

УДК 666.971.3:519.2

**КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОИСК КОМПРОМИССНЫХ
РЕШЕНИЙ СЛУЧАЙНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ И
СОВМЕЩЕНИЕМ ДИАГРАММ ПОЛЕЙ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА
(ПЕНОБЕТОН НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ)**

Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Мартынов В.И., Мартынов Е.В.
(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Для пенобетонов Д600 и Д700 с помощью методов компьютерного материаловедения по комплексу четырехфакторных неполных кубических моделей найдены составы с известняковым наполнителем при сниженным на 200 кг/м³ расходе цемента.

Введение. Совершенствование методик выбора технологических решений с использованием комплекса ЭС-моделей актуально с момента их появления. Естественно, что первые шаги были сделаны в направлении совместного отражения изолиниями разных свойств объекта на единой двухфакторной диаграмме с выделением области допустимых решений (ОДР), в которой выполняются нормативные требования ко всем критериям качества материала [1, рис. 3.2]. Такая визуализирующая результаты моделирования графо-аналитическая методика [2], неизменная по сути, была расширена на 3-6-ти факторные ситуации (изоповерхности в кубическом или призматическом пространстве, диаграммы «Квадраты или треугольники на квадрате или треугольнике» и т.п. [3, рис. 2.1]. Однако естественную для восприятия (и поэтому самую распространенную) форму отображения результатов моделирования представляют двух- или трехфакторные диаграммы, для построения которых есть разнообразное программное обеспечение. К анализу таких диаграмм сводится и принятие решений по комплексу многофакторных ЭС-моделей, в которых материаловед предварительно фиксирует (с весьма разной степенью логичности и инженерной обоснованности) часть факторов в виде констант или функций. Наиболее эффективные методы анализа основаны на концепции полей свойств материалов [4].

Для поиска компромиссных оптимальных решений (при неограниченном числе критериев качества) разработана процедура случайного сканирования полей свойств с использованием метода Монте-Карло (число факторов в ЭС-моделях ограничено только возможностями натурального эксперимента). Однако в ряде случаев к

заключительным этапам этой итерационной процедуры целесообразно дополнительно подключать анализ ОДР на «традиционных» диаграммах.

Компьютерное сканирование дало положительные результаты [5] при поиске, в частности, компромиссных составов пенобетонов неавтоклавного твердения марок Д600 (диапазон плотности в сухом состоянии $\rho=600\pm 50$ кг/м³, наименьший класс по прочности на сжатие В-1, средний предел прочности $R = 1.5$ МПа) и Д700 ($\rho = 700\pm 50$ кг/м³, наименьший класс В-1.5, $R= 2$ МПа) [6]. Найдены компромиссные минимальные уровни для двух «структурных» критериев – водопоглощения W и влажности в естественном состоянии w_e (оба в % по массе), в условиях норматива коэффициента размягчения при водонасыщении $K_w=0.75$.

Рассматриваемая новая версия поиска компромисса использована в задаче, направленной на ресурсосбережение, что выражает основная целевая функция. Это количество наполнителя, заменяющего часть портландцемента, которое следует максимизировать (в пределах исследованного факторного пространства). При этом по-прежнему желательно компромиссно минимизировать уровни W и w_e .

Условия эксперимента. На основе выполненных ранее исследований [7, 8] для варьирования в эксперименте выбраны по два фактора из двух групп – «Дисперсионная среда» и «Наполнение».

Наполнение системы характеризуют – общая доля (по массе) N зерен наполнителя (диаметр до 0.63 мм) в сухой смеси с цементом, $X_2=0.25 \pm 0.20$, и массовое соотношение M между песком кварцевым ($x_3=-1$) и известняковым ($x_3=+1$), причем $M=1:1$ соответствует уровню $x_1=0$. После сухого смешивания наполнителя с цементом (бездобавочный, «500») к ним добавлялась вода, в количестве, обеспечивающем проектную подвижность по расплыву раствора D (мм), определяемому на приборе Суттарда. Водопотребность сухой смеси V_{cc} (дм³/кг) служила одним из выходных критериев структурообразования системы.

Подвижность раствора как первый фактор в группе «Дисперсионная среда» изменялся на уровнях $X_1=200\pm 60$ мм. Другой фактор – содержание A добавки «Асилин 12», изменяющей в ранние сроки скорость твердения, $X_4 = 1\pm 1$ (% от массы цемента). Нормализация всех факторов к $-1 \leq x_i \leq 1$ типовая [9].

Пенобетон получали по традиционной двустадийной технологии. Плотность пенобетонной смеси подбиралась постоянной – 780 ± 10 кг/м³. Пенообразователь ПБ-2000 – водный раствор натриевых солей алкилсульфатов жирных кислот со стабилизирующими добавками.

Количество вводимой в пенобетонную смесь готовой пены подбиралось опытным путем для каждой точки плана эксперимента. Расход пены V_n (дм³/кг) также являлся одним из выходных критериев структурообразования; вместе с критерием V_{cc} по нему оценивается общее количество воды V (дм³/кг) в пенобетонной смеси.

Изготавливалось по два цилиндра высотой 650 мм и диаметром 105 ± 5 мм, которые 28 суток находились в камере нормального твердения. Цилиндры распиливались на 6 образцов высотой 100 ± 5 мм, которые в случайном порядке отбирались для различных испытаний.

План эксперимента и результаты моделирования. Четырехфакторный эксперимент поставлен по специальному 41-точечному плану [10], позволяющему построить неполные кубические модели с эффектами взаимодействия $b_{ij}x_i^2x_j$ и $b_{ijk}x_ix_jx_k$ ($i < j < k$).

В табл. 1 приведены пять таких моделей, используемых [5] для поиска компромиссных оптимальных составов пенобетона; незначимые (риск $\alpha=0.1$) оценки коэффициентов равны нулю.

Такого типа модели позволяют анализировать ситуации, когда однофакторная парабола $Y(x_i) = b_ix_i + b_{ii}x_i^2$ из-за эффектов взаимодействия с другими j -тыми факторами b_{ij} меняет фокальный параметр – сначала вырождается в прямую, а затем меняет направление ветвей.

Так, в частности, в центре экспериментально исследованного

Таблица 1. Оценки коэффициентов пяти неполных кубических моделей

	ρ	R	K_w	W	w_e
b_0	642	1.20	0.67	33.1	20.7
b_1	-55	0.32	0.06	0	0
b_2	-54	-0.45	0.07	4.7	2.9
b_3	-20	0.31	0.00	3.5	2.7
b_4	0	-0.29	0	0	0
b_{11}	41	-0.24	0.07	0	-2.9
b_{22}	0	0.08	0.07	0	-1.5
b_{33}	-22	0.22	0.04	0	3.6
b_{44}	76	0.47	0	-4.0	-5.8
b_{12}	-23	-0.14	0	0.9	0
b_{13}	0	0	-0.04	0.0	0
b_{14}	0	0.14	0	0	0
b_{23}	-25	0.04	-0.01	1.0	0.7
b_{24}	0	0.15	-0.05	0	0
b_{34}	14	0.10	0.01	0	0
b_{112}	0	0.28	-0.10	0	0
b_{113}	0	-0.24	0.07	0	0
b_{114}	0	0	0	-3.6	0
b_{122}	-27	-0.25	-0.10	3.3	2.5
b_{223}	0	0	-0.08	0	0
b_{224}	0	0.26	-0.01	-2.1	-3.4
b_{133}	49	-0.15	0.06	0	0
b_{233}	74	0.10	0	-2.0	-3.3
b_{334}	-68	-0.36	0	4.9	6.6
b_{144}	0	0.14	-0.07	-2.1	-1.6
b_{244}	-34	-0.30	0	0	0.0
b_{344}	0	0	0	-1.8	-1.8
b_{123}	35	0	-0.05	0	-1.4
b_{124}	13	0	-0.01	0	0
b_{134}	0	0.06	-0.01	0	0
b_{234}	14	0	0.04	1.3	1.0

Таблица 2. Анализ изменения в неполных кубических ЭС-моделях (табл. 1) квадратичных эффектов b_{ii} под влиянием j -тых факторов

Показатели изменения формы парабол под влиянием x_j	Для критериев качества пенобетона					Средние по пяти критериям
	ρ	R	K_w	W	w_e	
$\Sigma b_{11j} , j = 2, 3, 4$	0	0.52	0.16	3.6	0	—
$\Sigma b_{22j} , j = 1, 3, 4$	27	0.51	0.19	5.4	5.9	—
$\Sigma b_{33j} , j = 1, 2, 4$	191	0.61	0.07	6.9	9.9	—
$\Sigma b_{44j} , j = 1, 2, 3$	34	0.44	0.16	4.0	3.4	—
$\Sigma b_{11j} /b_0, \%, j = 2, 3, 4$	0	43	25	11	0	16
$\Sigma b_{22j} /b_0, \%, j = 1, 3, 4$	4	43	28	16	28	24
$\Sigma b_{33j} /b_0, \%, j = 1, 2, 4$	30	51	10	21	48	32
$\Sigma b_{44j} /b_0, \%, j = 1, 2, 3$	5	37	10	12	17	16
Средние по четырем факторам	10	43	18	15	23	

пространства влияние на плотность пенобетона (ρ) соотношения в смеси зерен известнякового и кварцевого песков описывается параболой с направленными вниз ветвями ($b_{33}\{\rho\} = -22$), т.е. смешивание несколько уплотняет материал. Однако, если пенобетон приготавливается из высокоподвижного раствора с большой долей замещающего цемент наполнителя ($x_1 = x_2 = +1$) и без добавки А ($x_4 = -1$), то влияние x_3 будет описываться параболой с ветвями вверх ($b_{33}\{\rho\} = -22 + 49[+1] + 74[+1] - 68[-1] = +169$), т.е. смена соотношения между зернами наполнителя приводит к уменьшению плотности пенобетона.

В верхней части табл. 2 приведены абсолютные суммы коэффициентов взаимодействия $\Sigma|b_{11j}|$ для каждого из четырех факторов и пяти свойств. Сравнение этих сумм с оценками b_{ii} (в табл. 1 они выделены курсивом) показывает, что в 14 из 20 однофакторных парабол может изменяться направление их ветвей. Следует отметить, что это происходит в моделях всех пяти свойств под влиянием x_3 — смешивания зерен известнякового и кварцевого песков.

Относительные показатели изменения формы парабол (% к уровню свойства в центре эксперимента) приведены в нижней части табл. 2. Среди средних по столбцам (по свойствам) наибольшее у предела прочности пенобетона R , а максимальное по строкам именно у фактора смешивания песков.

Поиск компромиссного решения при случайном сканировании четырехфакторных полей пяти свойств пенобетона. На одном из этапов работ разыскивался оптимальный, ресурсосберегающий состав пенобетона плотностью $\rho_{\text{норм}} = 600 \text{ кг/м}^3$ (при $R \geq 2 \text{ МПа}$ и $K_w \geq 0.75$) с максимальной заменой портландцемента наполнителем ($x_2 \rightarrow x_{2,\text{max}} = +1$; $N_{\text{max}} = 45\%$). При этом должны быть компромиссно минимизированы водопоглощение W и естественная влажность w_e , что должно способствовать улучшению теплофизических показателей ограждающих конструкций. Процедура включала две итерации, каждая из которых состояла из трех этапов. Первый – генерация 10000 случайных составов пенобетона на полных полях пяти его свойств. Второй – выделение ОДР по нормативам (и максимальному уровню x_2 предыдущей итерации). Третий – максимизация x_2 и компромиссная минимизация W и w_e . Результаты шести этапов приведены в табл. 3.

На этапе 1-1 из $N=10016$ составов (генерируется 10000 случайных точек и добавляются 2^4 вершины четырехмерного куба) в ОДР (где выполнены нормативы $550 \leq \rho \leq 650 \text{ кг/м}^3$, $R \geq 1.5 \text{ МПа}$ и $K_w \geq 0.75$)

Таблица 3. Этапы компромиссной оптимизации для $\rho = 600 \pm 50 \text{ кг/м}^3$

Факторы и критерии	Этапы итераций и число случайных точек N (курсив)						Условия анализа диаграмм
	1-0	1-1	1-2	2-0	2-1	2-2	
	<i>10041</i>	<i>214</i>	<i>5</i>	<i>10005</i>	<i>222</i>	<i>98</i>	
x_1		-0.7...1.0	-0.5...-0.1	-0.8...0.2	-0.8...0.1	-0.8...0.1	–
x_2	<i>1</i>	-1.0...1.0	0.9...1.0	0.6...1.0	0.9...1.0	1.0	1
x_3	<i>1</i>	-1.0...1.0	0.8...1.0	0.5...1.0	0.8...1.0	0.8...1.0	1
x_4		-0.9...1.0	-0.8...-0.2	-1.0...0.1	-0.9...0.1	-0.9...0.1	–
ρ	523...969	591...650	606...641	568...737	603...649	603...649	Не хуже, чем уровни этапа 2-3
R	0.5...3.1	1.5...2.1	1.5...1.7	0.9...2.2	1.5...1.7	1.5...1.7	
K_w	0.56...1.0	0.75...0.91	0.76...0.79	0.72...0.90	0.75...0.83	0.75...0.83	
W	20.8...43.5	25.2...39.2	34.0...38.4	28.4...41.1	33.0...39.1	33.0...39.1	
w_e	6.5...28.3	14.9...27.5	18.6...25.0	13.0...27.2	16.6...25.5	16.6...25.5	

остаются 214 составов, но диапазон содержания наполнителя неопределен: $-1 \leq x_2 \leq +1$. Когда на этапе 1-2 содержание наполнителя максимизировано до $x_2 = 0.9 \dots 1.0$, в области конкурирующих решений осталось лишь 5 составов, которые учтены на стартовом этапе второй итерации 2-0.

Анализ конкурирующих составов ($N=222$), оставшихся на этапе 2-1 (при выполнении трех нормативных требований и повышенном до $x_2=0.9$ содержании наполнителя) позволил поднять критерий оптимальности на максимально возможный, стабильный уровень $x_2=+1$ ($H=45\%$ от массы цемента). При этом осталось 98 составов, в которых наполнитель должен иметь соотношение известняк/кварц в пределах $x_3 = 0.8 \dots 1$. Последнее приводит (без заметного ухудшения качества пенобетона) к инженерному решению: не вводить 10% кварцевого песка и перейти к мономинеральному известняковому наполнителю. Это определяет оптимальные фиксируемые уровни $x_2=x_3=1$, при которых далее анализируются локальные поля в координатах x_1 и x_4 , в частности (1-2).

$$\rho = 596 - 21x_1 - 40x_4 + 41x_1^2 + 42x_4^2 + 13x_1x_4 + 0x_1^2x_4 + 0x_1x_4^2 \quad (1)$$

$$R = 1.49 - 0.21x_1 + 0.14x_4 + 0.21x_1^2 + 0.17x_4^2 + 0.19x_1x_4 + 0x_1^2x_4 + 0.14x_1x_4^2 \quad (2)$$

При поиске оптимальных компромиссных решений по аналогичной процедуре для пенобетона марки 700 максимально достигнутый уровень наполнителя ниже – около 40%. Песок должен быть, как и прежде, известняковым ($x_3 = +1$), а бетон бездобавочным ($x_4 = -1$). При этом возможно существенное снижение W и особенно естественной влажности w_e .

Поиск компромиссных решений на двухфакторных диаграммах для известнякового наполнителя. В процессе случайного сканирования полей свойств определено, что пенобетон Д600 должен содержать 45% известнякового наполнителя – это в исследованных пределах максимум X_2 , при котором достигается сокращение расхода портландцемента в среднем около 200 кг/м^3 . Необходимо найти уровни подвижности x_1 ($D=20 \pm 6 \text{ см}$) и добавки x_4 ($A=1 \pm 1\%$), при которых будут компромиссно минимизированы водопоглощение W и влажность w_e . Изолинии $\rho=650 \text{ кг/м}^3$, $R=1.5 \text{ МПа}$ и $K=0.75$ на рис. 1а, построенные по двухфакторным моделям типа (1-2), ограничивают «запрещенные» зоны (затемнены) в области многокритериального поля. В оставшейся области показаны изолинии W и w_e ; в данном случае минимумы обоих критериев практически совпадают вблизи правого нижнего угла области компромиссных решений (ОКР).

Приоритетная информация при анализе ОКР находится в четырех ее граничных точках – $x_{1,\max(\min)}$ и $x_{4,\max(\min)}$. Их координаты можно

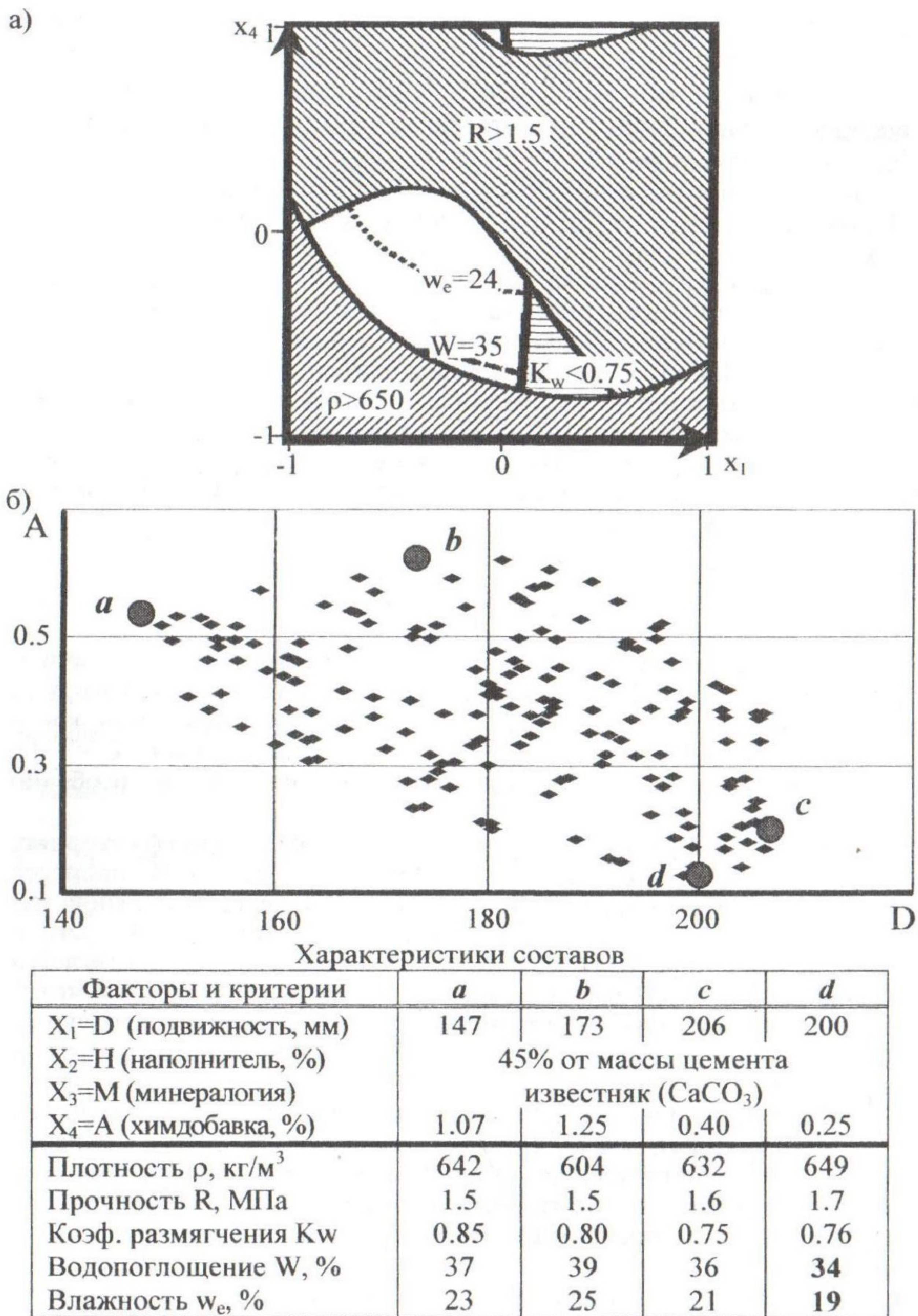


Рис.1. Поля свойств пенобетона при нормативе $\rho=600$ ($x_2=x_3=1$)

найти аналитически [2], решив системы нелинейных уравнений, образуемых парами моделей типа (1-2). Однако определение координат, как правило, не нуждается в высокой точности, поскольку при возвращении от x_i к натуральным переменным X_i приходится округлять их до «удобного» технологу уровня.

Для количественной оценки ОКР целесообразно еще раз использовать метод Монте-Карло, но уже на двухфакторном поле. В координатах $-1 \leq x_1, x_4 \leq +1$ генерируются 1000 составов и удаляются те из них, которые не удовлетворяют нормативам. Осталось 168 точек (рис.1б) в ОКР размером $\Omega_{600} \approx 17\%$. Сортировкой этих составов сначала по x_1 а потом по x_4 находятся характеристики «вершин» ОКР – точек a и c , b и d соответственно (таблица на рис. 1). Наилучший состав d для марки Д600 содержит 45% известнякового наполнителя при выполнении требований по ρ , R и K_w , причем сравнительно низкие уровни имеют и водопоглощение, $W \approx 34\%$, и естественная влажность, $w_e \approx 18-19\%$.

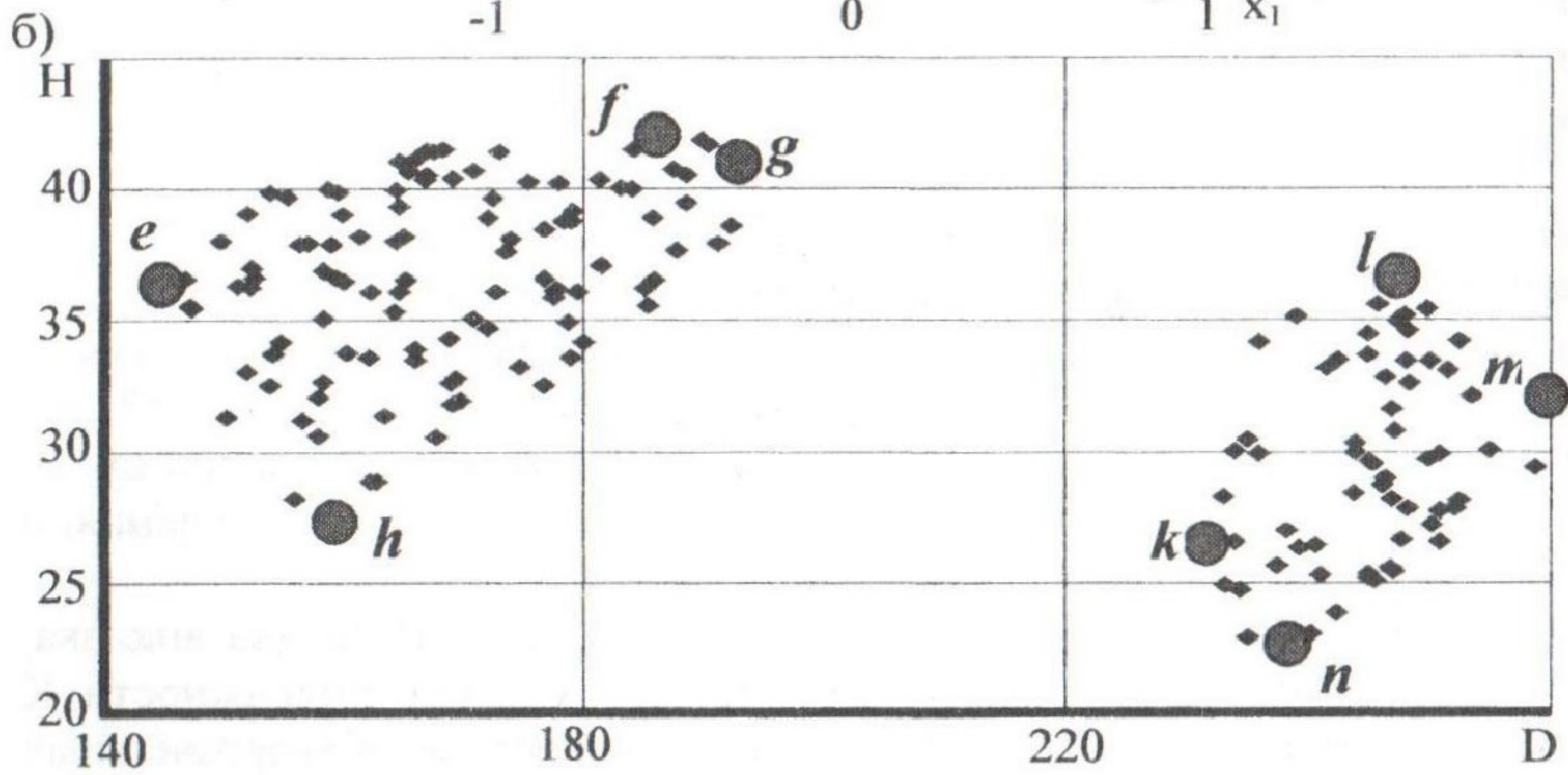
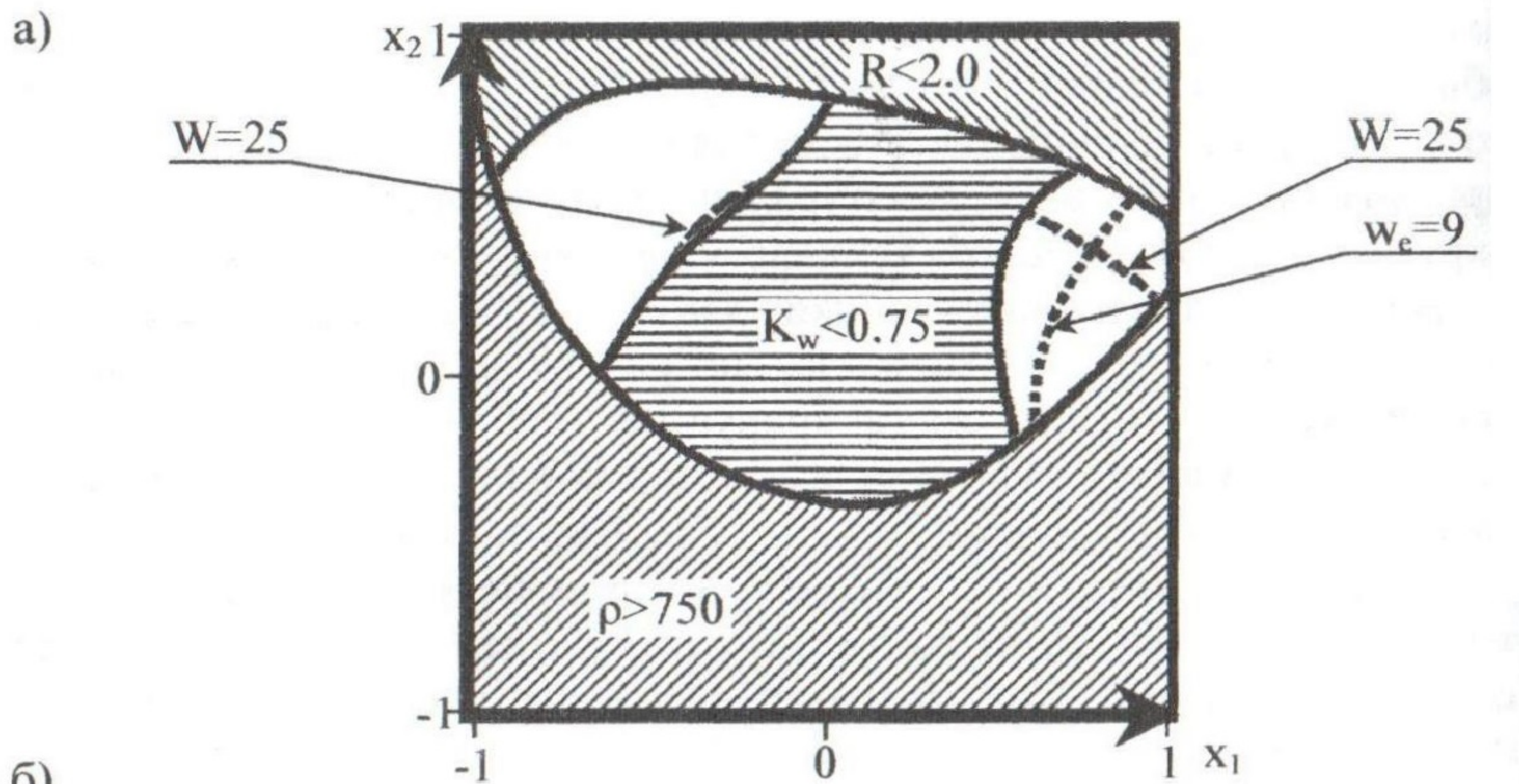
Более универсальна методика поиска решения для пенобетона Д700 с известняковым наполнителем ($x_3 = +1$) без добавки А ($x_4 = -1$), когда верхний уровень наполнения x_2 не определен.

Диаграмма на рис. 2 визуализирует эту ситуацию, в которой нужно максимизировать количество известнякового песка ($H \rightarrow 45\%$) и определить соответствующую подвижность цементно-песчаной смеси ($D = 20 \pm 6$ см) при компромиссной минимизации водопоглощения и влажности пенобетона.

Особенность этой диаграммы – разделение ОКР на два анклава, расположенных в противоположенных частях шкалы подвижности. К такой конфигурации привел двухветвевой поиск компромиссных решений для критериев качества пенобетона Д700 [5, с. 94].

Левый анклав (размер $\Omega_{700a} \approx 10.8\%$), позволяет вводить до 41-42% известнякового наполнителя, что снижает расход портландцемента примерно на 230 кг/м^3 . Подвижность таких цементно-песчаных смесей $D = 165-195 \text{ мм}$. При этом водопоглощение составит $W \approx 29\%$ и влажность $w_e \approx 14\%$.

В правом анклаве (размер $\Omega_{700b} \approx 6.3\%$), в области смесей большой подвижности, наилучший состав l содержит лишь 36% наполнителя. Однако, в этом анклаве критерии качества несколько лучше (W снижается до 26%, а w_e до 8-10%), причем при $H < 26-27\%$ есть небольшая (около 2%) область, где может быть получен пенобетон Д700 с прочностью на марку выше.



Характеристики составов

Факторы и критерии	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
$X_1=D$ (мм)	145	160	186	193	232	247	260	239
$X_2=H$ (%)	36	27	42	41	27	37	32	23
$X_3=M$	известняк ($CaCO_3$)							
$X_4=A$ (%)	нет добавки							
ρ , кг/м ³	748	747	694	692	734	713	742	749
R , МПа	2.0	2.4	2.0	2.0	2.6	2.0	2.1	2.7
K_w	0.85	0.76	0.78	0.76	0.75	0.76	0.82	0.77
W , %	31	29	29	29	26	30	29	26
w_e , %	12	13	14	14	11	10	8	11

Рис.2. Поля свойств пенобетона при нормативе $\rho=700$ ($x_3=1$; $x_4=-1$)

Включение. В процедуру поиска компромиссных рецептурно-технологических решений случайным сканированием полей свойств материала введены элементы, расширяющие возможности ее визуализации. В частности, на заключительном этапе используется совмещение диаграмм полей свойств, при этом область компромиссных решений оценивается количественно методом Монте-Карло.

Для поиска ресурсосберегающих составов пенобетона использован комплекс четырехфакторных неполных кубических моделей, содержащих значимые эффекты $b_{ij}x_i^2x_j$. Это позволяет описывать влияние отдельных факторов параболлами с переменной канонической формой, что существенно уточняет принятие решений в ситуациях, связанных, в частности, со смешиванием разных дисперсных систем и фазовыми превращениями.

В результате поиска ресурсосберегающих составов пенобетонов марок Д600 и Д700 показана целесообразность введения известнякового наполнителя, заменяющего 45 и 42 % портландцемента соответственно, при компромиссном уменьшении водопоглощения и естественной влажности материала.

1. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
2. Вознесенский В.А., Ковальчук А.Ф. Принятие решений по статистическим моделям. – М.: Статистика, 1978. – 192 с.
3. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов – К.: Будивэльник, 1989. – 240 с.
4. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса, Астропринт, 2006. – 116 с.
5. Многофакторные ЭС-модели с переменной канонической формой парабол (анализ критериев качества пенобетона)/ В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, В.И. Мартынов, Е.В. Мартынов // Моделирование в компьютерном материаловедении: Мат-лы международ. семинара МОК'46. – Одесса, Астропринт, 2007. – С. 90-95.
7. Мартынов В.И., Выровой В.Н., Орлов Д.А. Анализ структурообразования и свойств неавтоклавного пенобетона. – М.: Строительные материалы. –2005, №1. – С. 48-49.
8. Мартынов В.И., Орлов Д.А., Мартынов Е.В. Исследование структуры и свойств пенобетона // Вісник ОГАСА. – Одеса, 2006. – Вип. 23 – С. 195-202.
9. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – К.: Вища школа, 1989. – 327 с.
10. Методические рекомендации по применению экспериментально-статистических моделей для анализа и оптимизации состава, технологии и свойств композиционных материалов на основе щелочных вяжущих систем / Науч. ред. В.А. Вознесенский, П.В. Кривенко. – ОГАСА, НИИВМ им. В.Д. Глуховского. – К., 1996. – 105 с.