

УДК 666.97:517.9

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПРОМИССНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ АВТОКЛАВНЫХ ГАЗОБЕТОНОВ Д-800 РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ПРОЧНОСТИ

Вознесенский В.А., Гаврилюк В.П., Ляшенко Т.В.

(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

На 9-факторных полях 5 свойств газосиликата найдены компромиссные оптимальные решения: для класса В-7.5 без ограничений на расход ресурсов и для $V \geq 2.5$ при минимизации энергозатрат.

Введение. В многокритериальных задачах материаловедения поиск компромиссных оптимальных рецептурно-технологических (РТ) решений методом итерационного случайного сканирования полей свойств материала [1] дал нетривиальные результаты при исследовании модифицированных полимерных композитов, комплексных добавок, сухих строительных смесей и других многокомпонентных систем.

Большинство задач формулировалось по версии «Q» (*Quality*), когда на РТ-факторы не накладываются никакие дополнительные прямые ограничения (кроме нормализованных границ исследуемых диапазонов, $-1 \leq x_i \leq +1$), а управление ими нацелено только на поиск компромисса между критериями качества материала. При большом числе РТ-факторов перспективно решение задач версии «QR» (*Quality+Resources*), которая в настоящее время разрабатывается и опробуется [2, 3]. Она отличается тем, что разыскиваемый компромисс определяется не только критериями качества материала, но и минимизируемыми расходами ресурсов по некоторым входящим в ЭС-модели факторам, в частности, энергоемким или удлиняющим сроки получения кондиционного материала. С математической точки зрения версии «Q», «QR» и «R» по сути не имеют различий.

В данной работе для газобетона Д-800 (плотность $750 \leq \gamma \leq 850$ кг/м³) сравниваются два варианта компромиссной оптимизации предела прочности на изгиб R_b (МПа), предельной растяжимости ϵ (мм/м) и теплопроводности λ (мВт/(м·К)): А – наивысший класс по прочности В-7.5 (предел прочности на сжатие $R_c \geq 9.64$ МПа) без ограничений на расход ресурсов; Б – соответствие минимальному нормативу по прочности (класс 2.5, экспериментальная прочность $R_c \geq 3.21$) при минимизации расхода ресурса по трем энергоемким факторам.

Условия эксперимента и моделирование. Кафедра ПАТСМ ОИСИ и НИПИСиликатобетон (Таллинн) провели комплексное исследование влияния РТ-факторов на свойства и структуру автоклавного газобетона. Такое сотрудничество обеспечило [4] с одной стороны, обоснованное управление изготовлением газобетонных блоков в производственных условиях и тщательное определение физико-механических свойств материала, с другой – определение параметров порового пространства и теплофизических характеристик газосиликата методами лазерной порометрии (а.с. ОИСИ) и построение ЭС-моделей при корректном планировании многофакторного эксперимента.

На основании экспертизы были выбраны многочисленные критерии качества готового газосиликата и его ячеистой структуры, а так же девять РТ-факторов X_i и диапазоны их варьирования в эксперименте, $X_{0,i} \pm \Delta X_i$ (табл. 1). Синтезирован 56-точечный план эксперимента со структурой Рехтшафнера, позволяющий оценить 55 коэффициентов в квадратичных ЭС-моделях. План близок к насыщенному и несимметричен, но «заменяет» планы ПФЭ 2⁹ и 3⁹, содержащие соответственно 512 и 19683 опытов.

По 56 вариантам технологии были изготовлены газосиликатные блоки, из них выпиливались образцы сечением 4×4 см. Среди критериев качества определены, в частности, уровни γ , λ , R_c , R_b и ϵ .

Таблица 1. РТ-факторы и диапазоны их варьирования

X_i	Рецептурно-технологический фактор	Обозначение	Центральный уровень $X_{0,i}$	Интервал варьирования ΔX_i
X_1	Растекаемость растворной смеси по Суттарду, см	D	27	4
X_2	Влажность песка при совместном помоле с известью, %	w_s	5	3
X_3	Удельная поверхность песка, м ² /кг	S_s	250	100
X_4	Изотермическая выдержка в автоклаве, час	τ	8	4
X_5	Рабочее давление пара в автоклаве, МПа	p	1	0.2
X_6	Дозировка алюминиевой пудры (% от сухой массы)	A	0.07	0.03
X_7	Активность смеси (содержание СаО в смеси извести и песка), %	a_{CaO}	17	3
X_8	Температура воды затворения, °С	t_w	35	10
X_9	Количество цемента (% от всей массы)	C	10	10

Построен комплекс квадратичных ЭС-моделей (табл. 2), использованных [3, 5] в вычислительных экспериментах по оценке роли факторов, поиску компромиссов и в других задачах анализа и оптимизации газосиликата.

Вариант А – наивысший класс по прочности В-7.5 без ограничений на расход ресурсов. Компромиссно минимизируется теплопроводность и максимизируются уровни свойств (R_b и ϵ), определяющих трещиностойкость газосиликата Д-800. Результаты трех итераций (по 2 этапа) показаны на рис. 1; опущены начальные этапы, на которых

Таблица 2. Оценки коэффициентов моделей для пяти свойств

b	γ	R_c	R_b	ϵ	λ	b	γ	R_c	R_b	ϵ	λ
	кг/м ³	МПа	МПа	мм/м	МВт/м·К						
b_0	621	5.38	1.92	0.86	131	b_{23}	-12	0.30		-0.02	
b_1	-30	-0.39	-0.06	0.04		b_{24}		0.22	-0.03		
b_2		0.29	0.12	0.02	5	b_{25}			0.03		
b_3	-31	-0.54	0.13		-9	b_{26}	-5		0.03		
b_4		0.18	0.07	0.03		b_{27}	-6	-0.23	-0.04		
b_5		-0.20	0.05	0.08		b_{28}	4	-0.21			
b_6	-121	-2.38	-0.50	0.04	-21	b_{29}	-3	-0.24	-0.03		
b_7	-11	0.46	0.03	-0.03		b_{34}		-0.20	-0.08	-0.02	
b_8	-21	-0.31	-0.07		-4	b_{35}		-0.43	-0.02		
b_9	24	0.96	0.22	-0.04	6	b_{36}	4	0.12	0.09	0.02	
b_{11}						b_{37}	-5				5
b_{22}	9	-0.48	-0.33	-0.13		b_{38}			0.02		-2
b_{33}	26					b_{39}		0.39	0.03	0.04	
b_{44}			0.13			b_{45}		-0.29	-0.15		
b_{55}			-0.10			b_{46}			-0.04		2
b_{66}		0.74				b_{47}		0.26	0.15	0.02	
b_{77}			0.26	0.06		b_{48}			0.02		
b_{88}			0.13		17	b_{49}			0.04	-0.02	
b_{99}	-27					b_{56}			-0.05		-3
b_{12}		0.23				b_{57}		0.53	0.09		
b_{13}	10	0.22				b_{58}					
b_{14}			-0.10	-0.02	-3	b_{59}		0.33	0.04	-0.03	
b_{15}		-0.30	-0.08			b_{67}					
b_{16}	-3		-0.03			b_{68}	7	0.18	0.05		3
b_{17}	-8	0.13				b_{69}		-0.51	-0.10	-0.03	3
b_{18}		-0.21			-4	b_{78}	8	0.19	-0.06	-0.02	3
b_{19}	-7	-0.14	0.03		4	b_{79}	14	-0.77	-0.13		
						b_{89}	-3	0.41	0.01	0.01	-5

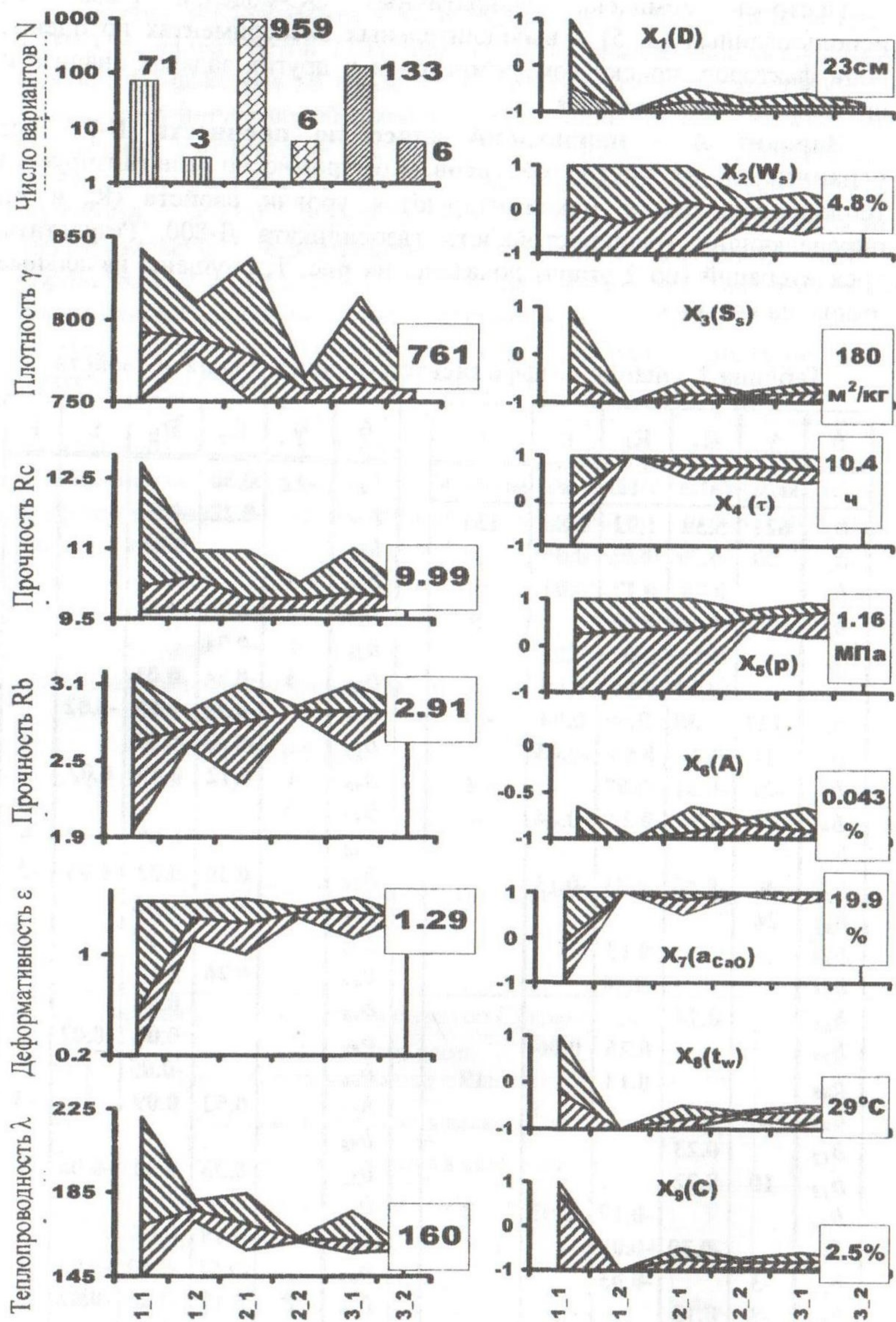


Рис. 1. Этапы оптимизации по варианту А

генерируются 10000 случайных РТ-ситуаций и 512 граничных, $x_i = \pm 1$.

На этапе «1-1» выполнены нормативы Д-800 и В=7.5 ($R_c = 9.64$ МПа) для газобетона, получаемого по 71 РТ-варианту, причем, судя по интервалам критериев качества (рис. 1, слева), в процессе поиска компромисса возможно снижение коэффициента теплопроводности λ с 221 (верхняя граница диапазона этапа «1-1») до 169 (среднее диапазона) при повышении R_b с 1.9 до 2.7 и ϵ с 0.2 до 0.5. Эти компромиссные уровни были достигнуты уже на этапе «1-2». При этом оказалось, что факторы образовали 3 группы. Первая – с полным расходом имеющегося в эксперименте ресурса, $x_i = +1$ (время выдержки в автоклаве $\tau = 12$ ч и активность смеси $a_{CaO} = 14\%$). Во вторую вошли 5 факторов, для которых целесообразен нижний уровень $x_i = -1$ (растекаемость смеси D , удельная поверхность песка S_s , количество алюминиевой пудры A и цемента C , температура воды t_w). Для двух оставшихся факторов тенденции оптимизации на первой итерации не определились.

Две следующие итерации привели к изменению всех критериев качества до лучших уровней, чем на этапе «1-2», и к уточнению значений факторов, без принципиальных изменений их уровней (рис. 1); исключение составляет x_5 (рабочее давление в автоклаве, которое приблизилось к верхнему уровню).

Таким образом, в исследованных диапазонах 9-ти факторов можно получить газосиликат Д-800 высшей марки по прочности В-7.5 с улучшенными показателями теплозащиты и трещиностойкости.

Вариант Б – соответствие нормативу прочности (не хуже В-2.5) при минимизации расхода ресурсов по энергоемким факторам. Энергоемкими факторами можно считать время изотермической выдержки в автоклаве x_4 (τ в диапазоне варьирования возрастает в три раза – табл. 1), давление пара в автоклаве x_5 (возрастает в 1.5 раза) и расход цемента x_9 (глобально энергоемкий ресурс), который достигает 20% от массы сухой смеси. Включая в задачу поиска компромисса эти 3 фактора, входящие в комплекс ЭС-моделей, нет смысла переходить к натуральным переменным X_4 , X_5 и X_9 поскольку «ценность» единицы их измерения зависит от ценовой политики, конкурентоспособности, региона... Естественно, минимизация x_4 , x_5 и x_9 (в пределе до -1) приведет к снижению качества Д-800, но нижняя граница норматива по прочности В-2.5 должна быть выполнена.

Результаты трех итераций для варианта Б показаны на рис. 2. На этапе «1-1» в связи с пониженными требованиями к классу по прочности на сжатие нормативы выполнены для большего количества РТ-ситуаций – 560. Особенность этапа «1-2» варианта «Б» в том, что уровни трех компромиссно оптимизируемых энергоемких фактора сниже-

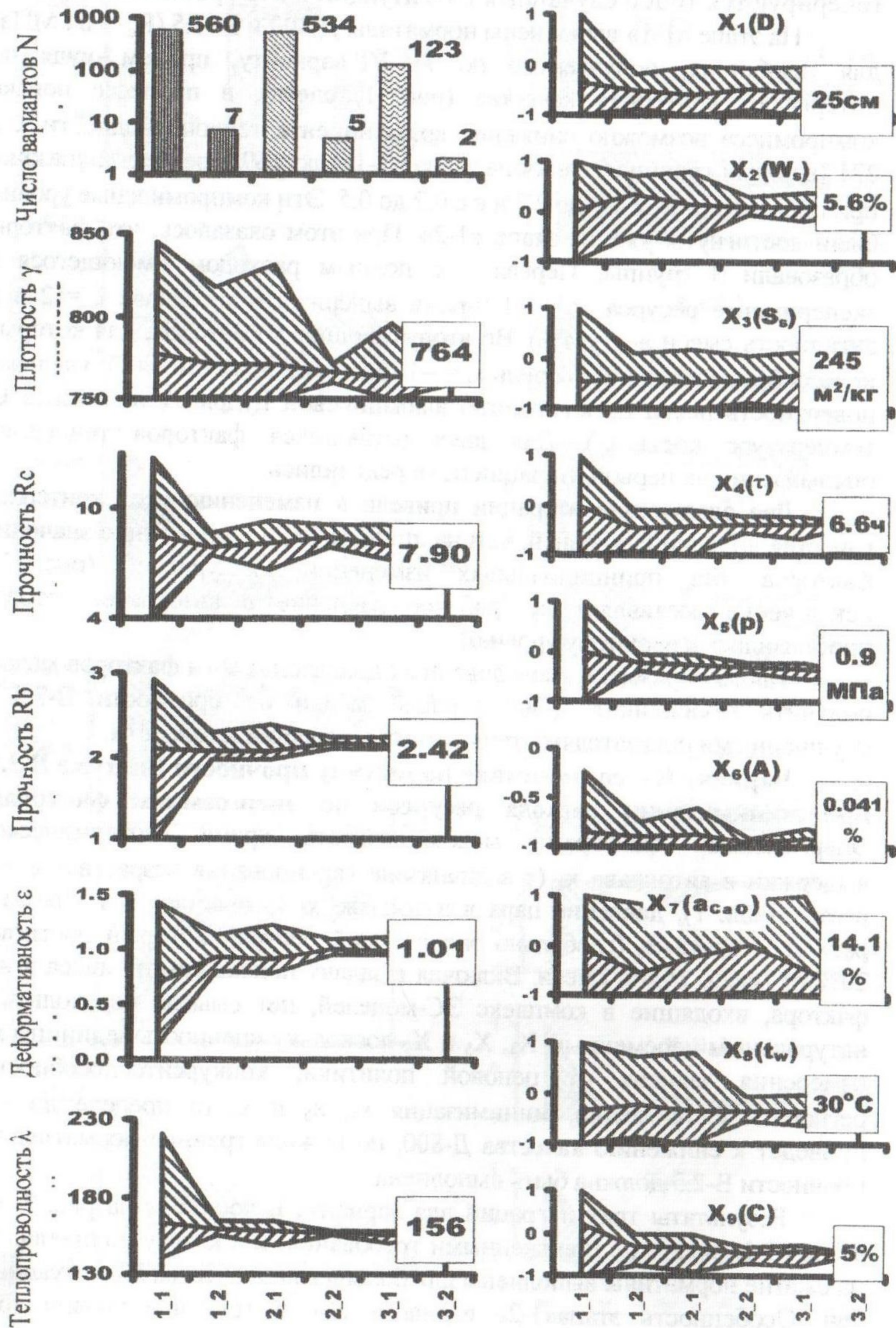


Рис. 2. Этапы оптимизации по варианту Б

ны до $x_4 = x_5 = x_9 = 0$ (в диапазоне варьирования – вдвое). При этом компромиссно улучшены уровни λ (с 221 до 164), R_b (с 1.2 до 2.3) и ε (с 0.1 до 0.7). Следует отметить, что причинно обусловленная корреляционная связь пределов прочности R_b и R_c привела к росту последнего до среднего уровня 7.9 МПа (то есть к выполнению норматива В-5).

На последующих итерациях исходные границы энергоемких факторов последовательно снижались – сначала до $x_4 = x_5 = x_9 = -0.2$, а потом до $x_4 = x_5 = x_9 = -0.3$ (справа на рис. 2), причем удалось повысить уровень критериев, связанных с трещиностойкостью газосиликата.

Сравнение результатов компромиссной оптимизации газосиликата по вариантам «А» и «Б». Уровни пяти критериев качества, при которых на этапах «3-2» закончен процесс компромиссной оптимизации, приведены в табл. 3. Они соответствуют материалу, получаемому по девятифакторным РТ-режимам, показанным в табл. 4; все натуральные значения X_i в столбцах «рабочий» получены как средние этапов «3-2», округленные до уровней, доступных для технологического управления.

Как отмечалось, прочность на сжатие по варианту «Б» на два класса выше, чем норматив В-2.5, учтенный на этапе «1-1», что свидетельствует о нецелесообразности производства низкопрочных бетонов плотностью 800 кг/м^3 по исследованному множеству РТ-режимов. Характеристики, связанные с трещиностойкостью газобетона, естественно снизились, но R_b существенно в меньшей степени (за счет компромиссной оптимизации).

Таблица 3. Результаты двух вариантов компромиссной оптимизации – уровни пяти критериев качества

Вариант компромиссной оптимизации	Критерий качества				
	γ , кг/м ³	R_c , МПа	R_b , МПа	ε , мм/м	λ , мВт/(м·К)
А: Д-800, В-7.5	756	10.0	2.9	1.3	160
Б: Д-800, В-2.5	764	7.9	2.4	1.0	156
Изменение (%) от «А» к «Б»	незначимо	-21	-17	-22	незначимо

Изменение норматива позволяет существенно снизить расходы (табл. 4) на автоклавную обработку газосиликата – время выдержки сокращается на 3.8 ч (почти на интервал варьирования ΔX_4), а давление пара на 0.26 МПа (2.6 атм или на 125% ΔX_5). Уменьшается и расход извести (за счет снижения активности смеси почти на $2\Delta X_7$), однако, в то же время

Таблица 4. Результаты двух вариантов компромиссной оптимизации – уровни девяти РТ-факторов

Факторы		Вариант «А»		Вариант «Б»		Превышение «А» над «Б»	
		x_i	рабочий	x_i	рабочий	x_i	рабочий
X_1	D	-0.90	23	-0.43	25	0.47	2
X_2	w_s	-0.05	4.8	0.20	5.6	0.25	0.8
X_3	S_s	-0.70	180	-0.05	245	0.65	65
X_4	τ	0.60	10.4	-0.36	6.6	-0.96	-3.8
X_5	p	0.79	1.16	-0.48	0.90	-1.27	-0.26
X_6	A	-0.89	0.043	-0.95	0.041	незначимо	
X_7	a_{CaO}	0.98	19.9	-0.95	14.1	-1.93	-5.8
X_8	t_w	-0.55	29	-0.51	30	незначимо	
X_9	C	-0.75	2.5	-0.49	5.0	0.26	2.5

возрастает расход энергии на помол песка, удельная поверхность которого должна быть повышена с 180 до 245 м²/кг, и расход цемента с 2.5 до 5%.

Заключение. Новая версия вычислительных экспериментов, дополнительно включающая минимизацию расхода ресурса по ряду факторов, расширяет возможности поиска компромиссных оптимальных РТ-решений. Окончательно такие решения принимаются технологом с учетом экономических, конъюнктурных и иных локальных условий.

Литература

1. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Методы компьютерного материаловедения и технология бетона // Будівельні конструкції. – Вип. 56: Сучасні проблеми бетону та його технологій. – К.: НДБК, 2002. – С. 217-226.
2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих (максимизация прочности и морозостойкости, минимизация расхода ресурса). – Современ. промышл. и гражд. строительство. – 2007, т. 3, №1. – С. 5-15.
3. Вознесенский В.А., Гаврилюк В.П., Ляшенко Т.В. Компьютерный поиск компромиссных параметров энергосберегающей технологии высококачественного газосиликата марки Д500 // Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів: 2-а конф. – Львів, 2008. – С. 12-15.
4. Моделирование технологии и свойств газосиликата: исследование взаимосвязей между параметрами технологии и показателями свойств газосиликата по девятифакторному плану Рехтшафнера / К.К. Эскуссон, А.Э. Кильксон, И.Ю. Эскуссон и др. // Производство и применение силикатных бетонов: НИПСиликатобетон – Таллин, 1985. – С. 5-34.
5. Автоклавный газобетон: Девятифакторное квадратичное моделирование (1981-85) и компьютерное материаловедение (2007-08) / Вознесенский В.А., Гаврилюк В.П., Керш В.Я. и др. // Компьютерное материаловедение и прогрессивные технологии: Мат-лы междунаrod. семинара МОК'47. – Одесса: Астропринт, 2008. – С. 97-104