

**Газосиликат с компромиссными уровнями  
предела прочности и деформативности при изгибе, теплопроводности  
и энергоемкости твердения**

Анализируются результаты вычислительных экспериментов, полученные при итерационном случайном сканировании многофакторных полей свойств газосиликатов в 12 «нормативных блоках» (четыре марки по плотности  $D = 500-800$ , три класса  $B$  по прочности на сжатие). Для каждого блока  $\{D, B\}$  определены компромиссно оптимальные уровни трех критериев качества (предела прочности и деформативности при изгибе, коэффициента теплопроводности) и двух показателей энергоемкости автоклавного твердения. В каждом блоке определены значения 9 рецептурно-технологических факторов, обеспечивающие компромиссно оптимальные решения. Для анализа переходов между блоками нормативов использован обобщающий показатель – предел прочности на сжатие  $R_c\{D, B\}$  при компромиссно оптимальных в данном блоке уровнях критериев качества. Непрерывными функциями этого показателя удалось описать (с известными рисками) изменения компромиссных значений критериев и факторов во всем диапазоне нормативов  $\{D, B\}$ . Уровни факторов представляют систему, корреляционные связи в которой позволяют обеспечить их взаимную компенсацию для сохранения компромисса между критериями оптимальности при изменении  $R_c\{D, B\}$ .

**газосиликат, физико-механические свойства, нормативы, рецептурно-технологические факторы, система компромиссных уровней**

**Введение.** Информация, полученная в комплексном опытно-промышленном исследовании влияния девяти рецептурно-технологических (РТ) факторов на структуру и свойства газосиликата в 80-ых годах совместно кафедрой ПАТСМ ОИСИ и НИПСиликатобетон МПСМ СССР [1], позволяет поставить и решить ряд нетривиальных задач методами компьютерного строительного материаловедения. В частности, модернизированным методом итерационного случайного сканирования многофакторных РТ-полей свойств проведен поиск РТ-решений, компромиссно оптимальных по критериям качества газосиликата и энергоемкости автоклавного твердения [2, 3].

Цель заключительного этапа исследований – проанализировать влияние нормативных ограничений по плотности газосиликата  $\gamma$ ,  $\text{кг/м}^3$  ( по марке  $D$ ), и прочности на сжатие  $R_c$ , МПа (по классу  $B$ ), на компромиссные уровни критериев оптимальности (предела прочности  $R_b$ , МПа, и деформативности  $\varepsilon$ , мм/м, при изгибе, коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , мВт/К·м, энергоемкости) и на комплекс РТ- факторов, обеспечивающих эти условия.

Используются полученные на основе оптимально спланированного эксперимента квадратичные ЭС-модели с 55 эффектами 9 факторов. Это растекаемость растворной смеси,  $X_1 = 27 \pm 4$  (см), влажность песка при помеле с известью,  $X_2 = 5 \pm 3\%$ ; удельная поверхность

песка,  $X_3 = 250 \pm 100$  (м<sup>2</sup>/кг); изотермическая выдержка в автоклаве,  $X_4 = 8 \pm 4$  (час); рабочее давление пара в автоклаве,  $X_5 = 1.0 \pm 0.2$  (МПа); расход алюминиевой пудры,  $X_6 = 0.07 \pm 0.03$  % (от массы сухих компонентов); активность смеси,  $X_7 = 17 \pm 3$  %; температура воды затворения,  $X_8 = 35 \pm 10$  (°C), расход цемента,  $X_9 = 10 \pm 10$  %.

Построенные на предшествующих этапах [1, 2] многофакторные ЭС-модели пересчитаны: в частности, понижен риск при принятии гипотез о значимости оценок коэффициентов до  $\alpha \leq 5\%$ , а пределы прочности прологарифмированы для возможности экстраполяции в области пониженной плотности.

**Изменения компромиссных оптимумов критериев качества газосиликата при изменении нормативных требований.** Комплекс ЭС-моделей (с нормированными  $|x_i| \leq 1$ ) позволял проанализировать свойства газосиликата при каждом из 12 сочетаний требований к плотности  $\gamma$  (4 марки D – 500, 600, 700 и 800) и к пределу прочности на сжатие  $R_c$  (для каждой D по 3 класса  $B_1 > B_2 > B_3$ ), с учетом фиксированных в ДСТУ доверительных интервалов. Таким образом в непрерывной двумерной области  $\{\gamma, R_c\}$  существования газосиликата образуется 12 прямоугольных подобластей – «нормативных блоков»  $\{D, B\}$ , в каждом из которых находятся свои компромиссно оптимальные решения.

Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что наиболее информативной числовой характеристикой – обобщающим показателем для перехода между 12 блоками  $\{D, B\}$  является прочность на сжатие  $R_c\{D, B\}$  газосиликата с компромиссно оптимальными для данного нормативного блока уровнями критериев качества ( $R_b, \varepsilon, \dots$ ). Этот логически ясный показатель позволяет описывать изменение компромиссно оптимальных уровней критериев и обеспечивающих их РТ- факторов непрерывными функциями (с известным риском  $\alpha$  при проверке гипотез об их достоверности [4]). При  $\alpha \leq 0.05\%$  зависимости достоверны, при  $\alpha \leq 0.5\%$  практически достоверны, а при  $\alpha \approx 0.5\%$  они отражают лишь тенденции связей.

Для каждого  $\{D, B\}$  проводилось по 4 серии вычислительных экспериментов с итерационным случайным сканированием полей  $R_b, \varepsilon$  и  $\lambda$ . На последнем этапе РТ-координаты  $x_i$  определены при решении обратной задачи моделирования [3]. Серия 1 – оосновная – определение компромиссно оптимальных уровней  $(R_b, \varepsilon, \lambda)_{comp}$  и обеспечивающих их уровней РТ-факторов  $(x_1, \dots, x_9)_{comp}$ . Серии 2-4 – сравнительные – определение индивидуальных оптимумов  $R_{b_{max}}, \lambda_{min}, \varepsilon_{max}$  и их РТ- координат.

На рис.1 показаны изменения оптимумов критериев качества при изменении

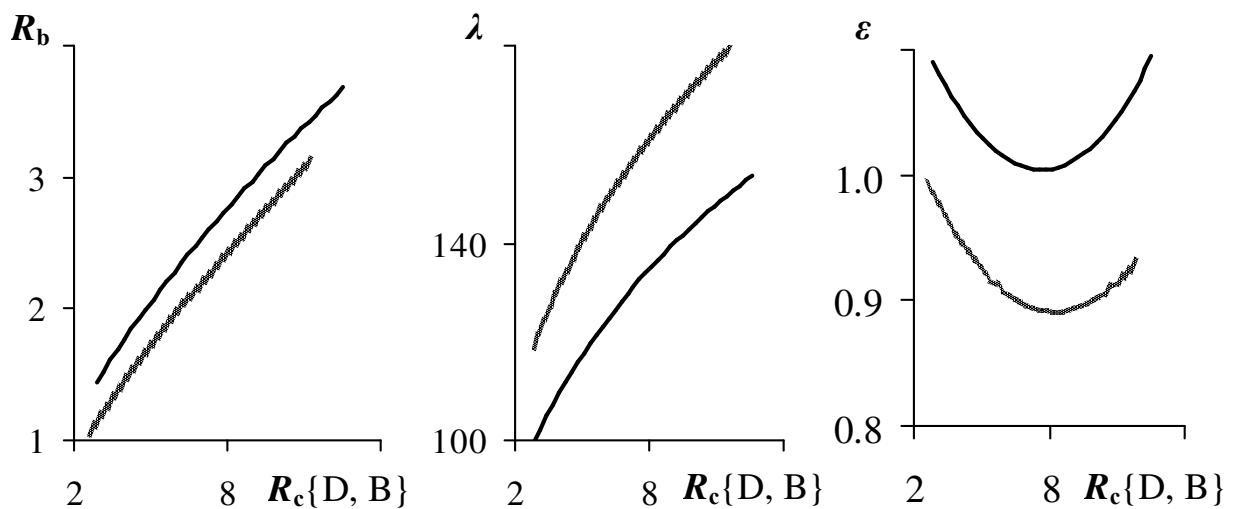


Рис. 1. Компромиссные оптимумы критериев качества (темная линия) и их уровни при оптимальном значении другого критерия (светлая линия) в зависимости от характеристики нормативов

обобщающего показателя  $R_c\{D, B\}$ . С его уменьшением снижаются и  $R_{b,comp}$  и  $\lambda_{comp}$ . Это достоверно описывается степенными функциями  $R_{b,comp} = 0.73(R_c\{D, B\})^{0.638}$  и  $\lambda_{comp} = 27.5(R_c\{D, B\})^{0.293}$ . Графики не противоречат теории ячеистых структур – темпы роста прочности на растяжение и теплопроводности замедляются с увеличением плотности.

Если оптимизация проводится индивидуально для этих двух критериев (серии 2 и 4), то подобные кривые располагаются для прочности на изгиб на 4% выше, а для  $\lambda$  на 4% ниже компромиссно оптимальных уровней. Такие отклонения позволяют оценить «недобор» при переходе от индивидуальных к компромиссным оптимумам как вполне допустимые.

Однако нередко оптимизация проводится индивидуально для одного критерия, который назначается «базовым». В частности, минимальному коэффициенту теплопроводности соответствуют уровни  $x_i\{\lambda_{min}\}$  и, если их использовать для многокритериальной ситуации, то остальные критерии качества газосиликата могут существенно ухудшиться. Так, показанная на рис. 1 кривая  $R_b(x_i\{\lambda_{min}\})$  проходит ниже компромиссно оптимальной на 9-21%. Еще больше потери для кривой  $\lambda(x_i\{R_{b,max}\})$  – она лежит выше компромиссной на 20-30%.

Характер кривых  $\lambda$  на рис. 1 объясним, в частности, изменением в блоках  $\{D, B\}$  как общей пористости газосиликата, так и распределения пор по размерам [5].

Верхняя кривая предельной упругой деформации при изгибе (деформативности) на рис. 1 соответствует компромиссно оптимальным РТ-решениям для трех критериев качества, а расположенная ниже на 10-14% – использованию  $x_i\{\lambda_{min}\}$ . Эти параболы отражают лишь тенденции (риск несколько меньше 5%) изменения  $\epsilon$  при смене  $\{D, B\}$ . Но и при таком

ограничении их можно признать информативными, поскольку сведения о связи деформативности с  $\gamma$  и  $R_c$  (а тем более с комплексом РТ-факторов) весьма ограничены и относятся к отдельным, «точечным» составам.

Кривая  $\varepsilon_{comp}(R_c\{D, B\})$  двуветвевая, отражающая, по-видимому, две конкурирующие тенденции. В правой ее части деформативность увеличивается вместе с ростом плотности и прочности, обусловленных интенсивным формированием уплотненных структур из крупных кристаллов высокосновных гидросиликатов кальция при повышенной температуре среды в автоклаве. Для газосиликата пониженной плотности и прочности (ниже «нейтрального» диапазона  $R_c\{D, B\} = 6-9$  МПа) обнаруживается вторая тенденция к повышению деформативности. В вычислительных экспериментах  $\varepsilon_{comp}$  газосиликата {500, 1.5} приближается к уровню в блоке {800, 7.5}. Такой феномен может быть связан с тем, что у газосиликатов с пониженными D или B компромисс  $R_b, \lambda, \varepsilon$  достигается при уровнях РТ-факторов, формирующих структуру с относительно повышенной вязкостью разрушения.

**Влияние нормативных требований на уровни РТ-факторов, обеспечивающие компромиссные оптимумы критериев качества газосиликата.** Факторы  $(x_1, \dots, x_9)_{comp}$  изменяются дискретно на 12 уровнях в зависимости от нормативов D и B. Также как и у компромиссных уровней критериев качества их положение в блоках характеризуется обобщающим показателем  $R_c\{D, B\}$ . Из девяти РТ-факторов достоверные линейные связи с этим показателем и критериями  $R_b$  и (или)  $\lambda$  имеют лишь два: количество порообразователя ( $x_6$ ) и продолжительность изотермической выдержки ( $x_4$ ).

Однако при компромиссной оптимизации возникает ситуация, принципиально отличная от поиска оптимума по одной многофакторной ЭС-модели, когда каждый фактор можно изменять независимо.

При поиске компромисса методом итерационного случайного сканирования полей нескольких свойств материала на каждом этапе решается обратная задача математического моделирования. Сначала одновременно для всех критериев качества  $Y$  активно сокращаются диапазоны допустимых значений  $RAV\{Y_j\}$  [2], в которых остается ограниченное число вариантов. Как следствие для этих вариантов становятся известными уровни обеспечивающих их факторов. При этом уровни РТ-факторов, оказываются взаимозависимыми случайными величинами. Они представляют систему с внутренними корреляционными связями, обеспечивающими взаимную компенсацию факторов для сохранения компромисса критериев качества при изменении  $R_c\{D, B\}$ .

Связи в системе уровней  $x_{i,comp}$  отражает граф на рис. 2. Показаны только 8 (из 36

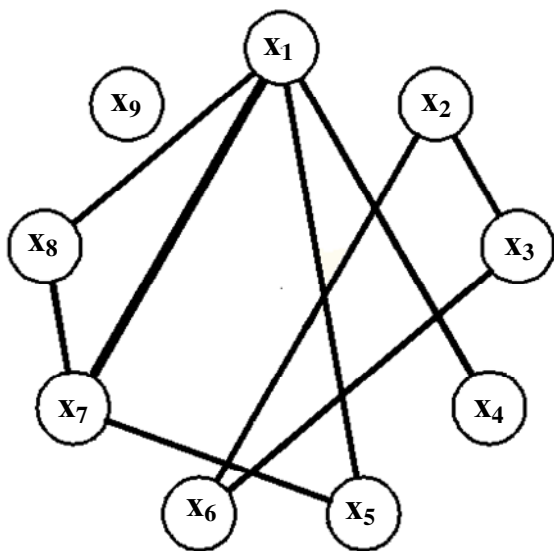


Рис. 2. Граф системы компромиссных уровней факторов (толстая линия – риск отсутствия связи  $\alpha \leq 0.05\%$ , более тонкие –  $\alpha \leq 0.5\%$ )

возможных) линейных связей, которые можно признать достоверными (риск  $\alpha \leq 0.05\%$ ) и практически достоверными ( $\alpha \leq 0.5\%$ ). Система складывается из трех «слабо связанных» между собой групп: подсистема  $x_2 - x_3 - x_6$ , подсистема  $x_1 - x_4 - x_5 - x_7 - x_8$  и оказавшийся несвязанным фактор  $x_9$ . Как и при анализе влияния нормативов на компромиссные оптимумы  $R_b$ ,  $\varepsilon$  и  $\lambda$ , обеспечивающие их значения факторов рассматриваются в зависимости от  $R_c\{D, B\}$ . При этом нормализованные  $-1 \leq x_i \leq +1$  преобразуются в натуральные  $X_i$ . Это позволяет логарифмировать факторы, что существенно

расширяет веер конкурирующих моделей  $X_{i,comp}(R_c\{D, B\})$ .

В первой из выделенных подсистем (рис. 3а) приоритетным для структурирования во всем анализируемом диапазоне  $\{D, B\}$ , естественно, является содержание алюминиевой пудры  $X_6$ . Изменение компромиссно оптимального уровня этого фактора (рис. 3б) достоверно ( $\alpha \leq 0.05\%$ ) описывается экспоненциальной моделью

$$X_{6,comp} = 0.036 \cdot \exp(2.89/R_c\{D, B\})$$

с коэффициентом детерминации 0.72, то есть, почти 3/4 вариации количества порообразователя обусловлено изменением нормативов. Так переход к газосиликатам с пониженными нормативами D и B требует интенсивного увеличения содержания порообразователя для компромиссного оптимума критериев качества.

Кроме этого фактора, достоверно влияющего (как отмечалось выше) на компромиссные уровни  $R_b$  и  $\lambda$ , в подсистему входят  $X_3$  и  $X_2$ , влияние которых на критерии качества проявляется через практически достоверные

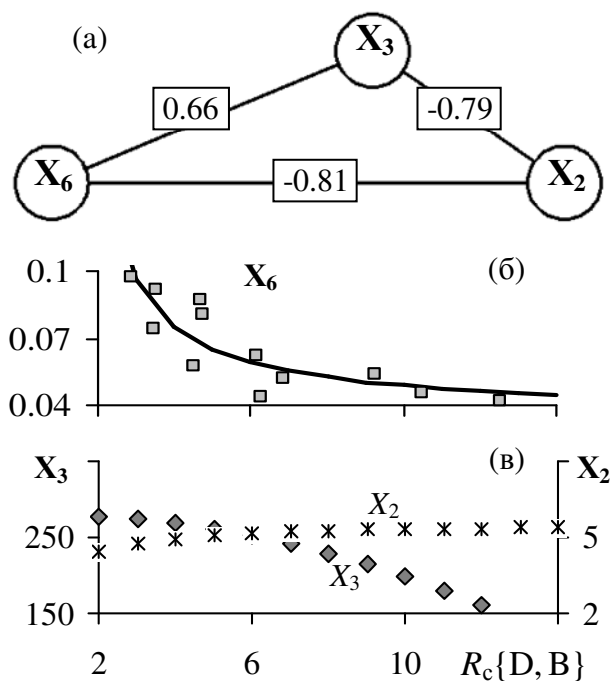


Рис. 3. Граф 1-ой подсистемы компромиссных уровней факторов (а) и их изменения (б, в) при изменении нормативных условий

корреляционные связи с  $X_6$  (рис. 3а). Поэтому при увеличении количества порообразователя для сохранения компромисса требуется повышать (в силу значимой положительной корреляции) и тонкость помола песка  $X_3$ . Ее изменение в зависимости от показателя нормативов (рис. 3в) охватывает практически весь исследуемый диапазон этого фактора ( $250 \pm 100 \text{ м}^2/\text{кг}$ ).

В то же время должен изменяться еще один РТ-фактор – влажность песка при помоле с известью  $X_2$ . В зависимости от нормативов эта координата компромисса варьирует в узких пределах (рис. 3в). Однако при увеличении содержания пудры и тонкости помола уровень влажности следует снижать в силу практически достоверной отрицательной корреляции с обоими этими факторами (рис. 3а).

Вторая подсистема уровней факторов, обеспечивающих компромиссные оптимумы в 12 блоках {D, B}, объединяет 5 элементов (рис. 4а). За исключением достоверной связи продолжительности изотермического твердения  $X_4$  ( $8 \pm 4$  час) с прочностью  $R_b$  эти факторы слабо влияют на критерии качества газосиликата. Особенность  $X_4$ , изменения

компромиссного уровня которого показаны на рис. 4б, в том, что именно он в основном определяет энергоемкость автоклавного твердения. Поэтому на заключительной итерации этот фактор использовался как дополнительный критерий оптимальности.

Целенаправленная минимизация нормализованного  $x_4$  начиналась после сокращения диапазонов компромисса критериев  $R_b$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$  ниже 10% диапазонов их допустимых значений RAV [2] на этом этапе.

Сокращение времени изотермической выдержки не меньше разности между средним уровнем  $RAV\{x_4\}$  перед минимизацией и конечным компромиссным уровнем  $x_{4,comp}$ . Это сокращение составляет около 40 мин. (в среднем для 12 {D, B}) при выполнении нормативных требований и компромиссной оптимизации  $R_b$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$ ).

Однако минимизация времени твердения должна сопровождаться изменением уровней еще четырех факторов (рис. 4а).

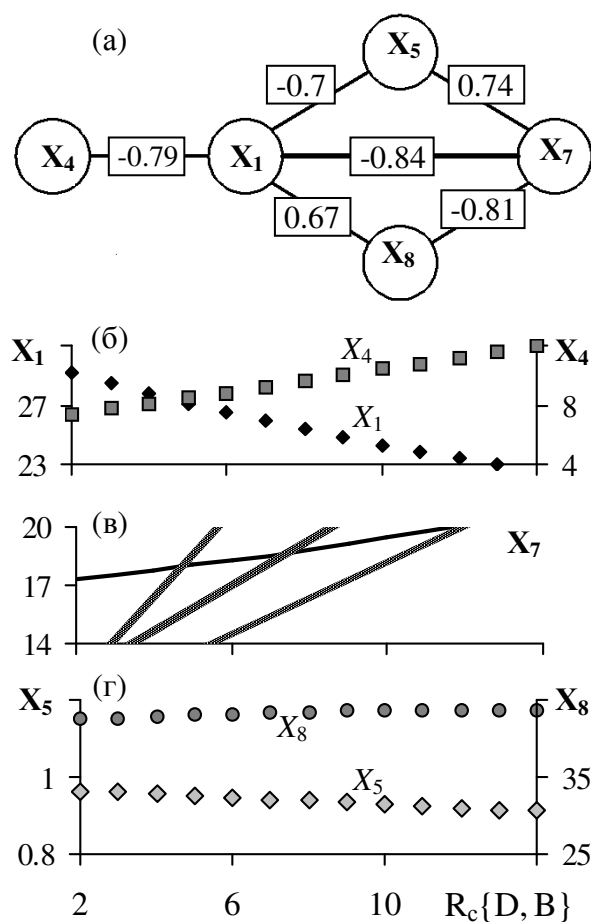


Рис. 4. Граф 2-ой подсистемы компромиссных уровней факторов (а) и их изменения (б-г) при изменении нормативных условий

Линейная отрицательная связь между компромиссными уровнями  $X_4$  и  $X_1$  указывает (с риском менее 0.5%) на необходимость увеличения расплыва растворной смеси; параболическая функция ( $\alpha$  около 0.5%) изменения  $X_{1,comp}$  показана на рис. 4б. Снижение  $R_c\{D, B\}$  сопровождается ростом водосодержания и уменьшением (риск около 5%) уровней  $\gamma$ ,  $R_{b,comp}$  и  $\lambda_{comp}$ .

Для остальных трех факторов,  $X_4$ ,  $X_7$  и  $X_8$ , линейных связей (значимых при  $\alpha \leq 5\%$ ) с компромиссно оптимальными уровнями критериев качества газосиликата не обнаружено – наблюдаются лишь слабые тенденции.

Активное сокращение времени пребывания газосиликата в автоклаве и увеличение водосодержания смеси влекут ( $\alpha < 0.05\%$ !) для сохранения компромиссных решений снижение активности смеси  $X_7$  (в интервале 14...20%), что может способствовать (риск около 5%) повышению деформативности газосиликата.

Для совокупности 12 нормативных блоков кривая на рис.4в отражает слабую тенденцию к снижению  $X_7$  с уменьшением  $R_c\{D, B\}$ . Однако здесь же наблюдается и иная тенденция – внутри каждой дискретной марки  $D_i$  активность линейно (без оценки риска) снижается с уменьшением класса по прочности на сжатие  $Vi_1 > Vi_2 > Vi_3$ . Но при переходе к другой марке  $D_j$  происходит скачкообразный практически параллельный сдвиг прямой. Для газосиликата новой марки  $D_j$  высший класс  $B_{j1}$  вновь получается при верхнем (в пределах эксперимента) уровне активности смеси, а  $B_{j3}$  – при нижнем. Эти результаты позволяют отметить, что в условиях компромисса  $R_b$ ,  $\epsilon$  и  $\lambda$  активность смеси мало влияет на марку по плотности  $D$ , но определяет класс газосиликата внутри данной марки.

Увеличение водосодержания растворной смеси и уменьшение активности согласовано требуют повышения температуры воды затворения  $X_8$  (в пределах 25...45 °С). График на рис. 4г не позволяет (риск более 20%) отметить какие-либо тенденции. Однако дополнительный анализ контролируемых технологических параметров доавтоклавного твердения указал на их практически достоверные связи с  $X_8$ . В частности, при увеличении температуры воды затворения удлиняются периоды вспучивания и схватывания [6].

В анализируемую подсистему (рис. 4а) уровней факторов, обеспечивающих компромисс критериев качества газосиликата, входит и давление пара в автоклаве  $X_5$  ( $1 \pm 0.2$  МПа). Это вторая характеристика энергоемкости твердения. На последней итерации компромиссной оптимизации  $x_5$  дополнял набор критериев. Аналогично  $x_4$ , фактор  $x_5$  целенаправленно минимизируется; это не противоречит направлениям его линейных связей во второй подсистеме. На рис. 4г показана функция  $X_5(R_c\{D, B\})$ , учитывающая результаты компромиссной минимизации давления пара. Диапазоны компромисса [2] для  $x_5$  оказались существенно уже, чем у времени твердения  $x_4$ , поэтому удалось дополнительно снизить

давление лишь в среднем на 0.02 МПа. Соответствующее снижение температуры среды твердения полезно для реализации слабой тенденции (риск 5-7%) к увеличению деформативности газосиликата.

Обеспечивающий компромисс критериев качества уровень содержания цемента  $X_9$  оказался несвязанным ни с одной из подсистем (рис. 2). В его изменении с уменьшением  $R_c\{D, B\}$  прослеживается тенденция к снижению по экспоненциальной функции. Это можно отнести к положительным направлениям, поскольку оно может способствовать ( $\alpha$  около 5%) повышению деформативности.

**Заключение.** Четыре марки газосиликата по плотности и три класса по прочности на сжатие образуют 12 двумерных «нормативных блоков». В каждом определены компромиссно оптимальные уровни трех критериев качества  $Y_{\text{comp}}$  и обеспечивающих их девяти РТ-факторов  $x_{\text{comp}}$ , в том числе двух, характеризующих энергоемкость автоклавного твердения. Для перехода между блоками введен их обобщающий показатель – предел прочности на сжатие при  $x_{\text{comp}}$  в данном блоке. Изменения  $Y_{\text{comp}}$  и  $x_{\text{comp}}$  в зависимости от уровня этого показателя описаны непрерывными функциями (с известными рисками). Уровни девяти  $x_{\text{comp}}$  образуют систему, внутренние связи в которой обеспечивают их взаимную компенсацию для сохранения компромиссно оптимальных решений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоклавный газобетон: Десятифакторное 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.
2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Гаврилюк В.П. Компромиссная оптимизация свойств газосиликата при дискретных равномерно распределенных уровнях девяти рецептурно-технологических факторов // Вісник ДонНАБА. Сучасні будівельні матеріали. – Макіївка: ДонНАБА, 2009. – Вип. 2009-1 (75). – С. 139-146.
3. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Гаврилюк В.П. Некоторые обратные задачи компьютерного строительного материаловедения // Вісник ДонНАБА. Сучасні будівельні матеріали, конструкції та інноваційні технології зведення будівель і споруд. – Макеевка: ДонНАБА, 2010. – Вип. 2010-5(85), т. 1. – С. 33-38.
4. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов. – К.: Будивельник, 1989. – 240 с.
5. Прогнозирование теплопроводности ячеистого бетона по моделям, учитывающим параметры распределения элементов поровой структуры / Вознесенский В.А., Эскуссон К.К., Керш В.Я. и др. // Исследования по строительству. Строительная теплофизика. Долговечность конструкций. – Таллинн: Валгус, 1989. – С. 115-129.
6. Анализ и моделирование влияния рецептурно-технологических факторов на контролируемые параметры структурообразования газосиликата до автоклавной обработки / В.А. Вознесенский, В.П. Гаврилюк, Т.В. Ляшенко, Н.В. Хлыцов // Вісник ОДАБА. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2010. – Випуск № 38. – С. 108-114.