

СВЯЗЬ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПРОМИССНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С НОРМАТИВАМИ ПО ПЛОТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ ГАЗОБЕТОНА

Вознесенский В.А., Гаврилюк В. П., Ляшенко Т.В. , Тымняк А.Б.
(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Оценены тенденции изменения компромиссных уровней прочности и деформативности при изгибе, теплопроводности газосиликата, и энергоемкости его технологии для 12 сочетаний марок по плотности и классов по прочности на сжатие.

Введение. Задача поиска компромисса (*лат. Compromissum* – соглашение), достигаемого путем взаимных уступок в конфликтных ситуациях, - одна из древнейших в человеческом мышлении и практике. Для уменьшения риска ошибок из-за неизбежной субъективности предпочтений к ее решению все интенсивней привлекаются многообразные математические методы и вычислительная техника. В частности, в рамках компьютерного строительного материаловедения предложен [2] итерационный метод случайного сканирования полей «конфликтующих» свойств материала, описанных многофакторными экспериментально-статистическими моделями. Он позволил получить ряд нетривиальных результатов при исследовании, в частности, полимерных защитно-ремонтных композитов, геоцементов, древопластиков, сухих строительных смесей ...[1,3,4]. Метод существенно модернизирован при исследовании девятифакторной рецептурно-технологической (РТ) ситуации при производстве автоклавного газобетона [5-7]. Однако получаемая в ходе вычислительных экспериментов информация столь многогранна, что позволяет ставить и решать ряд новых задач.

Условия натурального эксперимента и результаты моделирования. Кафедра ПАТСМ ОИСИ и НИПИСиликатобетон МПСМ СССР провели комплексное исследование влияния рецептурно-технологических (РТ) факторов на свойства и параметры структуры автоклавного газобетона. В натурном эксперименте варьировалось девять факторов $X_{0,i} \pm \Delta X_i : D$, см – растекаемость растворной смеси по Суттарду, $X_1 = 27 \pm 4$, шаг регулирования при поиске компромисса $h_1 = 0.5$; w_s , % – влажность песка при совместном помоле с известью, $X_2 = 5 \pm 3$, $h_2 = 0.5$; S_s , м²/кг – удельная поверхность песка, $X_3 = 250 \pm 100$, $h_3 = 20$; τ , час – изотермическая выдержка в автоклаве, $X_4 = 8 \pm 4$, $h_4 = 0.5$; p , МПа – рабочее давление пара в автоклаве, $X_5 = 1.0 \pm 0.2$, $h_5 = 0.05$; A , % – количество алюминиевой пудры (от сухой массы), $X_6 = 0.07 \pm 0.03$, $h_6 = 0.005$; a_{CaO} , % – активность смеси (доля CaO в смеси извести и песка), $X_7 = 17 \pm 3$, $h_7 = 0.5$; t_w , °C – температура воды затворения, $X_8 = 35 \pm 10$, $h_8 = 2$; C , % – количество цемента (от массы смеси), $X_9 = 10 \pm 10$, $h_9 = 1$.

Эксперимент выполнен по специальному трехуровневому 56-точечному плану, позволяющему оценить 55 коэффициентов квадратичных ЭС-моделей. Он «заменяет» планы полных факторных экспериментов 2^9 с 512 опытами (без возможности оценки квадратичных эффектов) и 3^9 с 19683 опытами.

Из газосиликатных блоков, изготовленных по 56 регламентам в опытно-промышленных условиях, выпиливались образцы сечением 4×4 см. Экспериментально определены многочисленные прямые и косвенные критерии качества газосиликата, в частности, плотность γ (кг/м³), пределы прочности (МПа) при сжатии и изгибе R_c и R_b , предельная упругая составляющая деформативности при изгибе ε (мм/м) и коэффициент теплопроводности λ (мВт/м.К).

По этим данным построен комплекс ЭС-моделей, каждая из которых состоит из 55 эффектов (свободный член b_0 , 9 линейных b_i , 9 квадратичных b_{ii} и 40 взаимодействий b_{ij}). Они допущены для инженерного анализа и вычислительных экспериментов после исключения (при последовательном регрессионном анализе) всех статистически незначимых оценок коэффициентов. Комплекс конечных моделей, описывающих поля 5

свойств газосиликата, включает 138 эффектов (в том числе, 5 b_0 , 36 линейных, 13 квадратичных и 87 взаимодействий).

Вычислительные эксперименты по поиску компромиссных решений и их результаты. Поиск компромиссных оптимальных РТ-решений выполнялся методом итерационного случайного сканирования полей свойств материала [1]. При этом использовалась версия алгоритма с генерацией равномерных дискретных распределений случайных РТ-ситуаций [4]. В интервалах от -1 до +1 расположены промежуточные уровни, через равные ступени, размер которых h_i определяется в конкретном вычислительном эксперименте для каждого фактора возможностями производственных систем регулирования.

Поля плотности $\gamma(x_1, \dots, x_9)$ и прочности на сжатие $R_c(x_1, \dots, x_9)$ позволили выполнить 12 серий вычислительных экспериментов при различном сочетании уровней этих нормативных свойств. Таким образом

были учтены критерии-ограничения: марка D800 (классы В 7.5; 5 и 3.5), D700 (В 5; 3.5 и 2.5), D600 (В 3.5; 2.5 и 2) и D500 (В 2.5; 2 и 1.5).

Каждый эксперимент состоял из 3 итераций при генерации на исходном этапе каждой из них 10000 случайных РТ-ситуаций.

Компромиссно оптимизируемые критерии качества: предел прочности на изгиб R_b , МПа, и предельная величина упругой деформации при изгибе ϵ , мм/м, максимизируемые для повышения трещиностойкости газобетона, и минимизируемый коэффициент теплопроводности λ , мВт/м·К. При изменении плотности газобетона эти направления оптимизации, как правило, несовместны.

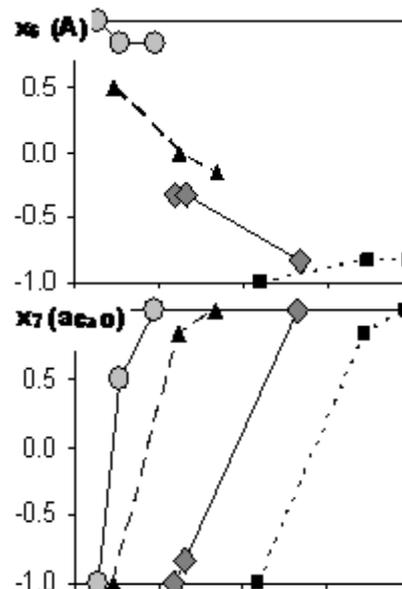
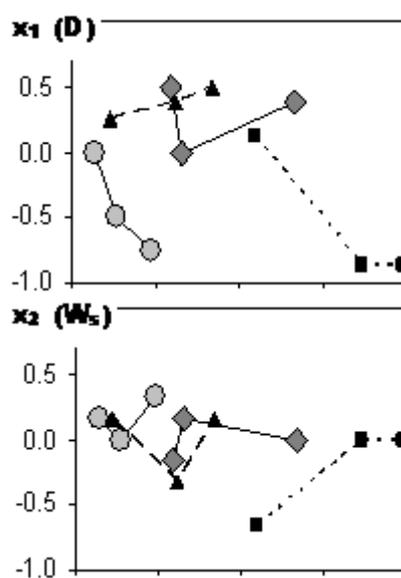
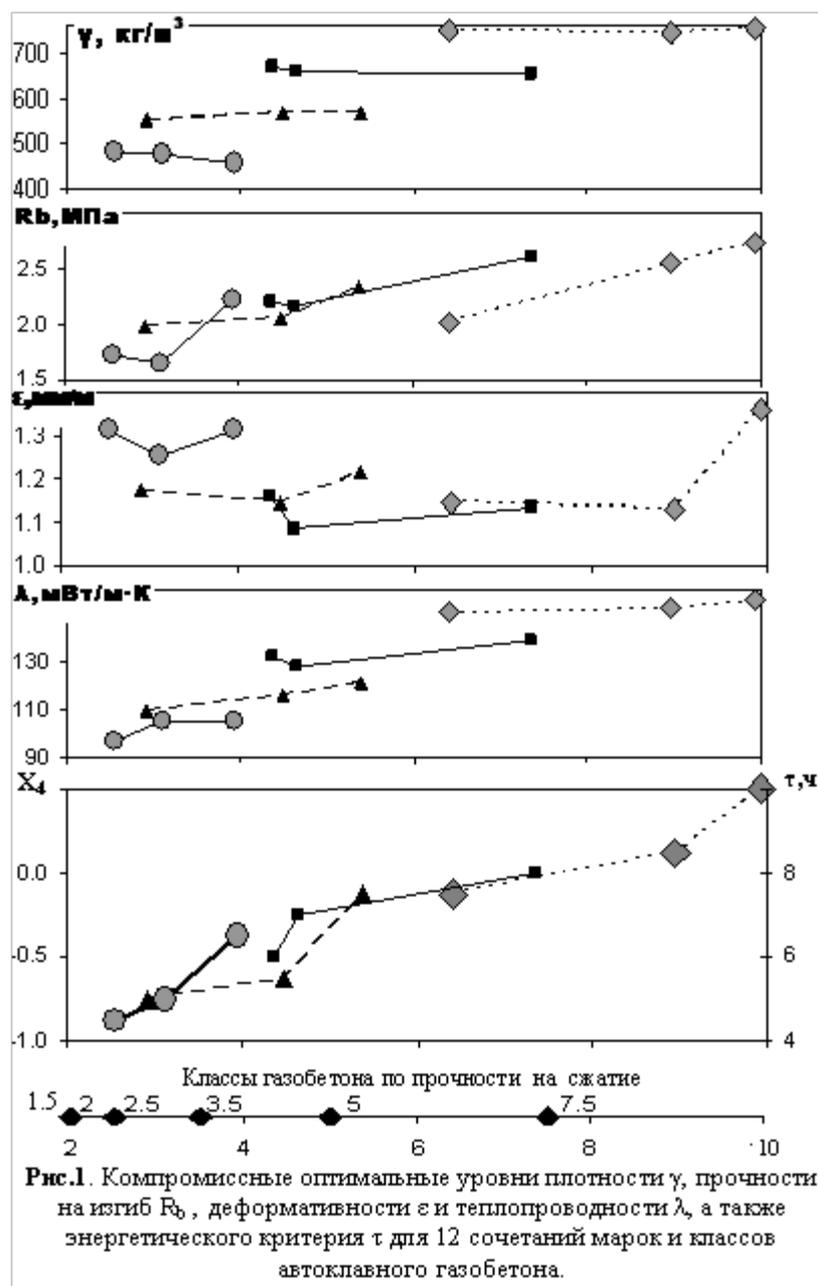
Дополнительный критерий оптимизации время τ , час, изотермической выдержки в автоклаве необходимо минимизировать для уменьшения энергоемкости технологии.

Результаты компромиссной оптимизации. R_b , ϵ , λ и τ для 12 сочетаний марок и классов газобетона показаны на рис. 1. Ось ординат определяет соответствующие 12 решениям уровни R_c ; результаты для постоянной марки соединены прямыми условно. «Пассивно» изменяющиеся при поиске компромисса между R_b , ϵ , λ и τ уровни 8 РТ-факторов показаны на рис. 2.

Оценка тенденций влияния марки и класса газобетона на результаты компромиссной оптимизации.

Таблица 1. Обобщающие показатели компромиссных решений для 12 сочетаний марок и классов газобетона

		Разности			Кoeffициенты корреляции					
		натуральные			параметры					
	Δx_i	max	min	Δ	γ	R_c	R_b	ϵ	λ	x_4
γ		756	453	303						
R_c		9.93	2.56	7.37	0.82					
R_b		2.75	1.65	1.10	0.64	0.87				
ϵ		1.36	1.09	0.28	±0	±0	±0			
λ		156.0	96.6	59.4	0.97	0.91	0.74	±0		
x_4	1.38	10	4.5	5.5	0.76	0.95	0.90	±0	0.87	
x_1	1.38	29	23.5	5.5	±0	±0	±0	±0	±0	±0
x_2	1.00	6	3	3	±0	±0	±0	±0	±0	±0
x_3	2.00	350	150	200	-0.76	-0.81	±0	±0	-0.81	-0.73
x_5	1.25	1.15	0.9	0.25	±0	0.69	0.67	±0	±0	0.66
x_6	2.00	0.1	0.04	0.06	-0.95	-0.84	-0.72	±0	-0.96	-0.81
x_7	2.00	20	14	6	±0	±0	0.59	±0	±0	±0
x_8	1.20	37	25	12	0.71	±0	±0	±0	0.59	±0
x_9	0.40	4	0	4	±0	±0	±0	-0.85	±0	±0



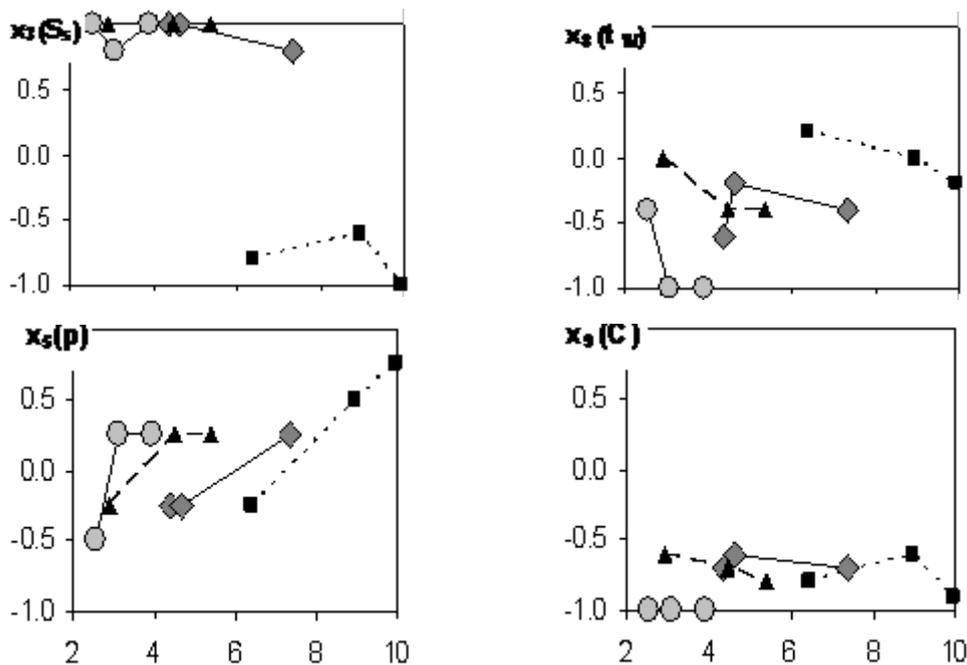


Рис.2. Компромиссные оптимальные уровни 8 РТ-факторов для 12 сочетаний марок и классов автоклавного газобетона.

Зависимость компромиссных уровней прочности на изгиб R_b , деформативности ϵ , теплопроводности λ и времени выдержки в автоклаве τ от изменения марки и класса газобетона прослеживается при качественном анализе информации на рис.1 и 2. Его целесообразно дополнить числовыми обобщающими показателями (табл.1). Должна оказаться полезной такая мера [7] как разность между максимальным и минимальным уровнями критерия оптимизации или фактора для всех 12 РТ- ситуаций. Она отражает чувствительность параметра к вариации нормативов. Вторая мера, оценивающая в области компромиссных решений степень взаимосвязи критериев оптимизации и связи их с «пассивно» изменяющимися факторами - это соответствующие коэффициенты корреляции r . Для 12 анализируемых ситуаций риск ошибки в отклонении правильной гипотезы менее 5%, если абсолютное значение r более 0.576.

Плотность γ (кг/м³) находилась в коридорах, соответствующих нормативам марок D500...D800. Локальные графики $\gamma(R_c)$ близки к горизонтальным прямым. Каждая из четырех ступеней образована тремя результатами поиска компромиссных составов газобетона разных классов по прочности на сжатие R_c . Графики находятся вблизи нижней границы коридора нормативной плотности, поскольку одним из критериев компромиссной оптимизации был «активно» минимизируемый коэффициент теплопроводности λ (мВт/м·К). Линейная связь между компромиссными уровнями этих критериев оказалась очень сильной – $r\{\gamma\lambda\}=0.97$, что соответствует риску ошибки отвергнуть верную гипотезу $\alpha \ll 0.001$. Интегральный прирост плотности газобетона на 303 кг/м³ (с учетом всех 12 ситуаций, включая и рост марки D и рост классов В внутри марки) вызван изменением компромиссных уровней факторов x_1, \dots, x_9 . Судя по ранжированному ряду коэффициентов корреляции

$$r\{\gamma x_6\} > r\{\gamma x_3\} > r\{\gamma x_4\} > r\{\gamma x_8\} > 0.7,$$

наибольшее влияние оказывает снижение количества алюминиевой пудры (А) и тонкости помола (S_s , скачкообразно при переходе от D700 к D800). Значима связь плотности γ с минимизируемым критерием энергоемкости $x_4(\tau)$, который возрастает (рис. 2) в связи с последовательным ростом нормативного критерия R_c .

Класс по прочности на сжатие газобетона нормативно увеличивался хотя бы на один пункт с повышением каждой марки D, а внутри нее мог занимать три возрастающих уровня. Для того, чтобы обеспечить эти нормативы компромиссные решения приходится принимать при повышенных энергозатратах – активно минимизируемое время изотермической выдержки в автоклаве возрастает на $\Delta x_4=1.38$ или с 4.5 до 10 ч (табл. 1) причем и давление в автоклаве должно быть повышено на Δx_5 1.25 или с 0.9 до 1.15 МПа (табл. 1). Степень связи этих факторов с R_c значительно достовернее, чем с плотностью (соответственно $r\{R_c x_4\} = 0.95$ и $r\{R_c x_5\} = 0.69$), в то время как влияние остальных факторов реализуется, по-видимому, через увеличение плотности.

Предел прочности на изгиб R_b – один из компромиссно максимизируемых критериев, определяющих трещиностойкость газобетона, естественно возрастает (на 1.1 МПа) с увеличением прочности на сжатие (на 7.4 МПа, табл. 1). Взаимосвязь их достаточно сильная ($r\{R_b R_c\}=0.87$), но в ранжированный ряд $r\{R_b x_i\}$, значимых с риском $\alpha < 0.05$, входит дополнительный фактор – активность смеси $x_7(a_{CaO})$, причем графики R_b (рис.1) и x_7 (рис.2) имеет аналогичный «пилообразный» вид.

Изменение уровней компромиссной **деформативности** (рис.1,) значительно отличается от поведения других критериев оптимизации. Оно имеет параболический характер (коэффициент детерминации $R^2\{\varepsilon R_c\} = 0.45$, риск $\alpha < 0.02$). Правая ветвь без сомнения формируется в ячеистых бетонах «параллельно» с увеличением их плотности и прочности, а причины формирования левой ветви (в области автоклавных газосиликатов пониженной плотности), вероятно, кроются в структуре гидросиликатных новообразований. Косвенно это подтверждается тем, что уровни компромиссной деформативности имеют достоверную обратную корреляцию (риск отсутствия линейной связи $\alpha < 0.0005$) с количеством портландцемента в смеси.

Коэффициент теплопроводности, как отмечалось выше, после компромиссной оптимизации находится в сильной связи с плотностью газобетона, поэтому они имеют подобный ранжированный ряд коррелирующих с ними факторов.

Время изотермической выдержки в автоклаве $x_4(\tau)$ – дополняющий комплекс свойств газобетона один из существенных критериев энергоемкости технологии. Он компромиссно минимизирован и был снижен (рис.1) при переходе от D800 B7.5 к D500 B1.5 на $\Delta x_4= 1.38$ или на 5.5 час (табл.1). Снижение $x_4(R_c)$ практически линейно, однако, для экстраполяционных расчетов предпочтительна вторичная модель $\tau=3.94e^{0.096R_c}$; она не менее точная и не пересекает ось ординат.

Заключение. Поиск компромиссных оптимальных решений методом случайного сканирования полей свойств газобетона реализован для 12 сочетаний двух нормативных критериев - марок по плотности и классов по прочности материалов. Анализ результатов компромиссной оптимизации пределов прочности на изгиб и деформативности (определяющих трещиностойкость), коэффициентов теплопроводности и характеристики энергозатрат технологии позволил выявить тенденции связей уровней этих критериев между собой и с 8 РТ-факторами.

Литература

1. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Методы компьютерного материаловедения и технология бетона // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. – вип. 56: Сучасні проблеми бетону та його технологій. – К.: НДІБК, 2002. – С. 217-226.
2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 стр.
3. 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.

4. Lyashenko T., Gara A., Podagelis I., Gailiene I. Epoxy compositions for protecting road structure units in contact with water-oil mixtures. Environmental Engineering. Proc. 7th Int. Conf. – Vilnius, 2008. – V. 3. – P. 1186-1192

5. Автоклавный газобетон: Десятифакторное квадратичное моделирование (1981-85) и компьютерное моделирование (2007-08) / В.А. Вознесенский, В.П. Гаврилюк, В.Я. Керш, Т.В. Ляшенко, А.В. Ткачук Н.В. Хлыцов // Компьютерное материаловедение и прогрессивные технологии: Мат-лы международ. семинара МОК'47. – Одесса: Астропринт, 2008. – С. 97-104.

6. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Гаврилюк В.П. Компромиссная оптимизация свойств газосиликата при дискретных равномерно распределенных уровнях девяти рецептурно-технологических факторов / Сучасні будівельні матеріали. Вісник ДонНАБА, Випуск 2009-1 (75), Вид-во ДонНАБА, 2009. - С.139-145

7. Lyashenko T.V., Voznesensky V.A., Gavriiliuk V.P. Multicriterial optimization of autoclaved aerated concrete properties and expenditure of energy resources // Brittle Matrix Composites. Proc. 9th Int. Symp. BMC9. – Warsaw, 2009 (inprinting).

