке ( $x_{1u}, \dots, x_{8u}$ ) определяется по модели (3) как  $R_{0.5}(x_u) = R(x_u) - \Delta R(x_u) = R_u - t_{0.5} \cdot d^{0.5}(x_u) \cdot s_e\{R\}$ . Вычитаемый полудиапазон  $\Delta R_u$  зависит от уровня риска (через квантиль  $t_{0.5} = 1.645$ ), от значения функции дисперсии предсказания  $d$  [4] (в данной версии учитывается среднее по 8-факторной области  $d = 1$ ) и от ошибки эксперимента  $s_e\{R\} = 3.48$  МПа. Таким образом, все расчетные значения  $R_u$  уменьшаются на  $\Delta R = 5.7$  МПа.

Вероятностные критерии для морозостойкости и коэффициента стойкости приняты при более «мягких» условиях риска  $\alpha = 0.10$  (квантиль  $t_{10} = 1.282$ ). После учета ошибок  $s_e\{F\} = 18.6$  циклов и  $s_e\{K\} = 0.26$  получены полуинтервалы  $\Delta F = 23.9$  и  $\Delta K = 0.33$ .

В первой серии вычислительных экспериментов (С) компромиссно максимизируются критерии  $R_{0.5} > 30$  и  $F_{10} > 100$ , в условиях ограничения по стойкости  $K_{10} \geq 1.0$ .

Во второй серии (ЕС) — проводится поиск минимального расхода некоторых «дефицитных» элементов вяжущей системы при выполнении  $R_{0.5} \geq 30$ ,  $F_{10} \geq 100$  и  $K_{10} \geq 1.0$ .

Итерационная процедура поиска компромиссных решений на описанных ЭС-моделями полях  $Y(x)$  свойств материала в области  $\Omega_x$  вектора рецептурно-технологических координат [1] построена на случайном сканировании полей методом Монте-Карло. Одно из ее преимуществ — режим диалога материаловед с компьютером на каждой итерации. В частности, с технико-экономических позиций или в зависимости от получаемых результатов могут обсуждаться скорости  $\partial Y_j / \partial x_i$  изменения (максимизации или минимизации) любого свойства  $Y_j$  под воздействием одного фактора  $x_i$  или их группы. Реализуется последовательная стратегия вычислительных экспериментов.

### Компромиссная максимизация гарантированной прочности $R_{05}$ и морозостойкости $F_{10}$ вяжущей системы

Генерируется  $N=10000$  (этот и другие параметры поиска указываются для данной конкретной задачи, результаты решения которой представлены в табл. 1 и на рис. 2) случайных равномерно распределенных векторов  $x$  (по 8 нормализованных координат состава и режима ТВО в интервалах  $-1...+1$ ). На первом этапе первой итерации  $S_{11}$  к случайным точкам добавляются  $N_{\pm 1}=2^k=2^8=256$  вершин гиперкуба  $(\pm 1, ..., \pm 1)$  – детерминированных точек (вероятность генерации которых равна нулю [4]). Во всех  $N_{11}=N+N_{\pm 1}=10256$  точках области  $\Omega_x$  полей критериев  $R$ ,  $F$  и  $K$  по ЭС-моделям рассчитываются оценки уровней трех свойств. На следующем этапе  $S_{12}$  среди  $N_{11}$  точек удаляются после сортировки те точки (РТ-ситуации), в которых вяжущее имеет низкие гарантированные уровни  $R_{05} < 30$  МПа,  $F_{10} < 100$  циклов и  $K_{10} < 1$ . Таких недопустимых сочетаний составов и режимов ТВО оказывается 10253, и только  $N_{12}=3$  точки (рис. 2) попадают в область допустимых решений  $\Omega_{12}$ . На этапе  $S_{13}$  следует повышать уровень  $R_{05}$  и  $F_{10}$ , исключать точки, не удовлетворяющие новым требованиям, сужая тем самым область допустимых решений до  $\Omega_{13} \subset \Omega_{12}$ . В данной задаче удалось повысить нижний уровень  $F_{10}$  до 105, исключив одну точку; объем области конкурирующих решений меньше исходной на несколько порядков, но некоторые факторы изменяются в достаточно широких диапазонах; так,  $\Delta x_7 = 0.26 - (-0.26) = 0.52$  (рис. 2, табл. 1).

Вторая и последующие ( $j$ -ые) итерации осуществляются по тем же принципам, но есть ряд особенностей реализации этапов.

#### На начальных этапах $S_{j1}$ :

-границы области поиска расширяются (относительно области  $\Omega_{j-1}$ , определенной на предшествующей итерации) по каждой нормализованной переменной  $x_i$  ( $i=1, ..., 8$ ) в обе стороны примерно на 0.1; это может привести к снижению критериев ( $R_{05}$ ,  $F_{10}$  и  $K_{10}$ ) ниже соответствующих нормативов (рис. 2); так, в частности, диапазон варьирования щелочной соли  $0.64 \leq x_2 \{C_{13}\} \leq 0.67$  расширен до  $0.50 \leq x_2 \{C_{21}\} \leq 0.80$  (табл. 1); нижний уровень  $R_{05} \{C_{21}\}$  составил лишь 22.4 МПа (рис. 2);

В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, О. Д. Довгань

-во-вторых, к  $N$  генерируемым точкам добавляются все точки области допустимых решений предшествующей итерации, в частности,  $N_{21}=N+N_{13}=10002$  (рис. 2).

На промежуточных этапах  $S_{j2}$  границы области  $\Omega_{j2}$  определяются граничными уровнями критериев, достигнутыми на предшествующей итерации, а не исходными нормативами; в частности, на этапе  $S_{32}$  (рис. 2) нижняя граница морозостойкости  $F\{C_{32}\}=135$  циклов (результат максимизации на этапе  $S_{23}$ ), а не 100 (исходная на этапе  $S_{12}$ ).

#### На заключительных этапах $S_{j3}$ :

-производится пошаговое приближение гарантированных уровней  $R_{05}$  и  $F_{10}$  к индивидуальным максимумам. Оно происходит за счет “передвижения” вверх нижних граничных значений и удаления не удовлетворяющих им РТ-вариантов. Так, на этапе  $S_{23}$  прочность поднята до  $R_{05} \geq 33.0$  и морозостойкость до  $F_{10} \geq 135$  (коэффициент стойкости оставался  $K_{10} \geq 1$ ); в результате из  $N_{22}=2991$  точек в области конкурирующих решений осталось только  $N_{23}=14$  (рис. 2);

-в результате последней итерации (4-ой на рис. 2), как правило, остается достаточно много конкурирующих решений ( $N_{43}=26$ ) в узких диапазонах изменения критериев ( $34.0 \leq R_{05} \leq 34.2$ ,  $155 \leq F_{10} \leq 160$  – рис. 2); для определения конечных нормализованных уровней факторов, целесообразно использовать средние координаты только тех точек, где  $R_{05} = 34.2$  МПа (их 3) или  $F_{10} = 160$  циклам (их 1).

В результате определены компромиссные оптимальные уровни нормализованных факторов:  $x_1=0.50$ ;  $x_2=0.48$ ;  $x_3=1.0$ ;  $x_4=1.0$ ;  $x_5=1.0$ ;  $x_6=0.36$ ;  $x_7=0.17$ ;  $x_8=0.00$ .

После возвращения к именованным величинам и их округления до уровней, приемлемых для технической реализации, получено:

-содержание цеолита  $Z=15\%$ , щелочной соли  $A=7.5\%$ , портландцемента  $C=5\%$ ;

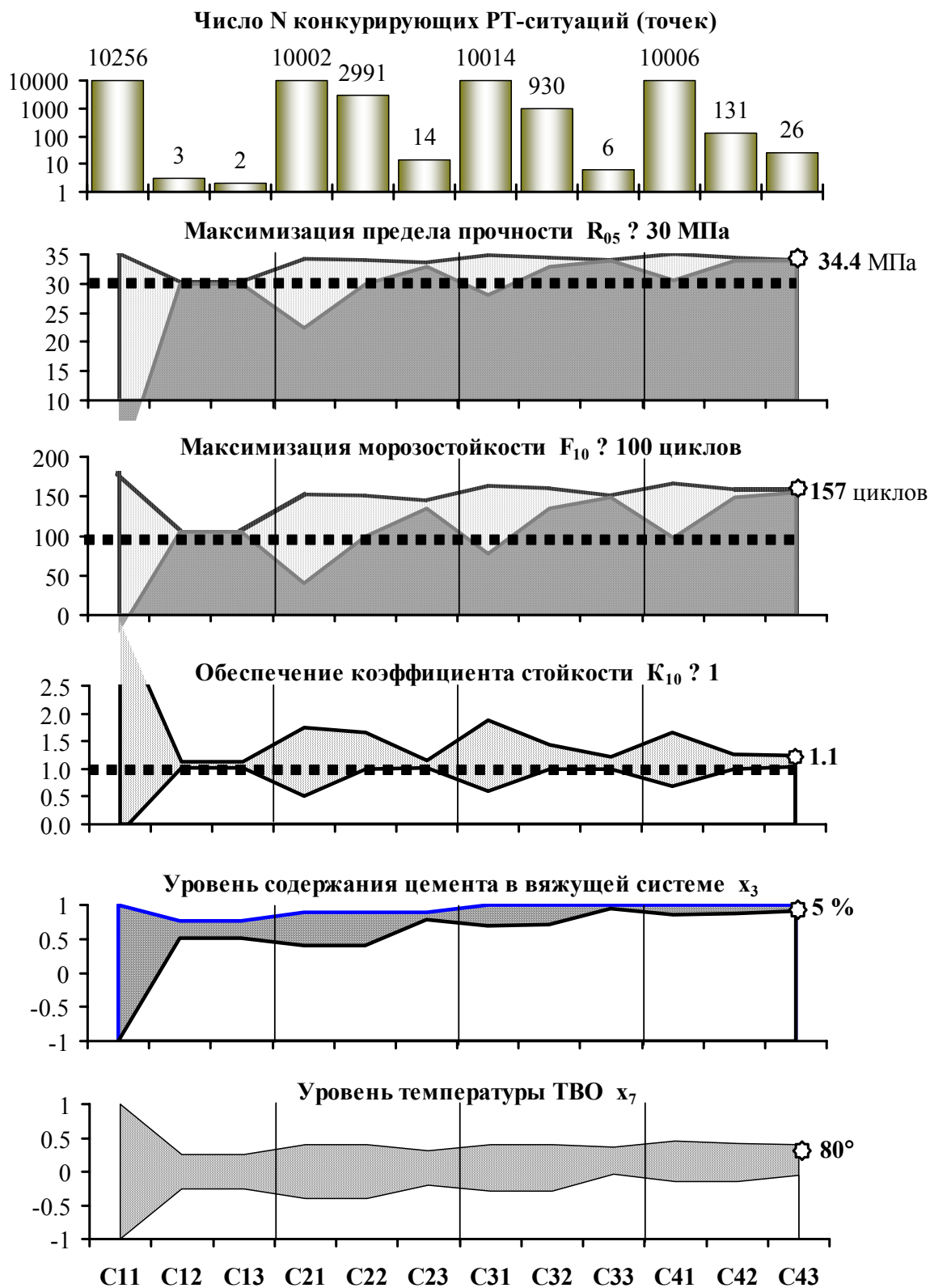
-дозировка пластификатора  $P=0.8\%$ , тонкость помола вяжущего  $S=350$  м<sup>2</sup>/кг;

-предварительная выдержка  $\tau_0=9.5$  ч, температура ТВО  $T=80$  °С, время ТВО  $\tau_T=6$  ч.

Такие состав и режим ТВО дают расчетные гарантированные уровни двух критериев качества вяжущего  $R_{05}=34.4$  МПа и  $F_{10}=157$  циклов при коэффициенте стойкости  $K_{10}=1.1$ .

Таблиця 1. Діапазони факторів на етапах пошуку компроміса (серія С)

$x_i$	C11	C12	C13	C22	C23	C32	C33	C42	C43
$x_1$		0.26...0.68	0.26...0.51	0.15...0.65	0.18...0.64	0.10...0.75	0.22...0.60	0.18...0.70	0.18...0.69
$x_2$		0.64...0.88	0.64...0.67	0.50...0.80	0.51...0.76	0.40...0.85	0.45...0.75	0.37...0.76	0.37...0.72
$x_3$		0.52...0.76	0.52...0.76	0.40...0.90	0.78...0.90	0.70...1	0.94...1	0.87...1	0.91...1
$x_4$	1 : 1	0.69...0.81	0.69...0.81	0.55...0.95	0.87...0.95	0.77...1	0.92...1	0.92...1	0.97...1
$x_5$		-0.08...0.94	0.77...0.94	0.65...1	0.78...0.99	0.70...1	0.92...1	0.85...1	0.90...1
$x_6$		0.54...0.68	0.57...0.68	0.45...0.80	0.48...0.60	0.40...0.70	0.41...0.50	0.30...0.56	0.31...0.46
$x_7$		-0.26...0.26	-0.26...0.26	-0.40...0.40	-0.20...0.31	-0.30...0.40	-0.03...0.37	-0.14...0.42	-0.05...0.40
$x_8$		-0.66...0.11	-0.66...0.11	-0.80...0.25	-0.26...0.17	-0.35...0.25	-0.20...0.13	-0.29...0.25	-0.22...0.25



**Рисунок 2.** Изменения числа оцениваемых решений, интервалов гарантированных значений критериев качества и диапазонов двух факторов (состава и режима) на этапах поиска компромисса



**Поиск минимальных расходов  
материальных и энергетических ресурсов  
при гарантированном обеспечении  
нормативных границ трех критериев  
качества вяжущего**

Задача минимизации расхода ресурсов при выполнении требований к качеству материала (оптимизация второго типа [4]) возникает в технологии строительных материалов повседневно. Решить ее становится все труднее (а потери от ошибочного решения все ощутимее) по мере увеличения числа учитываемых факторов  $x$  и количества критериев качества, к которым предъявляются требования  $Y(x) \geq Y_{\text{норм}} = \text{const}$ . Поиск компромиссных решений с использованием случайного сканирования оказался эффективным для минимизации расхода ресурсов при гарантированном обеспечении нормативов по критериям качества системы “доменный шлак–цеолит–щелочная соль–цемент”:  $R_{05} \geq 30$  МПа,  $F_{10} \geq 100$  циклов и  $K_{10} \geq 1$ .

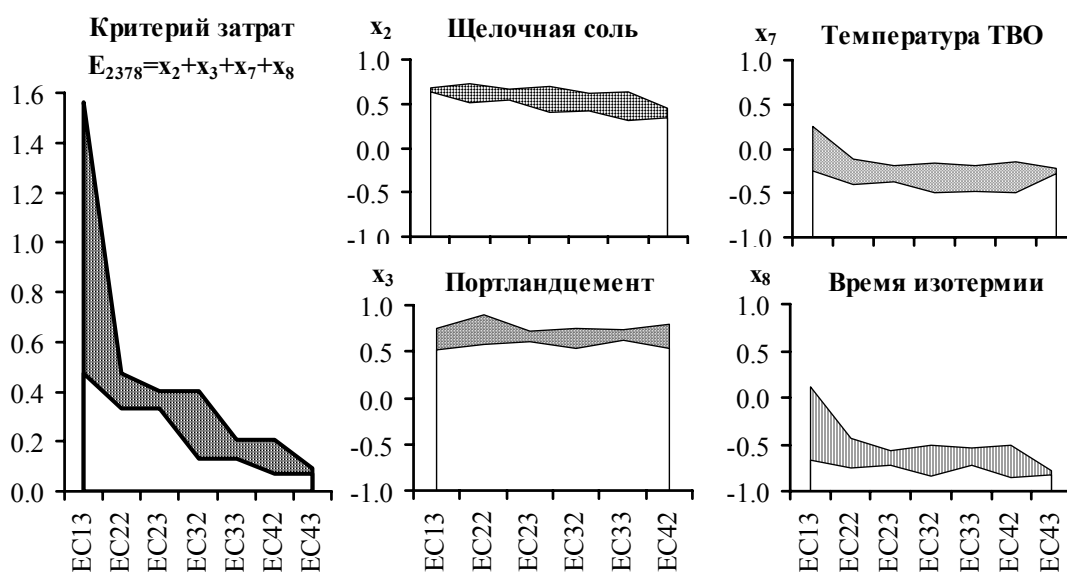
В одной из версий разыскивалось РТ-решение, направленное на уменьшение содержания в системе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и портландцемента, снижение температуры ТВО и сокращение времени  $\tau_T$ . Расход остальных ресурсов не лимитировался (в экспериментально исследованных пределах). Допускалось, что стоимость минимизируемых расходов в диапазонах варьирования  $\Delta X_i$  ( $i=2, 3, 7, 8$ ) одинакова и формирование критерия затрат (*expense*) возможно как  $E_{2378} = x_2 + x_3 + x_7 + x_8$  (без “ценовых”

множителей); область его значений от  $-4$  (щелочная соль и портландцемент не вводятся,  $T=60^\circ$  в течение 4 ч) до  $+4$  (расход ресурсов на верхних уровнях). При таких допущениях это соответствует многомерной задаче нелинейного программирования [4].

Этапы поиска ЕС11 и ЕС12 совпадают с этапами С11 и С12, выполненными при компромиссной максимизации  $R_{05}$  и  $F_{10}$ . Поэтому, найденные на этапе С12 три допустимые решения ( $N\{C12\}$  на рис. 2), удовлетворяющие всем нормативным требованиям к материалу, используются для следующей итерации поиска минимума критерия затрат, который на этом этапе оказался в диапазоне от 0.47 до 1.56.

Дальнейшая процедура минимизации  $E_{2378}$  по существу не отличается от описанной выше. На последующей итерации границы генерации 10000 случайных точек (этап ЕСi1) расширяются для всех факторов на 0.1-0.2 единицы в каждую сторону (несколько больше, чем при компромиссной максимизации  $R_{05}$  и  $F_{10}$ ). Варианты, не отвечающие нормативам и превышающие верхний уровень  $E_{2378}$  предыдущей итерации, удаляются (этап ЕСi2). Верхний уровень  $E_{2378}$  снижается до тех пор, пока его диапазон критерия затрат не сократится примерно до 0.1 единицы (этап ЕСi3).

Результаты минимизации ресурсов при гарантированном выполнении нормативных требований к трем критериям качества вяжущей системы показаны на рис. 3.



**Рисунок 3.** Изменение критерия затрат и его составляющих на этапах минимизации

На этапе ЕС43 критерий составил 0.07...0.09, экономия достигнута, главным образом за счет снижения энергозатрат на ТВО (температуры до 71-72°C и продолжительности изотермии до 4.4-4.5 ч). Расход ресурсов, связанных с составом вяжущего, изменился меньше — удалось снизить дозировку щелочной соли ( $A=6.7-7.2\%$ ), но расход цемента остался практически на исходном уровне ( $C=4.3-4.4\%$ ). Из четырех, свободно изменяемых факторов, два довольно быстро вышли на верхний допустимый уровень (пластификатор 0.8% и тонкость помола  $S=350 \text{ м}^2/\text{кг}$ ). При этом содержание цеолита 15-17%, время  $\tau_0=9.5-9.7 \text{ ч}$ . Окончательное компромиссное решение выбрано в указанных диапазонах с учетом инженерных возможностей регулирования факторов.

### Заключение

При разработке и исследовании строительных материалов на основе многокомпонентных систем (особенно, содержащих технологические сырьевые компоненты), подвергающихся технологическим воздействиям по сложным режимам, целесообразно построение экспериментально-статистических моделей. ЭС-модели позволяют получать новую научную и инженерную информацию с помощью методов компьютерного строительного материаловедения. С помощью метода Монте-Карло путем итерационного случайного сканирования восьмифакторных полей трех свойств щелочного геоцемента найдены:

- составы и режимы ТВО, максимизирующие гарантированные уровни критериев качества вяжущей систем;
- минимальные расходы ресурсов (щелочной соли, портландцемента, температуры ТВО и ее продолжительности) для гарантированного обеспечения требуемого качества.

Методика позволяет находить компромиссные решения в задачах, где набор критериев оптимальности сформирован и критериями качества материала, и рецептурно-технологическими факторами.

### Литература

1. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. — Одесса, Астропринт, 2006. — 116 с.
2. Методические рекомендации по применению экспериментально-статистических моделей для анализа и оптимизации состава, технологии и свойств композиционных материалов на основе щелочных вяжущих систем / Науч. ред. В.А. Вознесенский, П.В. Кривенко. — ОГАСА, НИИВМ им. В.Д. Глуховского. — К., 1996. — 105 с.
3. Планирование эксперимента и принятие решений при восьмифакторном моделировании технологии щелочного геоцемента / П.В. Кривенко, Ж.В. Скурчинская, А.П. Семенюк, В.А. Вознесенский, Е.Н. Беньковская // Анализ и оптимизация грубогетерогенных композиционных материалов: Тезисы. междунар. семинара. — К.: Об-во "Знання" Украины, 1993. — С. 4-5.
4. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. — К.: Вища школа, 1989. — 328 с.
5. Rechtshaffner R.L. Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs. — Technometrics, 1967, v. 9, № 4. — P. 569-576.
6. Non-traditional experimental-statistical modelling and analysis of the results for composites on alkaline binders / V.A. Voznesensky, T.V. Lyashenko // Alkaline Cements and Concretes: Proc. 1-st Int. Conf. — Kiev: Vipol, 1994. — V. 1. — P. 387-398.
7. Вибір складу покриття зварювального електрода з урахуванням критеріїв якості металу шва, тріснутого в деяких точках плану експерименту / В. А. Вознесенський, Т.В. Ляшенко, Ш. Щерев, Ц. Абаджієва. — Металеві конструкції, 2000. — Т. 3. — №1. — С. 31-36.
8. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. — 2-ое изд. — М.: Финансы и статистика, 1981. — 263 с.
9. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов. — К.: Будивельник, 1989. — 240 с.

**Вознесенський Віталій Анатолійович** завідує кафедрою процесів й апаратів у технології будівельних матеріалів. Дійсний член Міжнародної інженерної академії й голова наукової ради по комп'ютерному матеріалознавству, іноземний член Російської академії архітектури й будівельних наук. Наукові інтереси: комп'ютерне матеріалознавство, експериментально-статистичне моделювання в інженерних задачах.

**Ляшенко Тетяна Василівна** працює професором кафедри прикладної і обчислювальної математики і САПР. Член-кореспондент Міжнародної інженерної академії та учений секретар наукової ради по комп'ютерному матеріалознавству, член Американської статистичної асоціації. Наукові інтереси: комп'ютерне матеріалознавство, експериментально-статистичне моделювання і оптимізація композитів.

**Довгань Олександра Дмитрівна** працює старшим викладачем кафедри процесів і апаратів у технології будівельних матеріалів. Наукові інтереси: полімервмісткі будівельні матеріали, експериментально-статистичне моделювання в технології будівельних матеріалів.

**Вознесенский Виталий Анатольевич** — заведует кафедрой процессов и аппаратов в технологии строительных материалов. Действительный член Международной инженерной академии и председатель научного совета по компьютерному материаловедению, иностранный член Российской академии архитектуры и строительных наук. Научные интересы: компьютерное материаловедение, экспериментально-статистическое моделирование в инженерных задачах.

**Ляшенко Татьяна Васильевна** работает профессором кафедры прикладной и вычислительной математики и САПР. Член-корреспондент Международной инженерной академии и ученый секретарь научного совета по компьютерному материаловедению, член Американской статистической ассоциации. Научные интересы: компьютерное материаловедение, экспериментально-статистическое моделирование и оптимизация композитов.

**Довгань Александра Дмитриевна** работает старшим преподавателем кафедры процессов и аппаратов в технологии строительных материалов. Научные интересы: полимеросодержащие строительные материалы, экспериментально-статистическое моделирование в технологии строительных материалов.

**Voznesens'ky Vitaly Anatolyovych** — Honoured Science and Engineering Worker of Ukraine, Dr.Sc., Professor, Head of Department of Processes and Apparatuses in the Production of Building Materials of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

**Lyashenko Tetyana Vasylivna** — Dr.Sc., Engineering, Professor at the Department of Applied and Computational Mathematics and SAPR of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

**Dovgan' Olexandra Dymytrivna** — Ph.D., Engineering, Associated Professor at the Department of Processes and Apparatuses in the Production of Building Materials of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture.