

ПОИСК КОМПРОМИССНЫХ РЕШЕНИЙ СЛУЧАЙНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ ПОЛЕЙ СВОЙСТВ ГАЗОСИЛИКАТА

**Вознесенский В.А., д.т.н, проф., Ляшенко Т.В., д.т.н, проф,
Гаврилюк В.П., магистр**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Введение. Анализ журнала «Technometrics» [1] за последнее десятилетие и ряда других публикаций Американской статистической ассоциации позволяет утверждать, что моделирование на основе оптимально планируемого эксперимента является прогрессирующим направлением статистической методологии в экономически развитых странах. В инженерных науках особое внимание уделяется классу экспериментально-статистических (ЭС) моделей, активно применяемых при разработке конкурентоспособной продукции и обеспечении ее гарантированного качества.

Конкурентоспособный строительный материал (в данной работе) ячеистый бетон, не только должен отвечать всем нормативным требованиям, но, с одной стороны, должен иметь преимущества в уровнях нерегламентируемых свойств, в частности, трещиностойкости, а с другой – не должен вызывать повышенного расхода ресурсов, особенно энергетических. В таких противоречивых, требующих поиска разумного компромисса ситуациях к принятию рецептурно-технологических (РТ) решений целесообразно привлекать компьютерное строительное материаловедение [2, с.4]. Среди используемых при этом математических методов в настоящий момент приоритетны вычислительные эксперименты на полях свойств материала [2, с.17; 3], описанных ЭС-моделями [4]. В целом такую методологию исследования можно отнести к «высоким технологиям», что и определяет границы ее применения, при разработке конкурентоспособных материалов с гарантированными уровнями специальных свойств.

В данной работе анализируется новая версия разработанного в ОГАСА [1, с.12, с.74] алгоритма поиска компромиссных оптимальных РТ-решений при случайном сканировании многофакторных полей свойств и некоторые результаты [5-9], полученные для автоклавного ячеистого бетона.

Условия натурального эксперимента и результаты моделирования. Кафедра ПАТСМ ОИСИ и НИПИСиликатобетон МПСМ СССР провели комплексное исследование влияния $k=9$ рецептурно-технологических (РТ) факторов на свойства и параметры структуры автоклавного газобетона [5]. В опытно-промышленных условиях варьировались: D , см – растекаемость растворной смеси по Суттарду, $X_1=27\pm 4$, шаг регулирования при поиске компромисса $h_1=0.5$; w , % – влажность песка при помоле с известью, $X_2=5\pm 3$, $h_2=0.5$; S , m^2/kg – 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 – 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, выпиливались образцы сечением 4×4 см. Экспериментально определены многочисленные критерии качества газосиликата, в частности, плотность γ (kg/m^3), пределы прочности (МПа) при сжатии R_c и изгибе 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. Комплекс описывающий поля 5 свойств газосиликата, включает 138 эффектов (5 b_0 , 36 b_i , 13 b_{ii} и 87 b_{ij}).

Два свойства ячеистых бетонов нормируются ДСТУ Б В.2.7-137:2008. Это двухсторонние (коридорные) ограничения марки D по плотности γ и класса B по прочности на сжатие R_c .

Компромиссно оптимизируемые критерии качества: предел прочности на изгиб R_b и предельная величина упругой деформации при изгибе ε , максимизируемые для повышения трещиностойкости, и минимизируемый коэффициент теплопроводности λ . При изменении

плотности газобетона эти направления оптимизации несовместны.

Дополнительные критерии оптимизации время τ , час, изотермической выдержки в автоклаве и давление p , МПа, необходимо минимизировать для уменьшения энергоемкости технологии.

Основные элементы алгоритма компромиссной оптимизации методом случайного сканирования многофакторных полей свойств материала. Структура процесса поиска компромиссных оптимальных решений показана рис.1. Процесс итерационный; каждая итерация состоит из трех этапов, содержащих по пять последовательно реализуемых блоков. Поскольку «активность» периодически переходит от РТ-факторов $\{x_1, \dots, x_k\}$ к критериям качества материала Y_j и обратно, структура отражена на двух отдельных (соответствующих) уровнях. Первая итерация - специфична, а вторая и последующие итерации по структуре подобны.

На нулевом этапе первой итерации (1/0) в блоке «1» генерируются по N_g случайных чисел, распределенных по равномерному закону в полных диапазонах каждого фактора $-1 \leq x_i \leq +1$. В данной работе генерированы $N_{g1}=10000$ вариантов [6] деятифакторных технологий по дискретному равномерному закону; так, значения четвертого фактора – времени выдержки в автоклаве, регулируемого на 17 уровнях через $h\{\tau\}=0.5$ ч, генерируются с равной вероятностью $p(x_4)=1/17=0.059$.

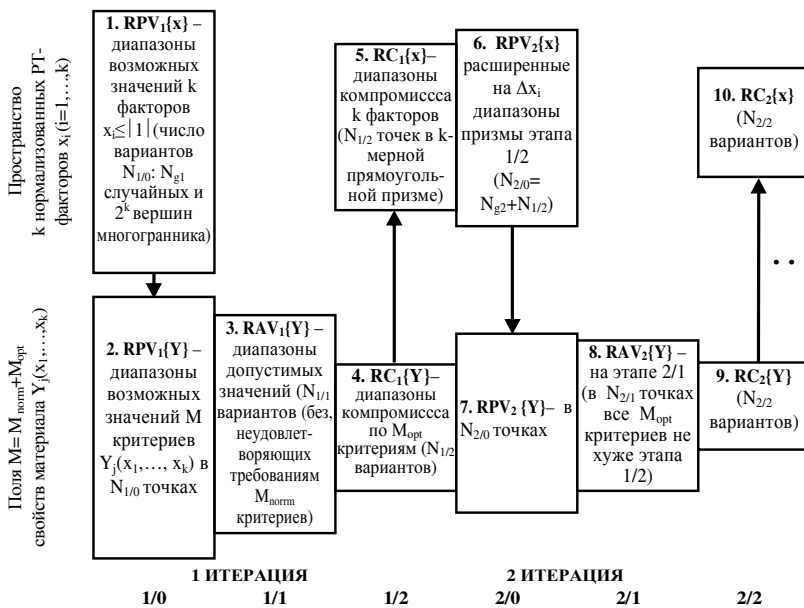


Рис.1. Структура алгоритма поиска компромисса

К случайным вариантам добавляются 2^k вершин k -мерного гиперкуба ($x_i = \pm 1$). Это необходимо, поскольку вероятность попадания в вершину практически равна нулю, а именно там могут находиться инженерно полезные экстремумы линейных и параболических сечений поверхностей критериев качества Y_j . В данной задаче добавлено $2^9=512$ вершин и на этапе 1/0 конкурируют $N_{1/0}=10512$ решений (более чем в миллион раз меньше числа равновозможных вариантов [6]).

В блоке «2» по ЭС-моделям для $N_{1/0}$ вариантов определяются уровни сканируемых полей всех $M=M_{\text{норм}}+M_{\text{опт}}$ критериев качества (в частности γ и R_c , а также λ , R_b и ε). Таким образом, оказывается сформированной полная матрица вычислительного эксперимента ($MCE_{1/0}$ – Matrix of computational experiment) с $k+M$ столбцами, соответствующая диапазонам возможных значений (Range of Possible Values) $RPV_1\{Y\}$.

На следующем этапе в блоке «3» количество строк матрицы $MCE_{1/0}$ сокращается за счет последовательного удаления вариантов, которые не отвечают требованиям $M_{\text{норм}}$ критериев. В данной задаче сначала матрица отсортирована по плотности и удалены те варианты, в которых газосиликат не отвечает марке D800 (коридор $741 \leq \gamma \leq 840$ кг/м³). Далее из оставшихся 2314 вариантов после сортировки по R_c удалены строки, в которых не обеспечен класс B5 ($7.23 \leq R_c \leq 10.85$ МПа). В диапазоне допустимых значений (Range of Admissible Values) $RAV_1\{Y\}$ осталось $N_{1/1}=683$ варианта. При этом каждый из трех оптимизируемых критериев оказывается ограниченным; так, для прочности на изгиб $RAV_1\{R_b\} = 3.21-1.23 = 1.98$ МПа (рис.2); 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) $RAV_1\{\varepsilon\}=1.34-0.13=1.21$ мм/м и $RAV_1\{\lambda\}=221-141=80$ мВт/(м·К).

В результате исключения «неудовлетворительных вариантов» по двум нормативным критериям для 9 факторов образуются 9 диапазонов $RAV_1\{x_i\}$. Из графиков на рис.2 следует, что 8 факторов сохраняют значения во всем диапазоне от -1 до +1; лишь для содержания газообразователя x_6 диапазон стал вдвое уже.

В блоке «4» на заключительном этапе «1/2» осуществляется «активное» пошаговое улучшение внутри $RAV_u\{Y\}$ каждого из критериев оптимальности, от худшего уровня ($R_b = 1.23$, $\varepsilon = 0.13$, $\lambda = 221$) к лучшему ($R_b = 3.21$, $\varepsilon = 1.43$, $\lambda = 141$). При этом целенаправленно расширяется диапазон выигрыша $RG_u\{Y\}$ (Range of Gain; вертикальная штриховка на рис. 2) и сужается диапазон компромисса $RC_u\{Y\}$ (Range of Compromise). Начальные шаги могут быть достаточно большие (до

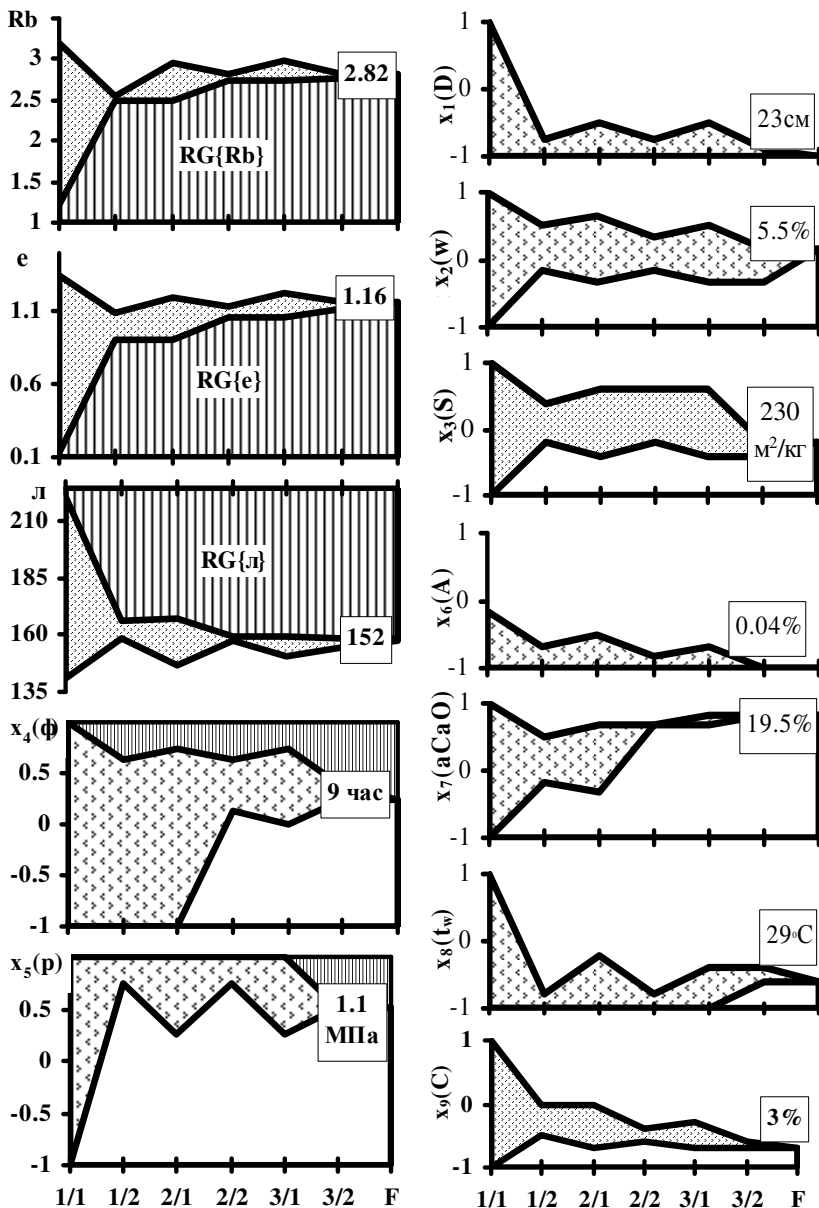


Рис.2. Изменение диапазонов критериев качества и границ PT-факторов при поиске компромиссного решения

0.2-0.3 $RAV_u\{Y\}$), но по мере приближения к границе $RC_u\{Y\}$ их следует уменьшать (до 0.02 $RC_u\{Y\}$). Когда в $RC_u\{Y\}$ остается 2-7 вариантов, дальнейшее сокращение, как правило, теряет смысл и движение прекращается (в данной задаче $N_{1/2} = 3$).

Для оценки результативности процедуры поиска компромисса можно использовать ряд показателей, именно, относительные части исходного допустимого диапазона $RAV_1\{Y\}$ (первого для всей процедуры!), превращенные в диапазоны выигрыша RG и компромисса RC .

Эффективность оптимизации по прочности на изгиб после первой итерации $E_1\{R_b\} = RG_1\{R_b\}/RAV_1\{R_b\} = (2.49-1.23)/1.98 = 0.64$. Поскольку приоритеты критериев не были назначены, то $E_1\{\varepsilon\}$ и $E_1\{\lambda\}$ имеют практически тот же уровень. Однако другой полезный показатель – остаточный диапазона компромисса $C_1\{Y\} = RC_1/RAV_1$, который позволяет ориентироваться в возможностях улучшения трех критериев качества на последующих u -тых итерациях, существенно отличается. Наименьший $C_1\{R_b\} = 0.04$, вдвое выше $C_1\{\varepsilon\} = 0.1$ и максимальный $C_1\{\lambda\} = 0.16$.

В результате активного сжатия диапазонов $RC_1\{Y\}$ в блоке «4» сокращаются и диапазоны 9 РТ-факторов по сравнению с исходными $RPV_1\{x_i\}$ (рис.2). Так, для времени выдержки в автоклаве (x_4) осталось только 9 уровней регулирования из 17. Еще в большей степени сократились (рис.2) диапазоны расхода газообразователя (x_6) и цемента (x_9).

Диапазоны $RC_1\{x_i\}$ формируют k -мерную прямоугольную призму в блоке «5», который становится «активным» по отношению ко второй итерации. Поскольку границы этой призмы определены при ограниченном случайном сканировании M многофакторных полей свойств, то вблизи нее, вероятно, находятся полезные РТ-варианты. Поэтому в начале второй (в общем случае u -той) итерации диапазоны должны быть расширены на Δx_i (1-2 степени) за каждую границу.

В блоке «6» в расширенной k -мерной призме генерируется новые $N_g = 10^4$ равномерно распределенных значений девяти x_i и добавляются $N_{1/2} = 3$ компромиссно оптимальных варианта предыдущей итерации (всего в $RPV_2\{x\}$ $N_{2/0} = 10003$ варианта).

На этапе 2/1 блок «8» отличен от блока «3» и именно ему будут подобны блоки $RAV_u\{Y\}$ всех последующих u -тых итераций. Суть в том, что в нем исключаются не только РТ-варианты, недопустимые по M_{norm} ограничениям (по γ и R_c). На этом и аналогичных 1-ых этапах последующих итераций дополнительно по каждому из M_{opt} критериев (R_b , ε и λ) удаляются те РТ-варианты, где компромиссно оптимизируемые свойства хуже, чем полученные на предыдущей итерации.

В силу этих новых ограничений (нижние границы $R_b = 2.49$ и

$\varepsilon=0.91$, верхняя граница $\lambda=167$) диапазонов выигрыша в блоках «3» и «8» одинаковы $RG_{1/2}=RG_{2/1}$ (рис. 1 и 2). При этом под влиянием целенаправленного расширения в блоке «6» $RPV_2\{x\}$, как правило, расширяются и диапазоны допустимых значений критериев оптимизации.

Два конечных блока «9» и «10» на второй итерации не отличаются от соответствующих блоков «4» и «5» первой (рис.1). Далее процедура блоков «6-10» повторяется в каждой последующей u -той итерации.

По мере сокращения относительного размера диапазонов компромисса $C_u\{Y\}=RC_u\{Y\}/RAV_1\{Y\}$ для всех M_{opt} критериев (до 5-10%) целесообразно при поиске компромиссных оптимальных решений дополнительно учитывать возможность сокращения расхода ресурсов, в частности, по энергоемким РТ-факторам. В данной работе 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 106 вариантов технологии) удалось снизить на 2 ч и 0.1 МПа соответственно. В результате в диапазонах компромисса $RC_{3/2}$ осталось $N_{3/2}=4$ конкурирующих варианта. Показатели компромиссной оптимизации по трем критериям качества (рис.2) достаточно высокие – по прочности $E_3\{R_b\}=0.77$ и $C_3\{R_b\}=0.03$, по деформативности $E_3\{\varepsilon\}=0.82$ и $C_3\{\varepsilon\}=0.04$, по теплопроводности $E_3\{\lambda\}=0.78$ и $C_3\{\lambda\}=0.05$.

Оставшиеся на последнем этапе варианты с инженерной точки зрения равноценны. Выбор между ними окончательного РТ-решения субъективен, если при этом не вводить новые критерии.

Оценка тенденций влияния нормативных марки и класса газобетона на результаты компромиссной оптимизации. Поля плотности $\gamma(x_1, \dots, x_9)$ и прочности на сжатие $R_c(x_1, \dots, x_9)$ позволяли выполнить 12 вариантов вычислительных экспериментов при различном сочетании уровней этих нормативных свойств. Таким образом, в соответствии с ДСТУ Б В.2.7-137:2008 были учтены критерии-ограничения: марка D800 (классы В7.5; 5 и 3.5), D700 (В5; 3.5 и 2.5), D600 (В3.5; 2.5 и 2) и D500 (В2.5; 2 и 1.5). Каждый эксперимент состоял из 3 итераций при генерации на исходном этапе $N_g\{1/0\}=10000$ вариантов. При поиске использовалась версия алгоритма с генерацией равномерных дискретных распределений случайных РТ-ситуаций [6].

На рис. 3 отражена взаимосвязь между полученными в ходе

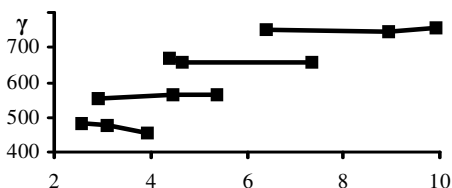


Рис.3. Взаимосвязь между γ и R_c в результате компромиссной оптимизации.

компромиссной оптимизации уровнями плотности γ (4 практически горизонтальных линии вблизи нижних границ нормативных коридоров по марке D) и классом по прочности на сжатие R_c (на каждой ступени D по три маркера, соответствующих трем классам одной марки). Поскольку нормативы по маркам и классам газобетона, вообще говоря, равноправны, то при анализе тенденций изменения компромиссных уровней оптимизируемых критериев и соответствующих факторов выбор аргумента определяется на основе методических предпосылок. Так, для компромиссной оптимальной прочности на изгиб по существу предпочтителен аргумент R_c и весьма удачной, в частности является экспоненциальная модель (рис. 4) $R_b = 2.64(1 - e^{-0.38R_c})$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.97$ и ошибкой неадекватности $s_{на}\{R_b\} = 0.17$ МПа.

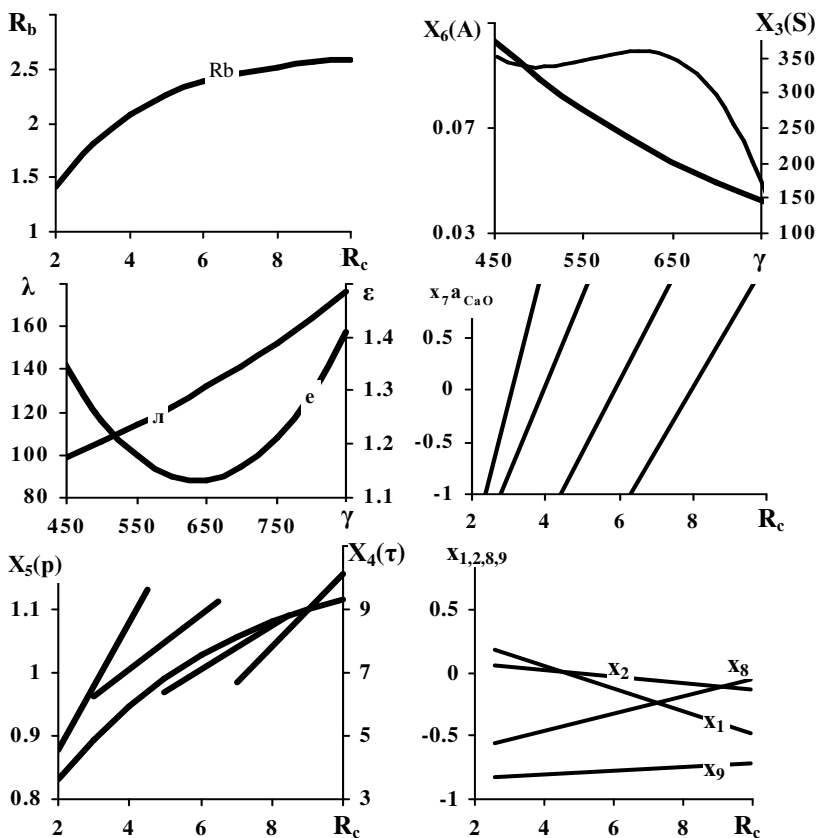


Рис.4. Тенденции изменения критериев оптимальности (R_b , ϵ , λ , τ и p) и «пассивных» факторов для 12 вариантов марок и классов.

Для тенденций изменения коэффициента теплопроводности логичен другой аргумент, приводящий к модели $\lambda=51.61e^{0.0014\gamma}$, коэффициент детерминации $R^2=0.95$.

При выборе аргумента для компромиссной оптимальной деформативности были проверены гипотезы о степени нелинейной связи и с γ и с R_c для веера конкурирующих моделей. Более тесна связь с γ и она достоверно описывается простой параболической моделью с коэффициентом детерминации 0.552 (риск около 0.01) и $s_{на}=0.066$ мм/м. Зависимость нетривиальна - правая ветвь без сомнения формируется в ячеистых бетонах «параллельно» с увеличением их плотности и прочности, а причины возникновения левой ветви (в области автоклавных газосиликатов пониженной плотности), вероятно, кроются в структуре гидросиликатных новообразований. Косвенно это подтверждается при анализе влияния факторов (рис. 4) тем, что уровни компромиссной деформативности имеют достоверную обратную корреляцию с содержанием цемента [9, табл.1] (риск отсутствия линейной связи $\alpha<0.0005$).

К компромиссной оптимизации трех критериев качества готового газобетона после 1-ой итерации были подключены два минимизируемых критерия энергоемкости его технологии – время изотермической выдержки $x_4(\tau)$ и давление пара в автоклаве $x_5(p)$. Эти два фактора, переводятся из «пассивно изменяющихся» массивов информации (верхний ряд на рис.1) в «активно изменяемые» (нижний ряд на рис.1). Тенденции изменения энергетических критериев, естественно, связаны с уровнями R_c , достигаемыми при компромиссной оптимизации (рис. 4). При такой оси абсцисс кривая сокращения времени τ , ч, подобна изменению прочности на изгиб R_b . Принципиально по иному проявляясь тенденция изменения давления в автоклаве – каждой марке по плотности соответствует отдельный отрезок семейства прямых $p=a_0+a_1R_c$, положение которого связано с нормативами R_c в данной марке. При этом внутри марки снижение класса позволяет уменьшить компромиссное оптимальное давление в автоклаве.

Для семи факторов, «пассивно» изменяющихся при поиске компромисса между R_b , ϵ , λ , τ и p , установить тенденции вариации уровней значительно сложнее. Каждый из таких уровней в каждой из 12 версий «D+B» по существу является результатом решения обратных задач некоторого класса. Как и в большинстве таких плохо обусловленных задач этот результат неоднозначен.

Тенденции изменения 7 факторов показаны на рис.4; они образуют три группы. В первую входят два фактора, достаточно тесно связанные с плотностью газосиликата: $S(x_3)$ - толщина помола (кубическая парабола, коэффициент детерминации 0.99) и $A(x_6)$ - количество порообра-

зователя (экспонента, коэффициент детерминации 0.91). Во вторую - только активность смеси при аргументе R_c ; она практически линейно изменяется в зависимости от класса ячеистого бетона; для каждой марки D она в отдельности подобно минимизируемому давлению пара в автоклаве; коэффициент корреляции $r\{p, a_{CaO}\}=0.91$; уровень a_{CaO} достаточно сильно (риск $\alpha < 0.05$) связан с максимизируемым R_b . Третья группа образована четырьмя факторами $x_1(D)$, $x_2(w)$, $x_8(t_w)$ и $x_9(C)$, тенденции изменения которых не могут быть оценены достоверно, поскольку коэффициенты их корреляции с R_c незначимы (смена аргумента на G заключения о многозначности этих компромиссных уровней факторов практически не меняет).

Заключение. Анализ структуры новой версии алгоритма поиска компромиссных оптимальных РТ-решений при случайном сканировании многофакторных полей свойств материала и ряда, полученных с его помощью результатов, позволяет отметить некоторые достоинства.

Алгоритм достаточно универсален. Он не имеет принципиальных ограничений на число оптимизируемых критериев качества (при этом критерии-нормативы могут отсутствовать). К критериям качества материала (в том числе на различных стадиях технологического процесса) могут быть на любой итерации добавлены как критерии оптимизации факторы, связанные с экономией ресурсов. При нормализованных переменных сканируемые поля свойств материала могут иметь неодинаковую размерность, причем для описания допустимо использовать не только полиномиальные экспериментально-статистические модели, но и модели иного типа и генезиса. Сканирование полей свойств проводится случайными равномерно распределенными числами. Их генерация проводится на непрерывных или дискретных шкалах, которые отражают возможности ступенчатого регулирования факторов в производственных условиях, причем можно использовать оба типа шкал для групп факторов. Алгоритм реализуется как при специальном программном обеспечении, так и при использовании Excel.

Алгоритм можно признать работоспособным, что следует из анализа результатов поиска компромиссных (по показателям трещиностойкости и теплопроводности, по энергоемкости технологии) оптимальных решений, полученных для автоклавного газобетона при 12 сочетаниях различных нормативных марок и классов материала. Анализ тенденций изменения 12 компромиссных уровней оптимизируемых критериев и соответствующих им уровней основных факторов позволяет считать их не только не противоречащими достоверным закономерностям материаловедения, но и дает основания для нетривиальных гипотез.

SUMMARY

The search for compromise solutions with random scanning the fields of properties of autoclaved aerated concrete

A new version of algorithm of the search for compromise optimal solutions with the use of random scanning of material property fields has been analysed. Found has been the compromise between maxima of crack resistance indices of autoclaved aerated concrete and minima of heat conductivity as well as two energy consuming factors of hardening. Tendencies in changes of the results for different specified requirements have been evaluated.

ЛИТЕРАТУРА

1. Technometrics. A Journal of Statistics for the Physical, Chemical, and Engineering Sciences. – 1996-2009 (ISSN 0040-1706).
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. Рецептурно-технологические поля свойств материала в компьютерном строительном материаловедении // Строительные материалы. – 2006, №3 – Приложение: Наука №7. – С. 8-11.
4. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я. Иванов, И. Николов: – К.: Будивельник, 1989. – 240 с.
5. Автоклавный газобетон: Десятифакторное квадратичное моделирование (1981-85) и компьютерное материаловедение (2007-08) / В.А. Вознесенский, 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.
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).- Макіївка: Вид-во ДонНАБА, 2009. – С. 139-145.
7. Voznesensky V., Lyashenko T., Gavrilyuk V. Compromise optimisation of heat insulating and mechanical properties of high performance autoclaved aerated concrete // Proc. 17 Ibaasil. – Weimar (Germany), 2009. – V. 2. – P. 2-1181-1186.
8. Lyashenko T.V., Voznesensky V.A., Gavriliuk V.P. Multicriterion optimisation of autoclaved aerated concrete properties and expenditure of energy resources // Brittle Matrix Composites 9 : Proc. 9th Int. Symp. BMC9. – Warsaw: Woodhead Publ. Ltd., IFTR PAS, 2009. – P. 219-226.
9. Вознесенский В.А., Гаврилюк В. П., Ляшенко Т.В., Тымняк А.Б. Связь результатов компромиссной оптимизации с нормативами по плотности и прочности газобетона // Вісник ОДАБА. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2009. – Випуск 35. – С. 56-63.