

*Вознесенский В.А., доктор технических наук, профессор  
Ляшенко Т.В., доктор технических наук, профессор  
Гаврилюк В.П., магистр, ОГАСА*

## **КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПОИСК КОМПРОМИССА МЕЖДУ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ, МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И ЭНЕРГОЕМКОСТЬЮ ЯЧЕЙСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Введение.** Строительный материал, в частности, ячеистый бетон, оказывается конкурентоспособным, если он не только отвечает всем нормативным требованиям, но и имеет преимущества в уровнях не регламентируемых свойств, в частности трещиностойкости, а кроме того, не требует повышенного расхода ресурсов, в частности энергетических. К принятию рецептурно-технологических (РТ) решений в таких непростых ситуациях целесообразно привлекать методы компьютерного строительного материаловедения [1, с. 4]. Среди них в настоящий момент приоритетны вычислительные эксперименты на РТ-полях свойств материала [1, 2], описанных экспериментально-статистическими (ЭС) моделями [3, 4]. Однако полезный для конкретной технологии результат может быть получен при последовательной реализации четырех стадий: 1 – оптимальное планирование многофакторного эксперимента (не вызывает особых затруднений в задачах отраслевой науки); 2 – натурный эксперимент по оптимальному плану (требует расхода материально-временных ресурсов и сертифицированного оборудования); 3 – корректное построение комплекса нелинейных многофакторных ЭС-моделей (принципиальных проблем нет, в ОГАСА создана специализированная система СОМРЕХ); 4 – вычислительные эксперименты на полях свойств материала (с использованием, в частности, метода Монте-Карло). В целом такая методология исследования относится к классу «высоких технологий», что и определяет границы ее применения, в частности, при разработке конкурентоспособных материалов с гарантированными уровнями специальных свойств.

В данной работе РТ-решение для технологии газосиликата разыскивается с помощью новой версии [5] процедуры поиска компромиссного оптимума – в вычислительном эксперименте генерируются только те «технологически допустимые» уровни РТ-факторов (нормализованные в интервале от -1 до +1), которые можно установить в реальных технологических условиях. Используется дискретное равномерное распределение.

**Условия эксперимента и моделирование.** Исследование влияния девяти РТ-факторов на свойства и структуру автоклавного газобетона выполнены совместно с НИПСиликатобетон МПСМ СССР [6]. Это, с одной стороны, обеспечивало соблюдение 56 различных технологических регламентов при изготовлении газобетонных блоков в производственных условиях и определение в специализированной лаборатории физико-механических характеристик материала. С другой стороны, эксперимент оптимально спланирован – специально синтезирован план с 56 опытами («заменяющий» планы полного факторного эксперимента  $2^k$  и  $3^k$ , с числом опытов 512 и 19683 при  $k = 9$ ); корректно построен комплекс 9-факторных моделей; комплексно определены теплофизические свойства и параметры порового пространства (методом лазерной порометрии).

В табл. 1 указаны диапазоны  $X_0 \pm \Delta X$  варьирования факторов  $X$  в натурном эксперименте, которые выдерживались с доступной при опытном производстве газосиликата точностью. Для каждого фактора указан также размер  $h$  ступени регулирования, определяющий дискретные уровни факторов в вычислительных экспериментах. Величина  $h$  определяется для каждого фактора возможностями производственных систем регулирования и на основе инженерного опыта.

Таблица 1. Девять рецептурно-технологических факторов, уровни их варьирования в натурном эксперименте и условия регулирования для вычислительного эксперимента

Индекс (i)	Фактор	Натурный эксперимент		Вычислительный эксперимент
		Центральное значение $X_{0,i}$	Полу-интервал $\Delta X_i$	Степень $h_i$
1	Растекаемость смеси по Суттарду, D (см)	27	4	0.5
2	Влажность песка при совместном помоле с известью, $w_s\%$	5	3	0.5
3	Удельная поверхность песка $S_s$ ( $m^2/kg$ )	250	100	20
4	Изотермическая выдержка в автоклаве $\tau$ (час)	8	4	0.5
5	Рабочее давление пара $p$ (МПа)	1	0.2	0.05
6	Дозировка алюминиевой пудры (от массы сухих материалов) A%	0.07	0.03	0.005
7	Активность смеси (содержание CaO в смеси извести и песка) $a_{CaO}\%$	17	3	0.5
8	Температура воды затворения $t_w$ , °C	35	10	2
9	Количество цемента C% (от смеси)	10	10	1

В начале поиска число возможных значений фактора  $X_i$  равно  $m_i = 1 + 2 \cdot \Delta X_i / h_i$ , вероятность каждого из значений  $p_i = 1/m_i$ . Общее число конкурирующих РТ-вариантов производства газосиликата составляет  $17 \times 13 \times \dots \times 11 = 14\,5 \times 10^9$ . В процессе поиска число вариантов резко сокращается за счет исключения бесполезных для приближения к компромиссу уровней регулирования.

Из газосиликатных блоков, изготовленных по 56 регламентам, выпиливались образцы сечением  $4 \times 4$  см. Среди критериев качества материала (Y) экспериментально определены, в частности, плотность  $\gamma$  ( $kg/m^3$ ), коэффициент теплопроводности  $\lambda$  (мВт/м/К), пределы прочности при сжатии и изгибе  $R_c$  и  $R_b$  (МПа), а также предельная деформативность при изгибе  $\epsilon$  (мм/м). Построен комплекс квадратичных полиномиальных ЭС-моделей (со стандартно нормализованными переменными  $|x_i| \leq 1$ ), допущенных для инженерного анализа и вычислительных экспериментов после исключения (при последовательном регрессионном анализе) из 55 оценок коэффициентов всех статистически незначимых. Так в модели для плотности газосиликата осталось 23 значимых коэффициента.

Модель (1) описывает поле плотности в 9 РТ-координатах. Однако, поскольку режим автоклавной обработки сырца не оказывает значимого влияния на плотность готового материала (все коэффициенты при  $x_4$  и  $x_5$  равны нулю), то модель  $\gamma$  можно считать 7-факторной. Экстремальные уровни поля:  $\gamma_{max} = 901$  и  $\gamma_{min} = 389$   $kg/m^3$ ; между ними полностью «укладываются» 4 марки, от D500 до D800, что позволяет проводить вычислительные эксперименты в обширном диапазоне свойств газобетона.

Вместе с аналогичными моделями 9-факторных полей  $R_c$ ,  $R_b$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$  модель (1) используется при решении задачи компромиссной оптимизации свойств газосиликата марки D800 (ограничение  $740 \leq \gamma \leq 840$ ) и класса B5 (ограничение  $6.4 \leq R_c \leq 9.6$  МПа). Максимируется показатель вязкости разрушения  $N = R \cdot \epsilon$ , определяющий трещиностойкость газо-



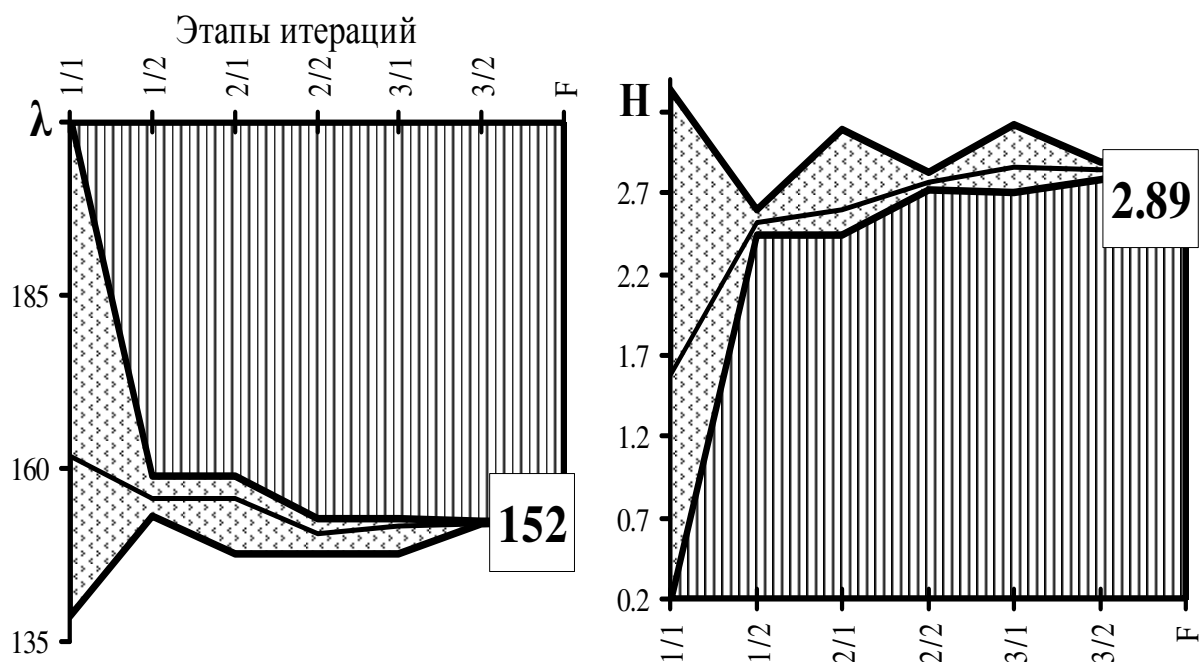


Рис. 1. Улучшение уровней коэффициента теплопроводности и показателя вязкости разрушения в процессе поиска компромисса

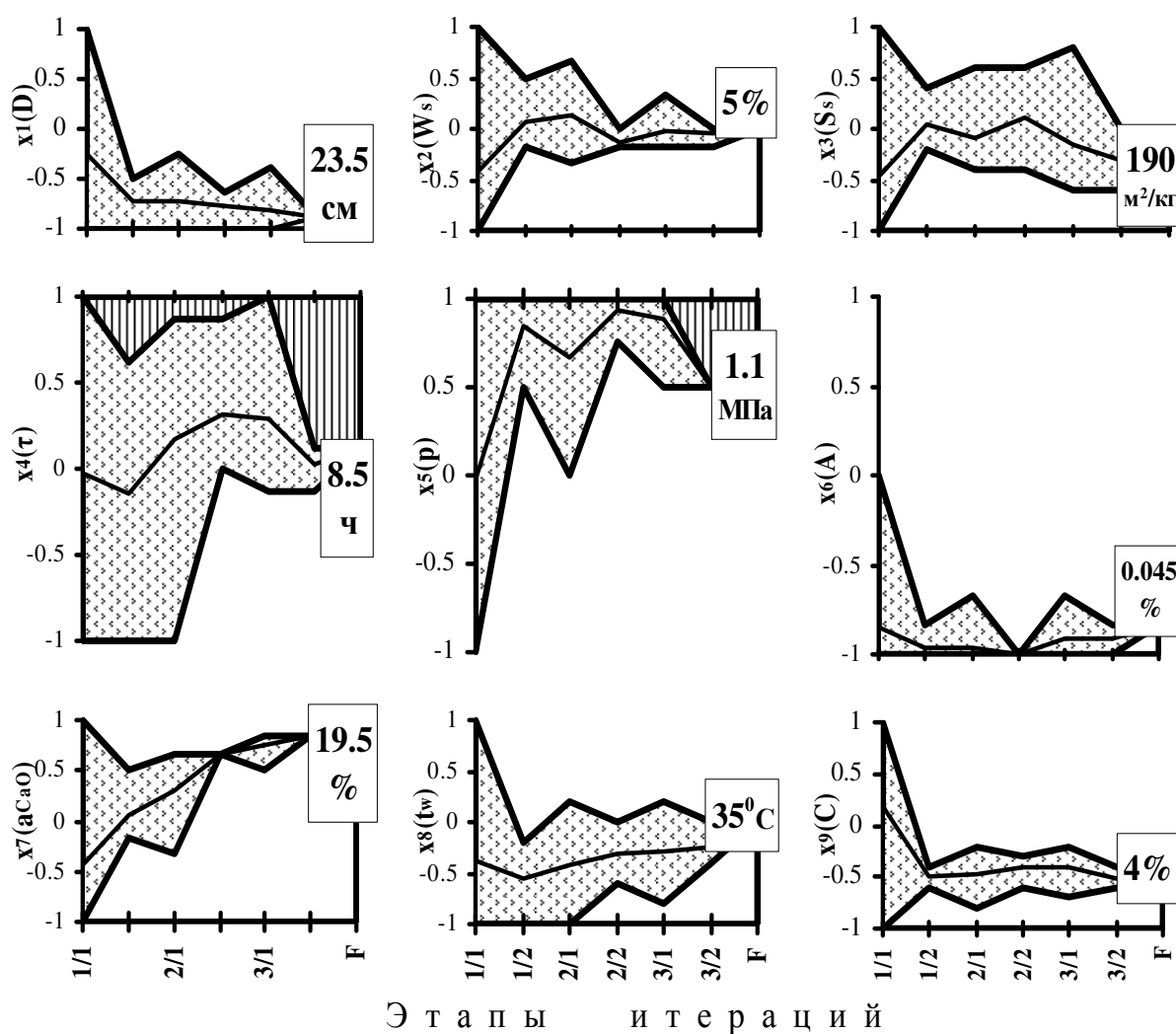


Рис. 2. Изменения диапазонов РТ-факторов при поиске компромиссного решения

Поэтому целесообразно на следующей итерации расширить суженные диапазоны хотя бы на одну ступень  $h\{x_i\}$  за каждую границу.

На этапе «2/0» в расширенных диапазонах вновь генерируются  $N_g = 10000$  случайных РТ-вариантов, к которым добавляются  $N_{1/2} = 5$  лучших вариантов 1-ой итерации.

На этапе «2/1» (и 1-ых этапах дальнейших итераций) исключаются не только варианты, не удовлетворяющие нормативам (по  $\gamma$  и  $R_c$ ), но и те, у которых уровни критериев оптимальности ( $\lambda$  и  $H$ ) хуже полученных на предыдущей итерации.

Далее процедура повторяется. По мере сокращения для всех критериев качества диапазонов компромисса (до 7-10%) целесообразно дополнительно использовать возможность снизить расход ресурсов, в частности, по энергоемким факторам. В данной задаче на этапе «3/2» минимизировались время выдержки  $\tau$  и давление в автоклаве  $p$  (факторы  $x_4$  и  $x_5$ ), практически без снижения уровня критериев качества. Верхние границы диапазонов ДК<sub>3/1</sub> (содержащих 63 варианта технологии) удалось снизить на 3.5 ч и 0.1 МПа соответственно. В результате в диапазонах компромисса ДК<sub>3/2</sub> осталось  $N_{3/2} = 4$  конкурирующих решения. Показатели эффективности компромиссной оптимизации – по теплопроводности  $E\{\lambda\} = 0.81$ , по вязкости разрушения  $E\{H\} = 0.83$  (причем возросли и контролируемые свойства –  $E\{R_b\} = 0.70$  и  $E\{e\} = 0.68$ ).

Оставшиеся на последнем этапе 4 варианта с инженерной точки зрения равноценны. Выбор между ними окончательного варианта «F» субъективен, если не вводить новые дополнительные критерии.

**Заключение.** Выбранный рецептурно-технологический вариант позволяет получить конкурентоспособный газосиликат марки D800 ( $\gamma = 744 \text{ кг/м}^3$ ), класса B5 ( $R_c = 9.0$  МПа), при оптимизированных уровнях (рис. 1) коэффициента теплопроводности  $\lambda = 152 \text{ мВт/(м·К)}$  и вязкости разрушения  $H = 2.9 \text{ кДж/м}^3$  (характеризующей трещиностойкость).

Эти уровни критериев качества соответствуют РТ-варианту с пониженной энергоемкостью (рис. 2): растекаемость смеси  $D = 23.5 \text{ см}$ ; влажность песка при помоле с известью  $w_s = 5\%$ ; удельная поверхность песка  $S_s = 190 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; время изотермической выдержки  $\tau = 8.5 \text{ час}$ ; давление пара в автоклаве  $p = 1.1 \text{ МПа}$ ; дозировка алюминиевой пудры  $A = 0.045\%$ ; активность смеси  $a_{CaO} = 19.5\%$ ; температура воды затворения  $t_w = 35^\circ\text{C}$  и количество цемента  $C = 4\%$ .

### Литература

1. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 стр.
2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Рецептурно-технологические поля свойств материала в компьютерном строительном материаловедении // Строительные материалы. – 2006, №3 – Приложение: Наука №7. – С. 8-11.
3. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я. Иванов, И. Николов: – К.: Будивельник, 1989. – 240 с.
4. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – К.: Выща школа, 1989. – 328 с.
5. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Гаврилюк В.П. Компромиссная оптимизация свойств газосиликата при дискретных равномерно распределенных уровнях девяти рецептурно-технологических факторов // Вісник Донбас. ДАБА. Сучасні будівельні матеріали. – Макіївка: Донбас. ДАБА, 2009. – Вип. 2009-1 (75). – С. 139-145.
6. Автоклавный газобетон: Девятифакторное квадратичное моделирование (1981-85) и компьютерное материаловедение (2007-08) / В.А. Вознесенський, В.П. Гаврилюк, В.Я. Керш и др. // Компьютерное материаловедение и прогрессивные технологии: Мат-лы междунаrod. семинара МОК'47. – Одесса: Астропринт, 2008. – С. 97-104.

УДК 666.92:517.9

Комп'ютерний пошук компромісу між теплопровідністю, механічними властивостями та енергоємністю ніздрюватих матеріалів/ Вознесенський В.А., Ляшенко Т., В., Гаврилюк В.П. // Збірник Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2009. – №1(31). – С. ...-...: табл. 1; рис. 2. Библиограф.: 6 назв.

Подана компромісна оптимізація ніздрюватого матеріалу методом ітераційного випадкового сканування полів властивостей в 9 рецептурно-технологічних координатах. Для газобетону D800 і B5 компромісно максимізовано в'язкість руйнування і мінімізовано коефіцієнт теплопровідності. Додатково знижено два енерговитратних фактори – час ізотермічної витримки і тиск в автоклаві.

УДК 666.92:517.9

Компьютерный поиск компромисса между теплопроводностью, механическими свойствами и энергоемкостью ячеистых материалов / Вознесенский В.А., Ляшенко Т., В., Гаврилюк В.П. // Збірник Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2009. – №1(31). – С. ...-...: табл. 1; рис. 2. Библиограф.: 6 назв.

Представлена компромиссная оптимизация свойств ячеистого материала методом итерационного случайного сканирования полей свойств в 9 рецептурно-технологических координатах. Для газобетона D800 и B5 компромиссно максимизирована вязкость разрушения и минимизирован коэффициент теплопроводности. Дополнительно снижены два энергозатратных фактора – время изотермической выдержки и давление в автоклаве.

UDK 666.92:517.9

Computer-aided search for compromise between heat conductivity, mechanical properties, and energy consumption of cellular materials / V. Voznesensky, T. Lyashenko, V. Gavriiliuk // Збірник Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2009. – №1(31). – P. ...-...: tabl. 1; fig. 2. Refs.: 6 titles.

Compromise optimisation of cellular material properties with iterative random scanning of property fields in 9 composition-process co-ordinates is presented. For autoclaved aerated concrete of mark 800 and class 5 the compromise between maximal toughness and minimal coefficient of heat conductivity has been found. Additionally reduced have been time of isothermal heating and steam pressure in autoclave.