

**Компромиссная оптимизация свойств газосиликата  
при дискретных равномерно распределенных уровнях  
девяяти рецептурно-технологических факторов**

Проанализированы основные элементы алгоритма компромиссной оптимизации методом итерационного случайного сканирования многофакторных полей свойств материала при дискретном равномерном распределении 9 рецептурно-технологических факторов. Компромиссно максимизированы прочность на изгиб и деформативность, определяющие трещиностойкость автоклавного ячеистого бетона, и минимизирован коэффициент теплопроводности, при выполнении нормативных требований по плотности (марка D800) и прочности на сжатие (класс B5). На заключительной итерации дополнительно минимизированы два энергозатратных фактора – время изотермической выдержки и давление в автоклаве.

**газосиликат, физико-механические свойства, поиск компромисса, многофакторное поле свойства, случайное сканирование, равномерное дискретное распределение, итерационный процесс**

**Введение.** Среди множества исследований строительных материалов, выполненных с использованием многофакторного экспериментально-статистического (ЭС) моделирования, есть уникальные (по рабочим гипотезам, проведению эксперимента, измерительным системам...). Однако из полученных моделей не могла быть достаточно полно извлечена полезная информация (из-за отсутствия методического и программного обеспечения и соответствующей вычислительной техники). Учитывая, что воспроизведение таких экспериментов маловероятно (при нынешних ресурсах), целесообразно возвращаться к комплексам построенных моделей, используя методы компьютерного строительного материаловедения, в частности, методологию рецептурно-технологических (РТ) полей свойств материалов [1, 2].

Поиск компромиссных оптимальных РТ-решений методом итерационного случайного сканирования полей свойств уже дал нетривиальные результаты при исследовании сухих строительных смесей [3], шлакощелочных вяжущих [4, 5], газосиликата [6], модифицированных полимерных композитов [7] и других многокомпонентных систем.

В данной работе использована новая версия поиска компромиссного оптимума. В предыдущих версиях в вычислительных экспериментах генерировались уровни РТ-факторов, распределенные по непрерывному равномерному закону (в интервалах от -1 до +1). Представляется целесообразным (в частности, при большой размерности области полей) перейти от непрерывных к дискретным равномерным распределениям, генерируя в тех же

диапазонах только те уровни, которые «технологически допустимы» при регулировании факторов.

**Условия эксперимента и моделирование.** Комплексное исследование влияния девяти РТ-факторов на свойства и структуру автоклавного газобетона выполнено совместно кафедрой ПАТСМ ОИСИ (ОГАСА) и НИПИСиликатобетон МПСМ СССР. Это сотрудничество обеспечило [6] получение уникального информационного массива. С одной стороны, выполнено обоснованное управление изготовлением газобетонных блоков по 56 технологическим регламентам в производственных условиях, и тщательно определены в специализированной лаборатории физико-механические характеристики материала (около десяти). С другой – определены (методом лазерной порометрии – а.с. ОИСИ) параметры порового пространства газосиликата и его теплофизические характеристики; по данным натурного эксперимента корректно построены квадратичные 9-факторные ЭС-модели. Специально синтезированный план эксперимента (56 РТ-вариантов) основан на схеме Рехтшафнера [6]; он близок к насыщенному и несимметричен, но «заменяет» планы полного факторного эксперимента  $2^k$  и  $3^k$ , содержащие при числе факторов  $k = 9$  соответственно 512 и 19683 опытов.

В табл. 1 указаны диапазоны варьирования РТ-факторов  $X_0 \pm \Delta X$  в натурном эксперименте, которые достаточно строго выдерживались с доступной при опытном производстве газосиликата точностью; при нарушении регламента блоки не рассматривались как экспериментальные и процесс повторялся. В дополнение к типовой информации о факторах в табл. 1 приведены две величины, необходимые для выполнения вычислительных экспериментов при дискретных равномерно распределенных уровнях нормализованных факторов  $x_1, \dots, x_9 \leq |1|$ . На первой итерации верхний и нижний уровни регулирования фактора соответствуют  $x_i = \pm 1$ . Между ними располагаются промежуточные уровни, в частности, через равные ступени размером  $h_i$ , который определяется в конкретном вычислительном эксперименте для каждого фактора возможностями производственных систем регулирования и на основе инженерной логики (опыта). На первой итерации число возможных значений  $i$ -го фактора равно  $m_1(x_i) = 1 + 2/h_i$ ; вероятность появления каждого из значений  $p_1(x_i) = 1/m_1(x_i)$ . Общее число конкурирующих РТ-вариантов производства газосиликата (узлов решетки дискретного равномерного 9-мерного распределения в соответствии с табл. 1) составляет  $17 \times 13 \times \dots \times 11 = 14\,520\,282\,777$ . На следующих итерациях число вариантов, как правило, резко снижается – оно равно произведению количеств уровней каждого фактора, оказывающихся в суженной области поиска.

Из газосиликатных блоков, изготовленных по 56 регламентам, выпиливались образцы сечением  $4 \times 4$  см. Экспериментально определены многочисленные прямые и косвенные

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

Индекс	Рецептурно-технологический фактор	Единица измерения	Обозначение	Натурный эксперимент		Вычислительный эксперимент	
				Центральное значение фактора $X_0$	Интервал варьирования $\Delta X$	Размер ступени $h$	Число уровней $m_i$
1	Растекаемость растворной смеси по Сутгарду	см	D	27	4	0.5	17
2	Влажность песка при совместном помоле с известью	%	$w_s$	5	3	0.5	13
3	Удельная поверхность песка	$m^2/kg$	$S_s$	250	100	20	11
4	Изотермическая выдержка в автоклаве	час	$\tau$	8	4	0.5	17
5	Рабочее давление пара в автоклаве	МПа	p	1	0.2	0.05	9
6	Добавка алюминиевой пудры (от массы сухих материалов)	%	A	0.07	0.03	0.005	13
7	Активность смеси (содержание СаО в смеси извести и песка)	%	$a_{CaO}$	17	3	0.5	13
8	Температура воды затворения	$^{\circ}C$	$t_w$	35	10	2	11
9	Количество цемента (от всей смеси)	%	C	10	10	1	21

(симплексные) критерии качества газосиликата и параметры поровой структуры. Это, в частности, плотность  $\gamma$  ( $kg/m^3$ ), коэффициент теплопроводности  $\lambda$  ( $mWt/m/K$ ), пределы прочности (МПа) при сжатии и изгибе  $R_c$  и  $R_b$ , а также предельная деформативность при изгибе  $\epsilon$  ( $mm/m$ ) – свойства  $Y$ . Для них построен комплекс квадратичных полиномиальных ЭС-моделей [6], допущенных для инженерного анализа и вычислительных экспериментов после исключения (при последовательном регрессионном анализе) из 55 оценок коэффициентов всех статистически незначимых. Так в модели (1) для прочности при изгибе осталось 42 значимых коэффициента. Вместе с аналогичными моделями для 4 других критериев эта модель используется при решении задачи компромиссной оптимизации свойств газосиликата марки D800 (ограничение по плотности  $751 \leq \gamma \leq 850$ ) и класса B5

$$\begin{aligned}
 R_b = & 1.92 \\
 & +0.06x_1 + 0 x_1^2 + 0 x_1x_2 + 0 x_1x_3 -0.10x_1x_4 -0.08x_1x_5 -0.03x_1x_6 + 0 x_1x_7 + 0 x_1x_8 +0.03x_1x_9 \\
 & +0.12x_2 -0.33x_2^2 + 0 x_2x_3 -0.03x_2x_4 +0.03x_2x_5 +0.03x_2x_6 -0.04x_2x_7 + 0 x_2x_8 -0.03x_2x_9 \\
 & +0.13x_3 + 0 x_3^2 -0.08x_3x_4 -0.02x_3x_5 +0.09x_3x_6 + 0 x_3x_7 +0.02x_3x_8 +0.03x_3x_9 \\
 & +0.07x_4 +0.13x_4^2 -0.15x_4x_5 -0.04x_4x_6 +0.15x_4x_7 +0.02x_4x_8 +0.04x_4x_9 \\
 & +0.05x_5 -0.10x_5^2 -0.05x_5x_6 +0.09x_5x_7 + 0 x_5x_8 +0.04x_5x_9 \\
 & -0.50x_6 + 0 x_6^2 + 0 x_6x_7 +0.05x_6x_8 -0.10x_6x_9 \\
 & +0.03x_7 +0.26x_7^2 -0.06x_7x_8 -0.13x_7x_9 \\
 & -0.07x_8 +0.13x_8^2 +0.01x_8x_9 \\
 & +0.22x_9 + 0 x_9^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

(ограничение по прочности на сжатие  $6.4 \leq R_c \leq 9.6$ ). Максимизируются  $R_b$  и  $\varepsilon$ , определяющие трещиностойкость газобетона, минимизируется коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , а также уровни двух энергозатратных факторов автоклавной технологии,  $\tau$  ( $x_4$ ) и  $p$  ( $x_5$ ).

**Основные элементы алгоритма компромиссной оптимизации методом случайного сканирования многофакторных полей свойств материала при дискретном равномерном распределении уровней РТ-факторов.** Содержание и связи основных звеньев алгоритма можно кратко проанализировать, следя в ходе компромиссной оптимизации за изменением одного фактора, в частности, времени  $\tau$  изотермической выдержки в автоклаве ( $x_4$ ), и одного критерия качества, в частности, прочности  $R_b$ .

1. На исходном (нулевом) этапе первой итерации (1/0) генерируются по  $N^*$  случайных чисел, распределенных по дискретному равномерному закону в полных диапазонах каждого фактора  $-1 \leq x_i \leq +1$  В частности, значения четвертого фактора – времени выдержки в автоклаве, регулируемого на 17 уровнях через  $h\{\tau\} = 0.5$  ч (табл. 1), генерируются с равной вероятностью  $p(x_4) = 1/17 = 0.059$  (табл. 2).

Таблица 2. Уровни времени изотермической выдержки и их вероятности на этапах поиска

Уровни регулирования фактора (времени выдержки в автоклаве)			Этапы итераций						
			1/0	1/2	2/0	2/2	3/0	3/2	F
Номер уровня	Натуральный $X_4$	Нормализованный $x_4$	Вероятность $p_1(x_4) = 1/17$	Уровни регулирования $x_4$ ( $RC_1$ )	Вероятность $p_2(x_4) = 1/11$	Уровни регулирования $x_4$ ( $RC_2$ )	Вероятность $p_3(x_4) = 1/4$	Уровни регулирования $x_4$ ( $RC_3$ )	Компромиссный оптимальный уровень $F\{x_4\}$
17	12	1	<b>0.059</b>						
16	11.5	0.875	<b>0.059</b>		<b>0.091</b>				
15	11	0.75	<b>0.059</b>		<b>0.091</b>				
14	10.5	0.625	<b>0.059</b>		<b>0.091</b>		<b>0.25</b>		
13	10	0.5	<b>0.059</b>		<b>0.091</b>		<b>0.25</b>		
12	9.5	0.375	<b>0.059</b>		<b>0.091</b>		<b>0.25</b>		
11	9	0.25	<b>0.059</b>		<b>0.091</b>		<b>0.25</b>		
...	...	...	...	...	...				
7	7	-0.25	<b>0.059</b>		<b>0.091</b>				
6	6.5	-0.375	<b>0.059</b>		<b>0.091</b>				
...	...	...	...						
1	4	-1	<b>0.059</b>						

К случайным точкам (РТ-вариантам) добавляются  $2^k$  вершин  $k$ -мерного куба ( $x_i = \pm 1$ ). Это необходимо, поскольку вероятность попадания в вершину менее  $1/(1.4 \cdot 10^{10})$ , то есть практически равна нулю, а именно в вершинах могут находиться инженерно полезные экстремумы линейных и параболических сечений поверхностей отклика  $Y$ . В данной задаче генерировано  $N^* = 10000$  и добавлено  $2^9 = 512$  вершин, то есть, на этапе 1/0 конкурируют  $N_{1/0} = N^* + 2^k = 10512$  вариантов (более чем в миллион раз меньше числа равновозможных вариантов по табл. 1).

По ЭС-моделям для этих вариантов определяются уровни сканируемых полей каждого из критериев качества ( $\gamma, R_c, \lambda, R_b, \epsilon$ ), и таким образом оказывается сформированной матрица результатов вычислительного эксперимента (МРВЭ).

2. На следующем этапе (1/1) строки МРВЭ сортируются, сначала по плотности, и удаляются те, в которых газосиликат не отвечает марке D800 (коридор  $751 \leq \gamma \leq 850$  кг/м<sup>3</sup>). Далее сортировка проводится по прочности на сжатие, и дополнительно удаляются строки, в которых не обеспечен класс В5 ( $6.4 \leq R_c \leq 9.4$  МПа). После выполнения нормативных ограничений (по  $\gamma$  и  $R_c$ ) для поиска компромиссного оптимума остается область допустимых решений (в данной задаче содержащая  $N_{1/1} = 516$  вариантов). В ней каждый из трех оптимизируемых критериев оказывается ограниченным в диапазоне  $RPV\{Y\}$  (*Range of Possible Values*). Так для прочности на изгиб  $RPV\{R_b\} = 3.1 - 1.2 = 1.9$  МПа (рис. 1); если удастся продвинуться хотя бы на половину диапазона, то этот критерий качества, возрастет почти вдвое. Достаточно перспективна компромиссная оптимизация по двум другим критериям (рис. 2),  $RPV\{\epsilon\} = 1.43 - 0.13 = 1.30$  мм/м и  $RPV\{\lambda\} = 211 - 141 = 70$  мВт/(м·К).

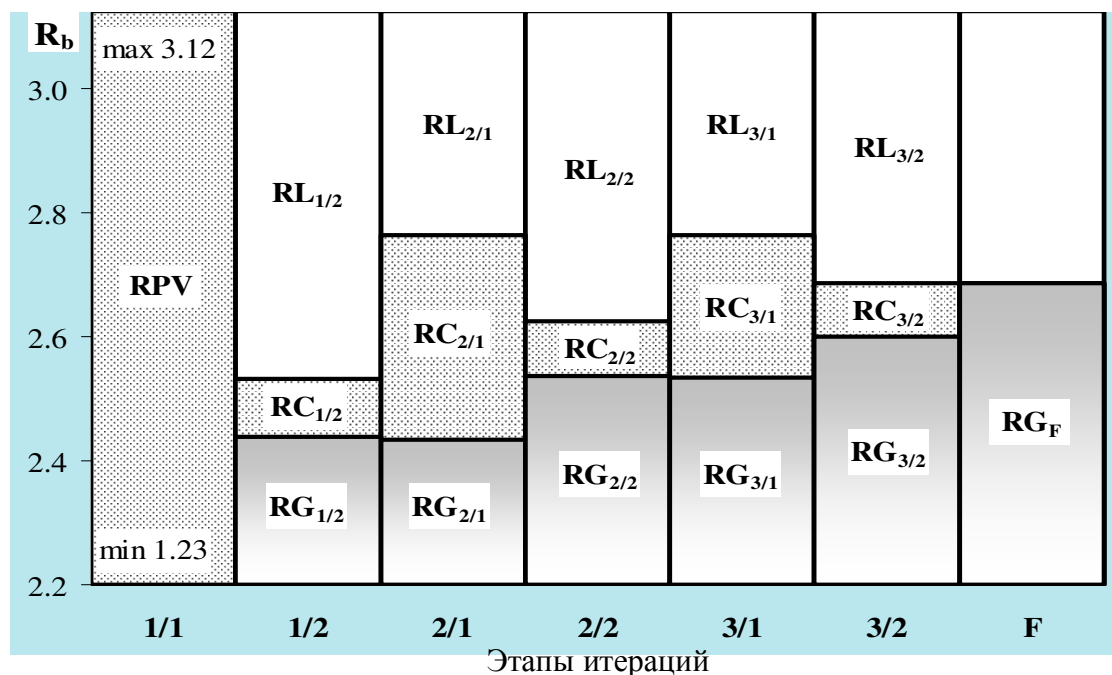


Рисунок 1. Диапазоны возможных значений (RPV), компромисса (RC), потерь (RL) и выигрыша (RG) для прочности при изгибе  $R_b$

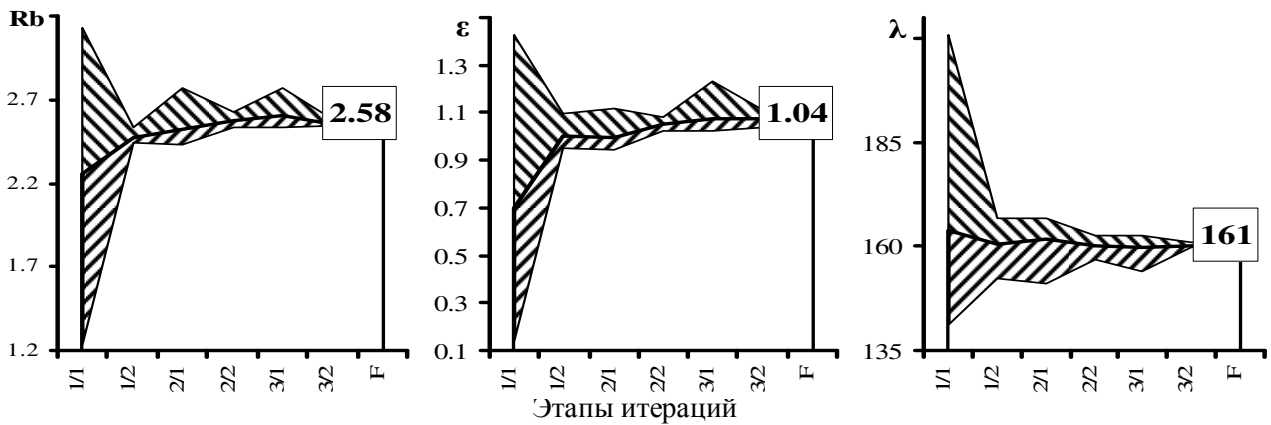


Рисунок 2. Диапазоны критериев оптимальности при поиске компромиссного оптимума

3. В результате исключения «неудовлетворительных решений» по двум критериям-ограничениям для 9 факторов образуются 9 диапазонов допустимых решений RAS  $\{x_i\}$  (*Range of Admissible Solutions*). Из графиков на рис. 3 ясно, что 8 из 9 факторов, в том числе показанное в табл. 2 время выдержки в автоклаве, на этапе 1/1 сохраняют значения во всем диапазоне варьирования, от -1 до +1; лишь для содержания газообразователя RAS  $\{x_6\}$  вдвое уже – среди 516 оставшихся вариантов нет ни одного, где  $x_6 > 0$ .

4. На заключительном этапе «1/2» первой итерации осуществляется улучшение каждого из критериев оптимальности внутри диапазонов возможных значений, от худшего

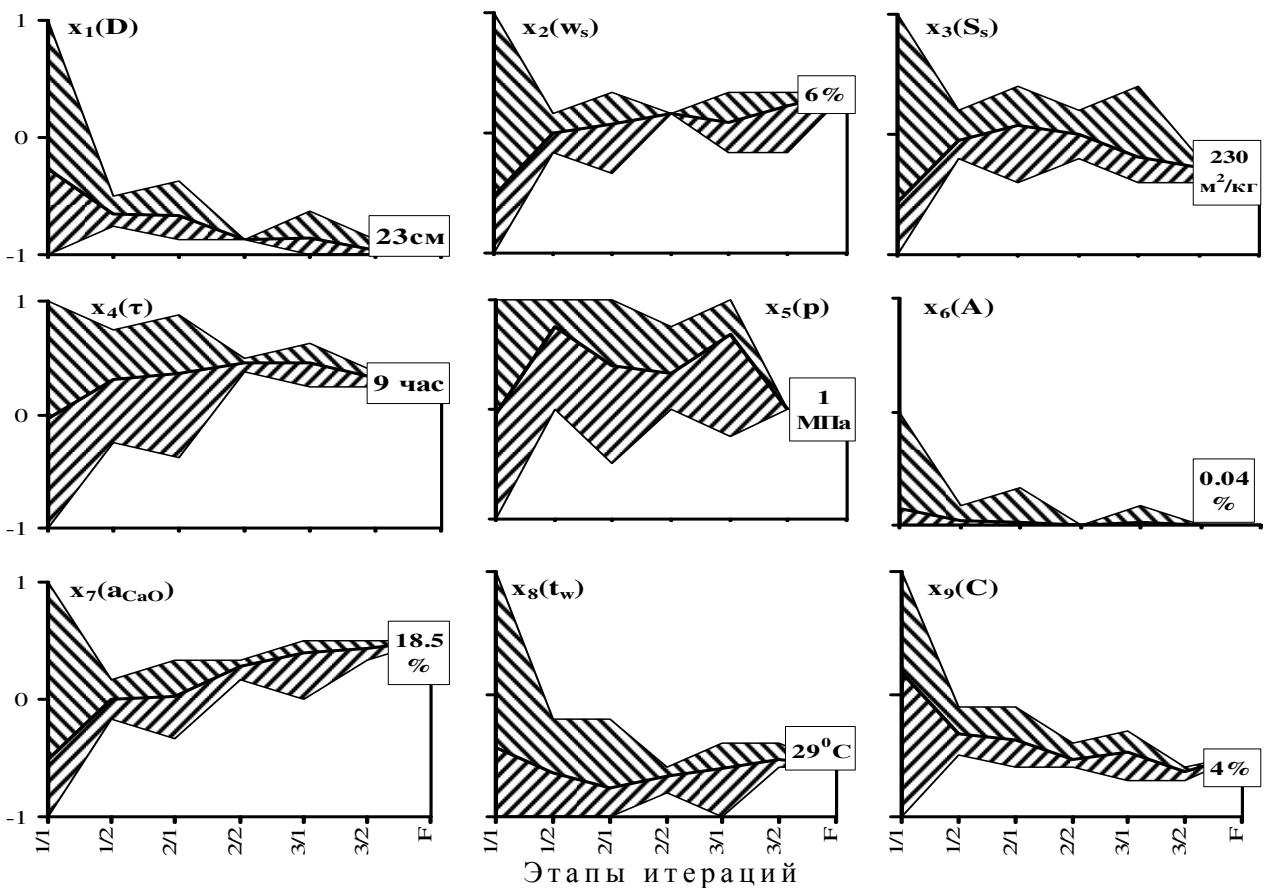


Рисунок 3. Диапазоны факторов при поиске компромиссно оптимального РТ-решения

уровня ( $R_b = 1.2$ ,  $\varepsilon = 0.13$ ,  $\lambda = 211$ ) к лучшему ( $R_b = 3.1$ ,  $\varepsilon = 1.43$ ,  $\lambda = 141$ ). Полученные на этапе 1/1 диапазоны  $RPV\{Y\}$  распадаются на три линейно связанных диапазона (рис. 1): целенаправленно расширяемый диапазон выигрыша  $RG\{Y\}$  (*Range of Gain*) и диапазон потерь  $RL\{Y\}$  (*Range of Losses*), а между ними «пульсирующий» диапазон компромисса  $RC\{Y\}$  (*Range of Compromise*). Улучшение пошаговое. Начальные шаги могут быть достаточно большие (до 0.3-0.5  $RPV$ ), но по мере приближения к границе  $RC$  они уменьшаются (до 0.01  $RPV$ ). Когда в  $RC$  остается 2-7 вариантов, дальнейшее сокращение столь малого диапазона теряет смысл и движение прекращается. В данной задаче число вариантов, оставшихся в зоне компромисса после 1-ой итерации  $N_{1/2} = 4$ .

Показатель эффективности оптимизации по прочности на изгиб после первой итерации  $E_1\{R_b\} = (RG/RPV)_1 = (2.44-1.23)/1.9 = 0.64$ . Поскольку на первой итерации не были назначены приоритеты критериев, то  $E_1\{\varepsilon\}$  и  $E_1\{\lambda\}$  имеют практически тот же уровень. Однако значения другого полезного показателя – относительного размера диапазона компромисса  $C_1\{Y\} = (RC/RPV)$ , который позволяет ориентироваться в возможностях улучшения трех критериев качества на последующих итерациях, существенно различны. Наименьший  $C_1\{R_b\} = 0.05$ , вдвое выше  $C_1\{\varepsilon\} = 0.11$  и максимальный  $C_1\{\lambda\} = 0.20$ .

5. В результате 1-ой итерации диапазоны РТ-факторов сузились по сравнению с исходными  $RAS\{x_i\} = x_{i,max} - x_{i,min}$ . Так, для анализируемого в табл. 2 времени выдержки в автоклаве ( $x_4$ ) из 17 уровней регулирования допустимы только 9. Еще в большей степени сократились (рис. 3), в частности, диапазоны расхода газообразователя ( $x_6$ ) и цемента ( $x_9$ ).

Диапазоны определены при случайном сканировании  $k$ -факторных полей, и число случайных вариантов, как правило, много меньше числа узлов  $k$ -мерной решетки уровней факторов. Однако вблизи границ диапазонов может находиться немало РТ-вариантов с полезным сочетанием значений критериев качества материала и/или с пониженным расходом энергоресурсов. Поэтому укоротившиеся диапазоны должны быть расширены на следующей итерации на 1-2 ступени за каждую границу.

Диапазон фактора  $x_4$  (табл. 2) для новой итерации расширен на одну ступень в каждую сторону и включает  $m_2\{x_4\} = 9+2=11$  уровней регулирования. В таких новых диапазонах для каждого фактора на этапе 2/0 снова генерируется  $N^* = 10000$  дискретных равномерно распределенных значений с вероятностями  $p_2 = 1/m_2(x_i)$ , обусловленными числом возможных на этой итерации уровней регулирования. Так, значения  $x_4$  (табл. 2) на этапе 2/0 генерируются с равной вероятностью  $p_2\{x_4\} = 1/11 = 0.091$ . Для рассмотрения на следующем этапе 2/1 к новым 10000 вариантам, генерированным в факторной области меньшего размера, добавляются 4 результата первой итерации ( $N_{2/0} = 10004$ ).

6. На этапе 2/1 исключаются не только РТ-варианты, недопустимые по нормативным

ограничениям  $\gamma$  и  $R_c$ . На этом и аналогичных 1-ых этапах последующих итераций дополнительно по каждому из критериев компромиссной оптимизации ( $R_b$ ,  $\varepsilon$  и  $\lambda$ ) последовательно проводится ранжирование и удаление тех РТ-вариантов, где эти свойства хуже, чем полученные на предыдущей итерации. В силу этих новых ограничений (нижние границы  $R_b=2.44$  и  $\varepsilon=0.95$ , верхняя граница  $\lambda=167$ ) диапазоны выигрыша двух пограничных этапов равны между собой,  $RG_{1/2}=RG_{2/1}$  (рис. 1). При этом под влиянием целенаправленного расширения диапазонов РТ-факторов (табл. 2 для  $x_4$  и рис 2. для всех  $x_i$ ) диапазоны возможных компромиссных значений критериев изменяются в сторону увеличения,  $RC_{2/1} \geq RC_{1/2}$  (рис. 1).

7. Далее процедура повторяется (п. 4-6). По мере сокращения относительного размера диапазонов компромисса  $C\{Y\} = (RC/RPV)$  для всех критериев качества (до 7-10%) целесообразно при поиске компромиссных оптимальных решений дополнительно учитывать возможность сократить расход ресурсов, в частности, по энергоемким РТ-факторам. В данной задаче на этапе 3/2 дополнительно минимизировались время выдержки  $x_4(\tau)$  и давление в автоклаве  $x_5(p)$ . Верхние границы диапазонов  $RC_{3/1}$  (содержащих 244 варианта технологии) удалось снизить на 1.5 ч и 0.1 МПа соответственно. В результате в диапазонах компромисса  $RC_{3/2}$  осталось  $N_{3/2} = 3$  конкурирующих варианта. Показатели компромиссной оптимизации по трем критериям качества достаточно высокие – по прочности  $E_3\{R_b\} = 0.69$  и  $C_3\{R_b\} = 0.02$ , по деформативности  $E_3\{\varepsilon\} = 0.70$  и  $C_3\{\varepsilon\} = 0.05$ , по теплопроводности  $E_3\{\lambda\} = 0.72$  и  $C_3\{\lambda\} = 0.02$ .

8. Оставшиеся на последнем этапе 3 варианта с инженерной точки зрения равноценны. Выбор между ними окончательного варианта F субъективен, если для выбора не вводить новые дополнительные критерии.

**Результаты компромиссной оптимизации.** Выбранный вариант позволяет получить газосиликат марки D800 ( $\gamma = 761 \text{ кг/м}^3$ ) класса B5 ( $R_c = 8.9 \text{ МПа}$ ) при оптимизированных уровнях (рис. 2) прочности на изгиб  $R_b = 2.6 \text{ МПа}$ , предельной деформативности при изгибе  $\varepsilon = 1.04 \text{ мм/м}$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda = 161 \text{ мВт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Эти уровни критериев качества соответствуют следующему РТ-регламенту (рис. 3): растекаемость смеси  $D = 23 \text{ см}$ ; влажность песка при помоле с известью  $w_s = 6\%$ ; удельная поверхность песка  $S_s = 230 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; изотермическая выдержка  $\tau = 9 \text{ час}$ ; давление пара в автоклаве  $p = 1 \text{ МПа}$ ; добавка алюминиевой пудры  $A = 0.04\%$ ; активность смеси  $a_{CaO} = 18.5\%$ ; температура воды затворения  $t_w = 29^\circ\text{C}$ ; количество цемента  $C = 4\%$ .

**Заключение.** Реализация нового алгоритма поиска компромиссных оптимальных решений для газосиликата марки D800 класса B5 позволило при выполнении нормативов улучшить три критерия качества  $R_b$ ,  $\varepsilon$  и  $\lambda$  примерно на 70% диапазонов возможных значений



(потери по сравнению с индивидуальными оптимумами составили соответственно 17, 27 и 14%). При этом компромиссно снижены уровни энергоемких факторов, определяющих режим автоклавной обработки.

Алгоритм компромиссной оптимизации при дискретных уровнях РТ-факторов более приспособлен и комфортен для того, чтобы технолог в режиме диалога с компьютером мог гибко адаптировать параметры поиска к изменениям условий задачи.

Алгоритм эффективен, имеет внутреннюю логику и может быть рекомендован (вне зависимости от количества критериев оптимизации) для поиска компромисса на рецептурно-технологических полях свойств при большой размерности факторной области ( $k \geq 5$ ), особенно с ресурсоемкими факторами, требующими целенаправленной минимизации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Voznesensky V., Lyashenko T., Sokha V., Karapuzov E. Search for optimal compromise compositions of fibrous polymer-cement dry mixes with computational materials science methods. Proc. 16 Ibausil. – Weimar, 2006. – V. 2. – P. 2-0327-0334.
4. Lyashenko T., Voznesensky V. Compromise optimization of slag alkaline binders with computational materials science methods. Alkali Activated Materials – Research, Production and Utilization. Proc. Int. Conf. – Prague, CRA, 2007. – P. 447-458.
5. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих (максимизация прочности и морозостойкости, минимизация расхода ресурса). – Современное промышленное и гражданское строительство. – 2007, т. 3, №1. – С. 5-15.
6. Вознесенский В.А., Гаврилюк В.П., Керш В.Я., Ляшенко Т.В., Ткачук А.В., Хлыцов Н.В. Автоклавный газобетон: Девятифакторное квадратичное моделирование (1981-85) и компьютерное моделирование (2007-08) // Компьютерное моделирование и прогрессивные технологии: Мат-лы международ. семинара МОК'47. – Одесса: Астропринт, 2008. – С. 97-104.
7. Lyashenko T., Gara A., Podagelis I., Gailiene I. Epoxy compositions for protecting road structure units in contact with water-oil mixtures. Environmental Engineering. Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. – Vilnius, 2008. – V. 3. – P. 1186-1192.

**Вознесенский Виталий Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов в технологии строительных материалов (ПАТСМ) Одесской государственной академии строительства и архитектуры (ОГАСА), заслуженный деятель науки и техники Украины, действительный член Международной инженерной академии (МИА) и председатель Научного совета по компьютерному материаловедению МИА.

**Ляшенко Татьяна Васильевна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной и вычислительной математики и САПР ОГАСА, член-корреспондент МИА и член Научного совета по компьютерному материаловедению МИА.

**Гаврилюк Варвара Петровна** – магистр, аспирантка кафедры ПАТСМ ОГАСА.

**Вознесенський Віталій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою «Процеси та апарати в технології будівельних матеріалів» (ПАТБМ) Одеської державної академії будівництва та архітектури (ОДАБА), заслужений діяч науки і техніки України, дійсний член Міжнародної інженерної академії (МІА) і голова Наукової ради з комп'ютерного матеріалознавства МІА.

**Ляшенко Тетяна Василівна** – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної та обчислювальної математики і САПР ОДАБА, член-кореспондент МІА, член Наукової ради з комп'ютерного матеріалознавства МІА.

**Гаврилюк Варвара Петрівна** – магістр, аспірантка кафедри ПАТБМ ОДАБА.

**Voznesensky Vitaly Anatolievich** – D.Sc., Professor, head of the department “Chemical engineering in building materials technology” of Odessa State Building and Architecture Academy, Honored Science and Engineering Worker of Ukraine, Full Member of International Academy of Engineering and Chair of Scientific Council on Computational Materials Science.

**Lyashenko Tatiana Vasilievna** – D.Sc., Professor, professor at the Department of applied and computational mathematics and computer-aided design systems of Odessa State Building and Architecture Academy, Correspondent Member of International Academy of Engineering and member of the Council on Computational Materials Science.

**Gavrilyuk Varvara Petrovna** – M.Sc., post-graduate student at the department “Chemical engineering in building materials technology” of Odessa State Building and Architecture Academy.