

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сланевский С.И. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса).

**Разработаны графоаналитическая и аналитическая поликритериальные методики оптимизации композиционных материалов, основанные на использовании математических моделей исследуемых свойств.**

Методика оптимизации составов композиционных материалов основана на использовании математических моделей исследуемых свойств и разработана в двух вариантах: 1-й вариант — графоаналитический, 2-й — аналитический.

Графоаналитический вариант методики оптимизации составов композиционных материалов основан на построении изолиний факторов, например — изолиний фактора  $X_2$ , при фиксированных или регламентированных значениях исследуемых свойств — например, средней плотности и прочности кремнепора. Изолинии фактора  $X_2$  строят в осях факторов  $X_1$  и  $X_3$ . Геометрическое место точек пересечения однозначных изолиний, относящихся к двум произвольно выбранным свойствам, например, средней плотности и прочности, является линией пересечения соответствующих изоповерхностей фактора  $X_2$ , каждая точка которой удовлетворяет выбранному сочетанию значений свойств. Аналогично строим линию пересечения изоповерхностей фактора  $X_2$  при другом сочетании свойств, например, средней плотности и теплопроводности. Точка пересечения двух линий, каждая из которых соответствует выбранному сочетанию свойств, является точкой, координаты которой одновременно удовлетворяют трём (или четырём, если свойства не повторяются) заданным сочетаниям свойств. Из множества компромиссных решений оптимальным будет являться то, которое обладает заданному параметру оптимизации. Возможны случаи, когда точки пересечения линий, соответствующих заданному компромиссу, отсутствуют. Тогда поиск решения сводится к анализу имеющегося множества оптимальных решений, удовлетворяющих двум заданным условиям. При оптимизации кремнепора на основе трепела Первозвановского месторождения (Кировоградская область) таким

компромиссным решением, обеспечивающим минимальный расход стабилизатора структуры и щелочесодержащего компонента во вспученном кремнепоре, является точка с координатами: содержание NaOH 34 %, водотвёрдое отношение – 0,74, содержание стабилизатора структуры 2 %.

При разработке аналитического варианта оптимизации составов композиционных материалов в основу был положен так называемый метод сетки. Порядок определения оптимальных рецептурно-технологических условий приготовления композиционных материалов для 4-факторной математической модели представлен на блок-схеме.

Поиск оптимальных решений сводится к анализу значений регламентируемых свойств при последовательном переборе вариантов сочетания значений всех исследуемых факторов, начиная с нижних или с верхних уровней их варьирования.

Назначается начальный нижний или верхний уровень варьирования факторов, исходя из параметра оптимизации. Например, если параметром оптимизации является экономический показатель изготавливаемого композиционного материала, то назначаем начальные уровни факторов такие, которые обеспечивают минимальный расход наиболее дорогостоящих компонентов или минимальные энергетические показатели технологического процесса. Для этого вначале необходимо проранжировать все факторы по их вкладу в экономический показатель.

Очередность последовательного перебора факторов также оказывает существенное влияние на правильность расчёта. Поэтому следует начинать перебор уровней варьирования с фактора, который оказывает наибольший вклад в экономический показатель.

Рассмотрим вариант оптимизации составов кремнепора по 3-факторным математическим моделям средней плотности и прочности со следующими факторами и их уровнями варьирования:  $X_1$  – процентное содержание каустической соды в смеси каустической соды с трепелом (NaOH=30÷34 %);  $X_2$  – водотвёрдое отношение (В/Т=0,7÷0,74);  $X_3$  – процентное содержание добавки стабилизатора структуры в её смеси с трепелом (СС=2÷10 %).

В результате реализации эксперимента и обработки полученных экспериментальных данных построены математические модели исследуемых свойств, значение коэффициентов которых представлены в табл. 1.

Таблица 1.

## Коэффициенты математических моделей исследуемых свойств

Наименование коэффициентов	средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	прочность в сухом состоянии, МПа	прочность в водонасыщенном состоянии, МПа	коэффициент размягчения	водопоглощение, %	коэффициент конструктивного качества	Общая пористость, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	коэффициент	стинный расход NaOH, кг/м <sup>3</sup>
b <sub>0</sub>	448,78	2,42	2,18	0,90	10,17	101,61	80,75	2,29	0,16	137,65
b <sub>1</sub>	146,70	-0,39	-0,40	-0,02	7,57	151,30	6,28	1,55	-0,02	-37,70
b <sub>2</sub>	14,60	0,03	0,15	0,06	-2,32	-57,60	-0,62	-0,48	0,00	5,00
b <sub>3</sub>	19,20	-0,05	0,07	0,05	-1,96	-9,50	-0,46	-0,09	0,01	2,40
b <sub>12</sub>	33,13	0,03	0,00	0,00	-3,69	-77,75	-1,40	-0,59	0,00	10,38
b <sub>13</sub>	4,63	-0,08	-0,08	-0,01	-0,94	-3,00	-0,38	-0,04	0,00	3,13
b <sub>23</sub>	17,63	0,00	0,00	-0,01	-0,91	-63,25	-0,75	-0,49	0,00	5,88
b <sub>11</sub>	-53,11	-0,27	-0,07	0,07	9,93	77,19	2,27	0,90	-0,01	-19,13
b <sub>22</sub>	4,39	-0,07	-0,02	0,03	-1,72	28,69	-0,23	0,15	-0,01	1,37
b <sub>33</sub>	-27,61	-0,07	-0,22	-0,05	-0,82	48,19	1,17	0,30	0,00	-8,63

Последовательность определения оптимального состава следующая. Задаёмся регламентируемыми или начальными величинами исследуемых свойств, например, начальной величиной средней плотности  $\rho_{ср} = \rho_{ср}^{нач}$  и прочности  $R_{сж} = R_{сж}^{нач}$ , а также минимальным содержанием каустической соды NaOH=30 % ( $X1=X1_{min}$ ) и минимальным содержанием стабилизатора структуры. По модели прочности кремнепороа для заданных условий определяем необходимое водотвёрдое отношение т.е. X2

$$X2=f(R, X1, X3).$$

Подставляя заданные значения X1 и X3 и найденное значение X2 в модель средней плотности, определяем её величину.

Как правило, при минимальных содержаниях NaOH и стабилизатора структуры величина средней плотности не соответствует регламентируемому значению. В этом случае к текущему (минимальному) содержанию стабилизатора структуры ( $X3_m$ ) прибавляем некоторую небольшую его величину, называемую шагом изменения фактора ( $\Delta X3$ )

$$X3=X3_m+\Delta X3$$

ОПТИМАЛЬНЫЕ СОСТАВЫ КРЕМНЕПОРА ДЛЯ ЗАДАНЫХ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ

N сос- та- вов	Факторы			Натуральные значения факторов			Оптимальный состав кремнепороа, для заданной средней плотности, кг/м <sup>3</sup>					Заданная средняя плотность и прочность и соответств-е Rсж, Ксж, W, Пор, Квсп, ККК и ККК						
	X1 NaOH	X2 В/Т	X3 СС	NaOH, %	В/Т	СС, %	Трелел	NaOH	Свинц. сурик	Вода	$\rho_{ср}$ кг/м <sup>3</sup>	Rсж	Ксж	W	Пор	Квсп	ККК	К-т тепл
1	1	-1	-1	34	0,7	2	112	58	2	80	172	1,7	0,82	34,1	92	6,0	479	0,111
2	1	-0,8	0,9	34	0,704	9,6	123	64	13	96	200	1,5	0,92	28,2	91	5,8	278	0,124
3	1	0,8	-0,7	34	0,736	3,2	161	83	5	123	250	1,8	0,97	23,7	89	4,4	208	0,116
4	0,8	0,6	-0,5	33,6	0,732	4	194	98	8	148	300	2,0	0,94	18,9	87	3,7	170	0,128
5	0,3	-0,3	-1	32,6	0,714	2	233	113	5	170	350	2,3	0,78	13,2	85	3,2	215	0,140
6	0,1	1	-0,9	32,2	0,74	2,4	267	127	7	202	400	2,3	0,91	9,3	82	2,7	135	0,139
7	-0,2	-0,7	-0,8	31,6	0,706	2,8	302	139	9	219	450	2,4	0,80	9,3	80	2,4	195	0,148
8	-0,6	-0,6	-0,8	30,8	0,708	2,8	339	151	10	247	500	2,5	0,83	9,3	78	2,0	192	0,152
9	-1	-1	-0,8	30	0,7	2,8	377	162	11	272	550	2,4	0,88	9,4	76	1,8	261	0,146
10	-1	-1	-0,1	30	0,7	5,6	380	163	23	282	565	2,5	0,95	9,3	76	1,8	166	0,153

и вновь определяем необходимое  $V/T$  ( $X_2$ ).

Если найденное  $X_2$  выходит за исследуемую область варьирования этого фактора, то повторяем расчёты, наращивая  $X_3$  с определённым шагом  $\Delta X_3$  до тех пор, пока содержание стабилизатора структуры не достигнет максимальной величине, принятой в эксперименте.

Однако же не исключено, что в этом случае условие по средней плотности может не выполняться. Тогда повторяем расчёт, начиная с содержания NaOH ( $X_1$ ), увеличенном на величину шага  $\Delta \text{NaOH}$  т.е.  $\Delta X_1$ . И так до тех пор, пока не будет выполняться условие по исследуемому свойству (в нашем случае – средней плотности).

Невыполнение заданных условий даже при достижении  $X_1$  и  $X_3$  максимальных значений свидетельствует о том, что в исследуемой области факторного пространства заданное сочетание исследуемых свойств недостижимо. В этом случае на экран дисплея и/или на принтер выводится сообщение – «Нет решений».

В этом случае после вывода сообщения программа изменяет одно из свойств или сразу оба свойства на величину заданного шага или, например, равным следующей марке или классу регламентируемых стандартом.

По принятой аналитической методике оптимизации составов, предусматривающей ранжирование факторов и определение с какого верхнего или нижнего уровней варьирования следует начинать последовательный перебор вариантов возможных сочетаний их значений, первый же состав, при котором будет выполняться условие по исследуемому свойству, является оптимальным для заданного компромиссного решения.

Необходимая точность расчёта достигается за счёт установления соответствующих шагов изменения факторов  $X_1$  и  $X_3$ .

Для повышения скорости расчёта можно использовать изменяющийся шаг. Вначале крупным шагом устанавливаем область составов близких к оптимальным. Затем, последовательно уменьшая шаг, суживаем эту область до величин, обеспечивающих необходимую точность. При этом скорость определения оптимального состава повышается в 30-40 раз и, например, для пятифакторной модели на компьютере типа “Pentium-4” не превышает 1 секунды.

Оптимальные составы кремнепоровой смеси для заданных значений средней плотности и прочности, а также соответствующие оптимальным параметрам приготовления кремнепора другие исследуемые свойства приведены в таблице.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что со снижением средней плотности композиционных материалов расход NaOH понижается.

Оптимальные составы композиционных материалов, определённые по аналитическому варианту предлагаемой методики, полностью соответствуют оптимальным составам, определённым графоаналитическим способом, что свидетельствует о правильности методик и об отсутствии ошибок в созданных на их основе компьютерных программ.

1. Разработанная аналитическая и графоаналитическая поликритериальная методика оптимизации составов композиционных материалов, базирующаяся на использовании многофакторных математических моделей, универсальна и может быть использована при оптимизации рецептурно-технологических параметров приготовления различных материалов и не только в строительной отрасли.

2. Из предлагаемых двух методик оптимизации следует отдать предпочтение аналитическому варианту, так как он менее трудоёмок и более быстродейственен.

3. Преимущество графоаналитического варианта над аналитическим состоит в его наглядности.

#### Литература.

1. Сланевський С.І., Мартинов В.І. Сировинна суміш пористого камня та спосіб його одержання. Патент України №8060 від 26.12.95 р.
2. Сланевский С. И., Мартынов В.И., Степаненко А.В., Эйне Л.А. Строителен теплоизолационен материал. Патент България за изобретение № 62648.
3. Slanovsky S.I., Martynov V.I., Stepanenko A.V., Eine L.A. Thermally insulating building material. United States Patent No.: US 6,296,697 B1.